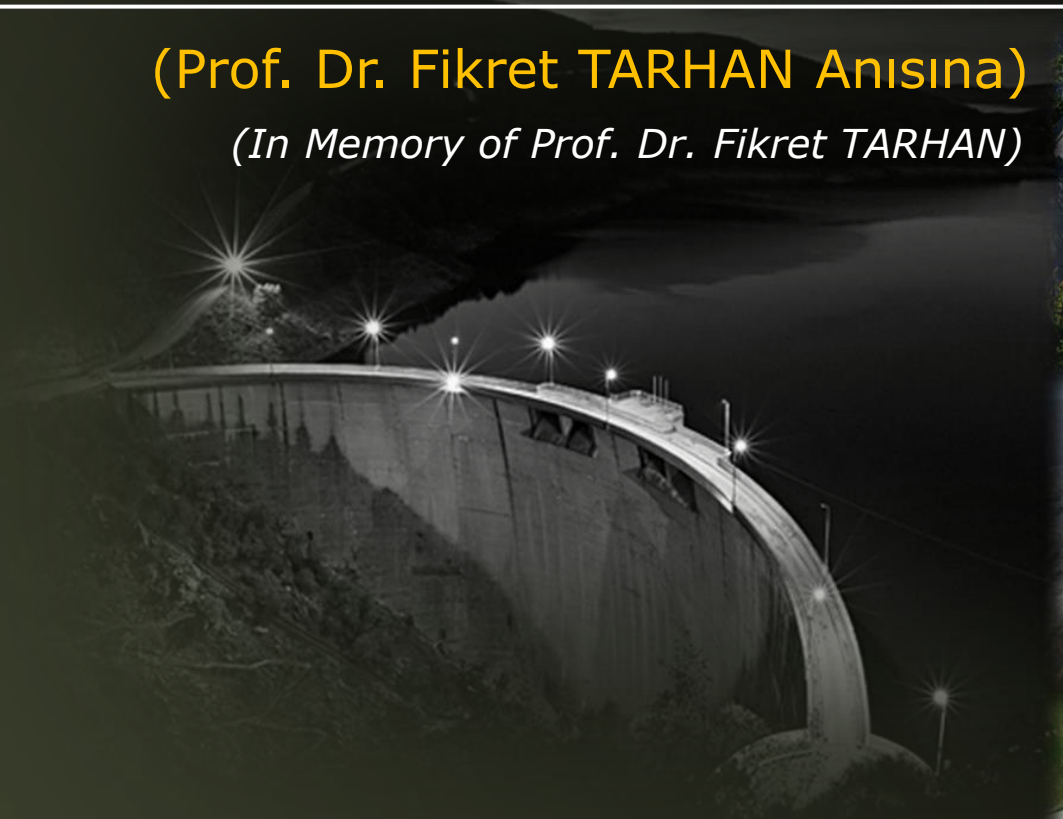
MÜHJEO'2015

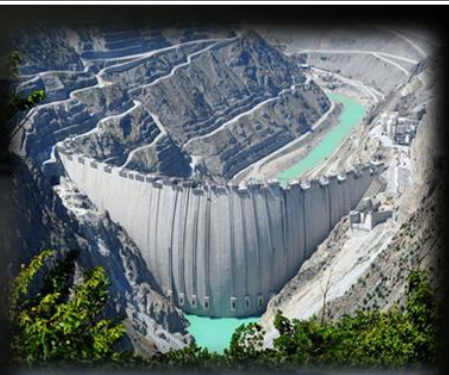
Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu

National Symposium on Engineering Geology

(Prof. Dr. Fikret TARHAN Anısına)

(In Memory of Prof. Dr. Fikret TARHAN)





3-5 EYLÜL 2015 TRABZON

3-5 SEPTEMBER 2015

EDİTÖRLER / *EDITORS*

Reşat ULUSAY, Mehmet EKMEKÇİ

Hakan ERSOY, Arzu FIRAT ERSOY

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Karadeniz Technical University

Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi

Osman Turan Culture and Congress Center

MÜHJEO'2015

Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu

National Symposium on Engineering Geology

Prof. Dr. Fikret TARHAN
(1939-2010)

1939 yılında Eskişehir'de doğan TARHAN, 1958'de orta öğretimini Bursa Erkek Lisesinde, yüksek öğrenimini 1964 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Mezuniyeti takiben Elektrik İşleri Etüt İdaresinde jeoloji mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve 1969 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne asistan olarak atanmıştır. Aynı üniversitede 1976 yılında Doktor, 1982 yılında Doçent, 1990 yılında da Profesörlüğe yükselmiştir. Doktorasından sonra bir yıl süreyle İngiltere'de Newcastle Üniversitesinde araştırma ve incelemelerde bulunmuştur. KTÜ'nün gelişmesinde önemli hizmetleri bulunan Prof. Dr. Fikret TARHAN, mühendislik jeolojisi ile ilgili lisans ve yüksek lisans dersleri vermiş, ayrıca çok sayıda tez yönetmiştir. 1983-1984 yılları arasında KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dekan Yardımcılığı, 1990-1992 yılları arasında KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, 1994-1996 yılları arasında KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi Dekanlığı, 1989-1999 yılları arasında KTÜ Heyelan Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü görevlerini yürütmüştür. Prof. Dr. Fikret TARHAN'ın ulusal ve uluslararası dergilerde yayımlanmış çok sayıda yayını bulunmaktadır.

3-5 EYLÜL 2015 TRABZON

3-5 SEPTEMBER 2015

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Karadeniz Technical University

Osman Turan Kültür ve Kongre Merkezi

Osman Turan Culture and Congress Center

MÜHJEO’2015 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ SEMPOZYUMU
(Prof. Dr. FİKRET TARHAN ANISINA)
3-5 EYLÜL 2015,TRABZON / TÜRKİYE

MÜHJEO’2015 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY
(IN MEMORY OF Prof. Dr. FİKRET TARHAN)
3-5 SEPTEMBER 2015, TRABZON / TURKEY

MÜHJEO’2015 ULUSAL MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ SEMPOZYUMU

MÜHJEO’2015 NATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY

Editörler / *Editors*

Reşat ULUSAY, Mehmet EKMEKÇİ, Hakan ERSOY, Arzu FIRAT ERSOY

Düzenleme / *Organized by*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Geological Engineering Department

Mühendislik Jeolojisi Derneği
Turkish Society for Engineering Geology

ISBN: 978-605-030-911-9

Baskı: Karadeniz Teknik Üniversitesi Matbaası - Trabzon
Tel: 0 (462) 377 2143 - 44

Bu bildiriler kitabının yayım hakkı, Mühendislik Jeolojisi Derneği'ne aittir. Bu kitapta yer alan bildirilerin aynen yayımlanması yazar(lar)ından izin alınması koşuluyla mümkündür. Alıntı için kaynak gösterilmesi yeterlidir. Bildiriler, Sempozyum Hakem Kurulu tarafından değerlendirilmiş olup, yazarları tarafından basıma hazır hale getirilmiştir. **Bildirilerin içeriklerinin tüm sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.**

Bu sempozyumun düzenlenmesinde katkıda bulunan kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.
Valuable contribution of the following organizations is gratefully acknowledged

Trabzon Büyükşehir Belediyesi

Maden Tetkik Arama Enstitüsü

Devlet Su İşleri

Türkiye Cumhuriyeti Karayolları

Afet Acil Durum Müdürlüğü

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

Hidrojeoloji Mühendisleri ve Su Kaynakları Araştırma Derneği

Akdağlar Madencilik

Gülsan Şirketler Grubu

Trabzon Jeoteknik Mühendislik

ÖNSÖZ

"MÜHJEO'2015 Ulusal Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu (Prof. Dr. Fikret Tarhan'ın Anısına)", Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Jeoloji Mühendisliği Bölümü ve Mühendislik Jeolojisi Derneği (MJD)'nin işbirliğiyle 3-5 Eylül 2015 tarihleri arasında KTÜ Osman Turan Kongre ve Kültür Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Ulusal nitelikteki bu sempozyumla; mühendislik jeolojisi ve hidrojeoloji disiplinlerini kapsayacak şekilde ülkemizde uygulamalı jeoloji alanında çalışan araştırmacıların, mühendislerin, yöneticilerin ve profesyonellerin bir araya getirilmesi ve aynı zamanda tüm katılımcılar için bu alandaki geleceğe yönelik eğilimlerin ve fırsatların sunulması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra, MÜHJEO'2015 Sempozyumu; mühendislik jeolojisine gönül vermiş, uzun yıllar boyunca jeoloji mühendislerinin yetiştirilmesine, mühendislik jeolojisinin sevdirilmesine ve MJD'nin bayrağı devraldığı Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi'ne önemli katkılarda bulunmuş olan KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü emekli öğretim üyesi merhum Prof. Dr. Fikret Tarhan hocamızı da bir kez daha şükranla anma ve sevenlerini bir araya getirme fırsatını sağlamıştır.

Sempozyum Bildiriler Kitabı'nda yer alan çalışmalar başlıca; şevlerin duraylılığı ve heyelanlar, tünel ve baraj yerlerindeki mühendislik jeolojisi uygulamaları, kaya ve zeminlerin jeoteknik özellikleri ve jeomekanik davranışları, doğal yapı malzemelerine ilişkin uygulamalar, depremlerle ilgili zemin davranışları ve diğer doğal afetler, mühendislik uygulamalarında hidrojeoloji, jeotermal enerji ve mühendislik jeofiziği uygulamaları gibi konuları içermektedir. Bildiriler öncelikle gönderilen özetlerin Sempozyumun amaç ve konularına uygunlukları açısından değerlendirilmiş, daha sonra bildiri tam metinleri davet edilen Sempozyum Hakem Kurulu üyelerince değerlendirilmiş ve son aşamada Editörlükçe kontrol edilerek programa alınmış ve basılmıştır. Bildiriler Kitabı'nda 67 adet bildiri bulunmaktadır.

Sempozyum'a bildiri göndererek katkılarını esirgemeyen tüm yazarlara, bildirileri zaman ayırarak değerlendiren Sempozyum Hakem Kurulu'na, çağrılı konuşmacı olarak Sempozyum'a renk katan Prof. Dr. Caner Zanbak'a, anma konuşmalarını yapmak üzere Prof. Dr. Fikret Tarhan'ın Sempozyum'a katılan değerli arkadaşlarına, tüm katılımcılara, Sempozyum'a destek veren kamu kurum ve kuruluşlarıyla mesleki derneklere, Sempozyum'a reklam ve maddi katkı sağlayarak destekleyen tüm kuruluşlara ve kuşkusuz sempozyumun başarılı şekilde geçmesi için her türlü katkıyı ve Bildiriler Kitabı'nın basımını sağlayarak örnek bir ev sahipliği yapan KTÜ Rektörlüğü ile KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölüm Başkanlığı ve bu bölümün akademik personeline şükranlarımızı sunarız.

Sempozyum Düzenleme Kurulu

Onursal Başkan / *Honorary Chairman*

Prof. Dr. Süleyman BAYKAL
Karadeniz Teknik Üniversitesi Rektörü
Karadeniz Technical University Rector

Sempozyum Eş Başkanları / *Symposium Co-Chairmen*

Fikri BULUT
(Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü)

Reşat ULUSAY
(MJD Başkanı, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü)

Sempozyum Sekreteri / *Symposium Secretary*

Arzu FIRAT ERSOY
(Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü)

Düzenleme ve Yürütme Kurulu / *Executive Committee*

Hakan ERSOY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Mehmet EKMEKÇİ (Hacettepe Üniversitesi, MJD)
Fatma GÜLTEKİN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Aykut AKGÜN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Serhat DAĞ (Gümüşhane Üniversitesi)
Esra HATİPOĞLU TEMİZEL (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Ayhan KOÇBAY (DSİ Genel Müdürlüğü, MJD)
Ayberk KAYA (Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi)
Selçuk ALEMDAĞ (Gümüşhane Üniversitesi)
Cüneyt ŞEN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Sadettin KORKMAZ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Muhammet Oğuz SÜNNETCİ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Bilgehan KUL YAHŞİ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Murat KARAHAN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Şener CERYAN (Balıkesir Üniversitesi)
Semih PEKER (Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü)

Hakem Kurulu */ Scientific Committee*

AKAN, Berrin (MTA, Ankara)
AKDENİZ, Uğur (DSİ, Ankara)
AKMAN, Mustafa Kemal (Yüksel Proje, Ankara)
AKSOY, Hüsnü (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
AYDAN, Ömer (Tokai Üniversitesi, Japonya)
AYDIN, Harun (Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van)
BABA, Alper (İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir)
BİNAL, Adil (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
ÇAĞLAR, İlyas (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
ÇAN, Tolga (Çukurova Üniversitesi, Adana)
ÇELİK, Mehmet (Ankara Üniversitesi, Ankara)
DAVRAZ, Ayşen (Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta)
DİPOVA, Nihat (Akdeniz Üniversitesi, Antalya)
DOĞDU, Müfit Şefik (DSİ, Ankara)
DOĞDU, Nilgün (MTA, Ankara)
DUMAN, Tamer Yiğit (MTA, Ankara)
ERİK, Dursun (KGM, Ankara)
GÖKÇEOĞLU, Candan (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
GÜLER, Cüneyt (Mersin Üniversitesi, Mersin)
IŞIK, Nihat Sinan (Gazi Üniversitesi, Ankara)
KADIOĞLU, Selma (Ankara Üniversitesi, Ankara)
KARAGÜZEL, Remzi (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
KARAHANOĞLU, Nurkan (Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara)
KARAKAŞ, Ahmet (Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli)
KARAKUL, Hasan (MTA, Ankara)
KARAKUŞ, Hüseyin (Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya)
KILIÇ, Recep (Ankara Üniversitesi, Ankara)
KINCAL, Cem (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir)
KOCA, Yalçın (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir)
KUMSAR, Halil (Pamukkale Üniversitesi, Denizli)
KURTTAŞ, Türker (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
MAHMUTOĞLU, Yılmaz (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
NEFESLİOĞLU, Hakan (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
ÖZEL, Oğuz (İstanbul Üniversitesi, İstanbul)
SİYAHİ, Bilge (Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli)
SÖNMEZ, Harun (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
ŞİMŞEK, Şakir (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
TOPAL, Tamer (Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara)
TUĞRUL, Atiye (İstanbul Üniversitesi, İstanbul)
TUNCAY, Ergün (Hacettepe Üniversitesi, Ankara)
TÜRK, Necdet (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir)
TÜRKMEN, Sedat (Çukurova Üniversitesi, Adana)
ÜNDÜL, Ömer (İstanbul Üniversitesi, İstanbul)
YALÇIN, Tolga (İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul)
YAĞBASAN, Özlem (Gazi Üniversitesi, Ankara)
YAVUZ, Bahadır (Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir)
YILDIRIM, Mustafa (Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul)

İçindekiler / *Contents*

Çağrılı Konuşma

Mühendislik Projelerinin Çevresel Değerlendirmesinde Mühendislik Jeolojisinin Yeri / *Engineering Geology Aspects in Environmental Evaluation of Engineering Projects*
C. Zanbak……. 1

Yeraltı Kazılarında Mühendislik Jeolojisi

Tünellerdeki (Zigana ve Torul) Beton Kalitesinin ve Bozulmaların Yer Radarı Yöntemi ile Görüntülenmesi / *Imaging of the Deteriorations and Contrete Quality of the Tunnels (Zigana and Torul) with Ground Penetrating Radar*
I. Sarıçiçek, A. Şeren……... 3

Tünel Girişinde Zemin İyileştirmesi: Bağışlı Tüneli Örneği, Trabzon /*Soil Improvement in Tunnel Entrance: Example of Bağışlı Tunnel, Trabzon*
N. Kılıç, A. Sayın, O. Başer……. 10

Yamaç Tüneli Portal Tasarımı: Kürtün Tüneli Örneği, Gümüşhane / *Portal Design of Slope Tunnel: Example of Kürtün Tunnel, Gümüşhane*
N. Kılıç, A. Sayın, A. Şirin…….. 18

Yeni Zigana Tünel Güzergâhındaki Olası Fay ve Kırıkların Audio Manyetotellürik Yöntem (AMT) İle Araştırılması / *The investigation of Possible Faults and Cracks in New Zigana Tunnel Route with Audio Magnetotelluric Method (AMT)*
N. Demirbaş, A. Sayın, E. İçöz, E. G. Yurtkal…… 26

Sirkeci İstasyonu Pilot Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yüzey Deformasyonlarının Değerlendirilmesi / *Assessment of Surface Deformations Induced by the Pilot Tunnel of Sirkeci Station*
C. Topal, Y. Mahmutoğlu, G. Şans……. 34

Şemsiye Kemer Yönteminin Ramdane Tünelinde Uygulanması / *Implementation of the Umbrella Arch (Pipe Arch) Method in the Ramdane Tunnel*
N. U. Çelik, S. Türkmen…….. 49

Su Yapılarında Mühendislik Jeolojisi

Bağbaşı Barajı Mavi Tünelinde (Konya-Türkiye) Kullanılan Tünel Delme Makinesinin Performans Değerlendirmesi / *Assessment of The Performance of the Tunnel Boring Machine Employed in the Construction of the Mavi Tunnel (Konya, Turkey)*
A. Koçbay, Y. Şentürk, K. Karakuş……. 50

Bitlis Regülatörü ve HES Proje Alanının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi / *Engineering Geological Investigation of the Bitlis Regulator and HEPP Project Area*
A.E. Göksu, Y. Leventeli……. 58

Şev Duraylılığı ve Heyelanlar

Gündoğdu (Rize) Heyelanları ve Çevresel Etkileri / *Gündoğdu (Rize) Landslides and Their Environmental Effects*
S. Reis, A. Yalçın……. 66

İstanbul Heyelanlarından Seçilmiş Örnekler / *Selected Examples from Landslides in Istanbul*
E.Yüzer, S.Aydoğan…… 74

Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Potansiyel Heyelan Alanlarının Çağdaş Değerlendirme Yöntemleriyle İncelenmesi / *Application of Sophisticated Methods for the Potantial Landslide Areas in the Eastern Black Sea Coast*
F. Tarhan, F. Bulut, A. Akgün, H. Ersoy……. 82

Havuzlu Paleo-Heyelanının (Yusufeli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi / *Engineering Geological Assessment of the Havuzlu Paleo-Landslide (Yusufeli-Artvin)*
H. Ersoy, K. Gelişli, A. Bayraktar, H. H. Öztürk, A. C. Seçkin, G. Karaibrahimoğlu, G. Sağır, M. Özen, K. Tezel, B. Yüregir, B. Kul Yahşi…….. 90

Atakum (Samsun) İlçesinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi / *Production of Landslide Susceptibility Map of Atakum (Samsun) District*
H. Akıncı, C. Kılıçoğlu…… 98

Beylerli Göleti (Çardak-Denizli) Dolusavak Heyelanının Oluşum Mekanizması ve Nedenlerinin İncelenmesi / *Investigation of Reasons and Mechanisms of the Beylerli Dam (Çardak-Denizli) Spillway Landslide*
H. Kumsar, Ö. Aydan, R. Z. Acar, Ş. Tahracı, S. Subaşı, O. Genç……. 106

Açık Ocak İşletmesi Şeklinde Yürütülen Krom Madenciliği ve Kütle Hareketleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması: Musalı (Mersin) Örneği / *Investigation of Relationship Between Open Pit Chrome Mining Operations and Mass Movements: A Case Study From Musalı (Mersin)*
H. Tağa, C. Güler, H. Çakan…… 114

Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu (D400) Kaledran Mevkisinde (Km: 221+300–221+700) Meydana Gelen Kütle Hareketinin İncelenmesi / *Investigation of Mass Movement Occurred In Kaledran Site Along the Alanya-Anamur-Mersin State Road (D400) (Km: 221+300–221+700)*
K. Zorlu, H. Tağa, E. Yalçın, C. Güler, B. Hacak, E. Epsileli, M. Tepe……. 122

Ihlara Vadisi (Aksaray) Boyunca Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi / *Assessment of Rock Falls Along the Ihlara Valley (Aksaray)*
M. Taşpınar, A. Yalçın…… 130

Doğu Akdeniz Bölgesinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi / *Landslide Susceptibility Assessment of the Eastern Mediterranean Region Using Artificial Neural Network Method*
S. Tekin, T. Çan, T. Mazman, T. Y. Duman…….. 137

Trabzon-Uzungöl Beldesindeki Eski Heyelan Alanının Zemin Yapısının ve Dinamik Özelliklerinin Sığ Sismik Yöntemlerle Araştırılması / *Investigation of the Soil Structure and Dynamic Characteristics of the Old Landslide in the Trabzon-Uzungöl District by Shallow Seismic Method*
G. Vanlı Şenkaya, H. Karslı, M. Şenkaya, R. Güney…….. 145

Bölgesel Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi: Kuzey Türkiye / *Small Scale Landslide Susceptibility Assessment: Northern Turkey*
T. Çan, T. Y. Duman……... 153

Cankurtaran Tüneli'nin Çıkış Bölümündeki Portal ve Yol Yarma Şevinin Duraylılık Analizleri / *Stability Analyses of the Portal and Cut Slopes on the Exit Section of the Cankurtaran Tunnel*
A. Kaya, F. Bulut……. 161

Gebze-İzmir Otoyol Projesi Bursa-Susurluk Kesimindeki Yumuşak Killerin Prefabrik Düşey Dren Kullanılarak İyileştirilmesi / *Improvement of Soft Clays in Bursa-Susurluk Section of the Gebze-İzmir Highway Project Using Prefabricated Vertical Drains*
G. Çelik, M. Köse, A. Akbulut…… 169

Eğirdir İlçesi(Isparta) Kaya Hareketleri ve Koruma Önlemleri / *Rock Movements in Eğirdir (Isparta) Town and Protection Measures*
M. Mutlutürk, A. Yalçın…….. 177

Çoruh Nehri Üzerindeki Baraj Projelerine Heyelanların Etkisi / *Dam Projects Affected by the Landslides on the Çoruh River*
A. Ertunç, H. Çetin…….. 185

Jeofizik Yöntemlerle Heyelan İncelemeleri / *Geophysical Methods for the Investigation of Landslides*
K. Gelişli…….. 192

Depremlerle İlgili Zemin Davranışları

Bayraklı-İzmir Yöresindeki Zeminlerin Statik ve Dinamik Koşullar Altında Gerilme-Deformasyon Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi / *Investigation of Stress-Deformation Behaviour of the Soils in Bayraklı-İzmir Under Static and Dynamic Conditions Using Finite Element Method*
A.T. Arslan, M. Akgün, M. Y. Koca, C. Atalar, Ö. C. Özdağ…… 200

Erciş (Van) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi / *Evaluation of the Liquefaction Potential of Soils at Erciş (Van) Settlement*
M. Akın, M. K. Akın, İ. Akkaya, A. Özvan, A. Şengül…….. 208

Sismik Şev Deformasyonlarının İncelenmesi: Karamürsel (Kocaeli) Örneği / *Investigation of Seismic Slope Deformations: An Example from Karamürsel (Kocaeli)*
N. Barkın, K. Ulamış, R. Kılıç……. 216

Kaya ve Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri ve Kaya Kütlesi Karakterizasyonu

Kayaçların Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması: Doğu Pontidler Bazaltları Üzerine Örnek Bir Çalışma / *The Investigation of Geotechnical Properties of Rocks: A Case Study on the Basalts of the Eastern Pontides*
A.E. Babacan, K. Gelişli, H. Ersoy…….. 224

Isparta Yerleşimindeki Zayıf Bağlara Sahip Volkanik Zeminde Örnekleme Güçlükleri ve Dayanımın Pratik Yaklaşımlarla Tahmini / *Difficulties of Sampling from a Weakly Bonded Volcanic Soil in Isparta Settlement and Estimation of its Strength Using Practical Approaches*
E. Avşar, R. Ulusay, Ö. Aydan, M. Mutlutürk…… 230

Kaya Malzemelerinin Dolaylı (Brezilya) Çekilme Dayanımı Deneyinde Farklı Yükleme Düzeneklerinin Kullanımı / *The Use of Various Loading Apparatus in Indirect (Brazilian) Tensile Strength Test of Rock Materials*
E. Kömürlü, A. Kesimal, F.S. Ozkan…….. 238

Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyinde Örneğin Boy/Çap Oranının Belirlenmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım / *A New Approach for Determination of Length to Diameter Ratio of Specimen Used for Uniaxial Compressive Strength Test*
E. Tuncay, N. Tunar Özcan, A. Kalender…… 246

Granitlerde Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Mineral ve Dokusal Özelliklerle İlişkisi / *The Relationship Between the Uniaxial Compressive Strength and Mineral and Textural Properties of Granites*
S. Acar, H. Ersoy……. 254

Doğrudan Makaslama Deneyinde Makaslama Hızının Kumların Makaslama Dayanımı Parametrelerine Olan Etkisinin İncelenmesi / *Investigation of the Shear Rate Effect on the Shear Strength Parameters of Sands ın Direct Shear Test*
M. Beren, İ. Çobanoğlu, S. B. Çelik…… 262

Zeminlerin Hacimsel Büzülme Limitinin Belirlenmesinde Uygulanan Standart Yöntemlerin Karşılaştırılması / *Comparison of the Standard Methods Used in Determination of Volumetric Shrinkage Limit of Soils*
T. K. Yavuz, M. Özer…….. 270

Jeogrid Donatılı Zeminlerde Taşıma Gücü Yöntemlerinin Gerçek ve Kurgusal Vakalar Üzerinde Karşılaştırılması / *Comparison of Bearing Capacity Calculation Methods in Geogrid Reinforced Soils on Real and Hypothetical Cases*
N. Sungur, N. S. Işık…… 278

Kayalarda Gözeneklilikle Dayanım Özellikleri Arasında Görgül İlişkilerin Araştırılması / *The Investigation of Empirical Relations Between the Porosity and Strength Properties in Rocks*
S. Dağ, S. Alemdağ, F. Alkan…….. 286

Kaya Kütlelerinin Dayanım Özelliklerinin Tahmininde Kullanılan Görgül İlişkilerin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma / *A Study on the Comparison of the Empirical Relationships Used in the Assessment of Rock Mass Strength Properties*
S. Berber, N. Ceryan, G. Esin, Ş. Ceryan…… 294

Gümüştaş Atık Baraj Yerindeki (KD Türkiye) Kaya Kütlelerinin Geçirimliliklerinin ve Taşıma Gücünün Değerlendirilmesi / *Assessment of Permeability and Bearing Capacity of the Rock Masses at the Gümüştaş Waste Dam Site, NE Turkey*
S. Alemdağ……... 302

Doğal Yapı Malzemeleri ve Tarihi Yapılarda Mühendislik Jeolojisi

Garipçe Piroksenli Andezitinin Malzeme Özellikleri ve Doğal Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği / *Investigation on Material Properties and Usability of Garipçe Pyroxene Andesiteas a Natural Building Stone*
B. Akgür, Y. Mahmutoğlu……... 311

İzmir Karaburun Yarımadası'ndaki Mesozoyik Karbonat Kayalarının Beton Agregası ve Yapı Taşı Özelliklerinin Araştırılması / *Investigation of the Concrete Aggregates and Dimension Stone Properties of the Mesozoic Carbonate Rocks in the İzmir Karaburun Peninsula*
H. Elçi, N. Türk, İ. İşintek……... 319

Elastik Dalga Hızı Kullanılarak Kaya Kararlılığının Değerlendirilmesi / *Assessment of Durability of Rock Using Elastic Wave Velocity*
Ş. Ceryan, Z. H. Çebi Usturbelli…….. 327

Traverten Ocak Artıklarının Alternatif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması / *Investigation of the Usability of Travertine Quarry Wastes as Alternative Concrete Aggregate*
S.B. Çelik, İ. Çobanoğlu, O. Çam, H. Etiz, M. Kurşun……... 335

Atık Cam ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Betonlarda Alkali-Silika Reaksiyonu / *Alkali–silica Reactions of Concrete Produced by Using Waste Waste Glass and Blast Furnace Slag*
C. Kılıçoğlu, S. Çoruh……. 343

Sondaj ve Kimyasal Analiz Verileri Kullanılarak Bir Kireçtaşı Ocağının 3-Boyutlu Cevher Modellemesi / *3D Orebody Modeling of a Limestone Quarry Using Borehole and Chemical Analysis Data*
Ş. Aliyazıcıoğlu, K. Karaman, F. Cihangir, B. Erçıkdı, A. Kesimal……... 351

Meteorolojik Koşulların Tarihi Yapılarda ve Anıtlarda Etkileri: Fatih Semti Örneği / *Effects of Meteorological Conditions on Historical Buildings and Monuments: Case Study of Fatih District*
S. Er, M. Yılmaz, S. Angı, S. Erişiş, C. Alptekin, A. Tuğrul…….. 357

Mekansal Planlamada Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik

İzmit Körfez Geçişi İçin Jeolojik, Jeoteknik ve Jeofizik Araştırmalar ve Sonuçların Değerlendirilmesi / *Geological, Geotechnical and Geophysical Investigations for the İzmit Bay Crossing and Evaluation of Their Results*
O. Şimşek, İ. Kartal, A. O. Baki, A. N.Öztürk…… 365

Köprü Projelerinde Jeolojik Modellemenin Önemi / *The Importance of Geological Modeling on Bridge Projects*
S. Al, S. Acar, E. Akdaş, Ö. Baki……... 373

Beton Kaplamalı Almata/Kazakistan Otoyolundaki Hidrojeolojik ve Jeoteknik Koşulların Değerlendirilmesi ve Oturma Sorunlarının Çözümü / *Evaluation of the Hydrogeological and Geotechnical Conditions to Solve the Settlement Problems at the Concrete Highway Almaty/Kazakistan*
M. Vardar……. 381

Bir Spor Tesisinin İnşaat Alanının Farklı Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi / *Investigation of Construction Site of a Sport Facility by Different Geophysical Methods*
M. Kirici, H. Karslı, R. Güney, Ç. C. Yılmaz……. 389

Mühendislik Uygulamalarında Hidrojeoloji

Ankara-Çankırı-Çorum Bölgesinde Yeraltı Barajları Konusunda Güncel Gelişmeler / *Recent Developments on Groundwater Dams in the Ankara-Çankırı-Çorum Region*
A. Apaydın, S. Demirci Aktaş, S. Kaya…….. 397

Ankara İçmesuyu 2. Merhale Projesi Gerede Sistemi Boya İzleme Deneyi / *Dye Tracer Test for Ankara Drinking Water 2nd Part Project Gerede System*
U. Akdeniz, L. G. Köksal, M. Ş. Doğdu…….. 405

Akköprü Barajı Göl Alanında İnşa Edilen Geçirimsizlik Yapılarının Sızdırmazlığının Test Edilmesi / *Testing of Water Tightness of Impervious Structures Constructed at Akköprü Dam Reservoir*
U. Akdeniz, M.Ş. Doğdu, L.G. Köksal, N. Pelen, N.K. Güner……... 412

Vezirköprü Barajında (Samsun) Su Kaçağının Tespiti ve İyileştirme Çalışmaları / *Determination of Water Leakages and Improvement Works at Vezirköprü Dam (Samsun)*
M. Çalışkan, A. Koçbay, Y. Şentürk, O. Karadağ……... 420

Pınarbaşı Karst Kaynağı ve Çevresinin (Honaz-Denizli) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi / *Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigation of Pınarbaşı Karst Spring and its Surrounding (Honaz-Denizli)*
A. Gökgöz, Ö. Demirel, İ. Asal……... 428

Baraj Yeri Seçiminde Komşu Vadiler Arasındaki Hidrolik İlişkinin ve Jeolojik Yapıların Etkisinin İrdelenmesi / *Investigation of the Effects of Hydraulic Connection Between Neighboring Valleys and Geologic Structure on Dam Site Selection*
R. Karagüzel, H. T. Yalçın, C. Yaltırak……... 436

Kahramanmaraş Orçan Bölgesi İçme Sularının Temel Kalite Özellikleri ve Çevresel İzotop İçerikleri/ *Basic Water Quality Properties and Environmental Isotope Content of Drinking Water In Kahramanmaraş Orçan*
Y. Uras,M. Ünsal, A. Kop, S. Nacar, A. E. Yağcı……... 444

Artvin Barajı ve HES Projesi: Enjeksiyon Çalışmaları / *Grouting Works in Project of Artvin Dam and HEPP*
S. Altuğ, C. Tezel, F. Demirkazık……... 452

Doğu Karadeniz Bölümü Suları Çevresel Duraylı İzotop İçeriğinin Değerlendirilmesi / *Evaluation of Environmental Stable Isotope Content of Eastern Black Sea Region*
M. Ekmekçi, F. Gültekin……. 459

Kazı Alanlarında Yeraltısuyuna İlişkin Sorunların Çözümünde Hidrojeolojik Kavramsallaştırma ve Karakterizasyonunun Önemi: Türkiye'den Örnekler / *Role of Hydrogeological Conceptualization and Characterization in Solving Groundwater Problems in Excavations: Case Studies From Turkey*
M. Ekmekçi…….. 467

Jeotermal Enerji

Savcılı-Büyükoba (Kırşehir-Kaman) Sıcak ve Mineralli Su Kaynağının Hidrojeokimyasal İncelemesi / *Hydrogeochemical Investigation of Thermal and Mineral Water of Savcılı-Büyükoba (Kırşehir-Kaman)*
C. Yurteri, Ş. Şimşek……... 475

Ilıca (Erzurum) Sıcak Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri / *Hydrogeochemical Properties of Ilıca (Erzurum) Hot Water Springs*
A. Fırat Ersoy, F. Gültekin, E. Hatipoğlu Temizel…….. 482

Jeotermal Rezervuar Simülasyonu Kalibrasyonunun Önemi ve Gerekli Ölçümler */ Importance of Geothermal Reservoir Simulation Calibration and Required Measurement*
E. Y. Turalı…….. 490

Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sisteminin Akım Modelinin Oluşturulması / *Flow Modelling of Pasinler (Erzurum) Geothermal System*
E. Hatipoğlu Temizel, F. Gültekin, A. Fırat Ersoy…….. 497

Kızıldere (Denizli) Jeotermal Alanındaki Kabuklaşma Probleminin Hidrojeolojik ve Jeokimyasal İncelenmesi / *Hydrogeological and Geochemical Study of the Scaling Problem in Kızıldere Geothermal Field, Denizli*
G. Tarcan, T. Özen, Ü. Gemici, M. Çolak, İ. H. Karamanderesi…… 505

Saraykent (Yozgat) Jeotermal Sularının Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi / *Hydrogeochemical Assessment of Saraykent (Yozgat) Geothermal Waters*
S. Özulukale, Ş. Şimşek…….. 513

Adana Ceyhan Civarındaki Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Alanların İncelenmesi / *Investigation of Low-Temperatured Geothermal Fields Nearby Adana Ceyhan*
Ü. Turalı, A. Yolal, L. Taşkıran……... 521

Bitirme Projesi Özleri

Kızılay-Çayyolu Metrosu Çayyolu Tren Deposu Sahasında Açılacak Kazı Şevlerinin Duraylılığının Araştırılması
M. G. Gümrük, E. Altundepe, M. Şahin, Y. Sağlam……... 529

Beyleri Göleti (Bozkurt-Denizli) Dolusavak Heyelan Alanının Şev Düzenlemesi ile Duraylılığın Arttırılması
E. Günay, M. Tufan, M. Gül, B. Soyer, F. Çavuş……... 530

Bağlıca Mahallesinde (Etimesgut-Ankara) Yüzeylenen Alüvyonun Taşıma Gücünün ve Temel Kazılarının Duraylılığının Araştırılması
Ş. B. Öztürk, R. Yazıcı, M. Büyükkoç, D. Ertuğrul…… 531

Etimesgut-Bağlıca (Ankara) Yolunun Bağlıca Kesimindeki Yarma Şevlerinin Duraylılıklarının Değerlendirilmesi
G. Köser, M. B. Şerafettinoğlu, M. Sağdıç, S. Işıdı…… 532

Uçucu Küllerden Soğuk Bağlama (Peletleme) Yöntemiyle Hafif-İri Agrega Üretimi
K. Zorlu, O. Z. Bilgi, Y. S. Erzeybek…….. 533

Gümüşhane ili Merkez Hasanbey Mahallesi'nde Yüzeyleyen İri Taneli Zeminlerin Taşıma Gücünün Belirlenmesi
Z. Soysal, S. Ay, S. Ünver……... 534

Yaylapınar (Bayburt) Travertenlerinin Jeolojik ve Jeomekanik Özelliklerinin Araştırılması
O. Çakıroğlu……. 535

Akhisar Deresi (Beşikdüzü- Trabzon) Alüyonlarının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Özelliklerinin Araştırılması
O. Rüzgar……..... 536

Yazar İndeksi / Author Index……. 537

Çağrılı Konuşma

Mühendislik Projelerinin Çevresel Değerlendirmesinde Mühendislik Jeolojisinin Yeri

Engineering Geology Aspects in Environmental Evaluation of Engineering Projects

C. Zanbak[1,*]

[1] *Türkiye Madenciler Derneği, Çevre Koordinatörü, Türkiye Kimya Sanayicileri Derneği, Çevre Danışmanı, Değirmen Sok. No: 19/9, Kozyatağı, 34742 İstanbul*
*(*caner.zanbak@tksd.org.tr)*

ÖZ: Tüm mühendislik uygulamalarının temeli; "fiziki olaylarla ilgili konuları, mantıklı ve deney, gözlem ve de ölçerek kanıtlama üzerine kurulu güvenilebilir şekilde açıklayabilen bilgi hazneleri" olan fizik, kimya ve matematik olarak tanımlanan "Temel Bilimler" ve de biyoloji ve yerbilimleri olarak gruplanabilecek "Doğal Bilimler" üzerine kuruludur.

Mühendislik projelerinde genel yaklaşım, toplumların kalkınmaya yönelik çabalarında ihtiyaç duyulan altyapı, üretim ve servis hizmetlerinin sağlanması için gerekli araç/gereç ve yapıların tasarım, inşa ve işletme süreçleri için güvenli ve ekonomik uygulamalar geliştirmektir. Mühendislik projelerinin tümünün doğadan alınması gerekli hammadde ve enerji kaynaklarına dayalı olmaları nedeniyle, projelerde kullanılan "güvenlilik", "ekonomiklik" tasarım kriterlerinin yanı sıra, "çevre dostu olma" kriteri de mühendislik ilkeleri içinde yer almaktadır.

Yerkürenin herhangi bir öğesi ile temas eden tüm mühendislik projelerinde jeoloji biliminin katkısı bulunmaktadır. Su temini, jeotermal enerji, petrol/doğalgaz, madencilik faaliyetleri gibi doğal kaynaklardan yararlanma, yerüstü ve yeraltı mühendislik yapılarının tasarım projelerinde temel bilimler üzerine kurulu statik/dinamik, hidrolik ve malzeme mekaniği gibi uygulamalı bilim kuramlarında, kullanılan veya içinde çalışılan doğal malzeme özelliklerindeki belirsizlikleri ve deprem/sel gibi diğer doğal etki olasılıklarını da göz önüne alan "güvenlik faktörü" kullanılmaktadır. Projelerin ekonomik boyutlarını doğrudan etkileyen güvenlik faktörlerinin optimizasyonu, proje yapılarının içinde bulunduğu jeolojik ortam(lar)ın mühendislik jeolojisi özelliklerinin iyi tanımlanmasına bağlıdır. Bu bağlamda, yer seçiminden hidrolojik/hidrojeolojik/jeoteknik araştırmalar ve malzeme temini konuları da dahil olmak üzere, projelerin tasarımı ve sonrası süreçlerde mühendislik jeolojisi katkılarına gereksinim bulunmaktadır.

Mühendislik projelerinde, uzun süreçte kazanılmış tecrübeler üzerine kurulu teknik standartların yanı sıra, iş güvenliği ve diğer kamusal hakların korunmasına yönelik yasal düzenlemeler de zorunlu tasarım kriterleri olarak kullanılmakta ve bu kriterler, özellikle projelerin çevresel ve iş güvenliği konularındaki hukuki sorumlulukların temelini oluşturmaktadır. Teknik standartlar konularında, uluslararası düzeyde kabul gören, ASTM, DIN, CEN standartları gibi ortak yönergeler hazırlanabilmektedir. Ancak, hukuk düzeni farklılıklarından dolayı, çevresel konularda standartlara benzer düzeyde ortaklık gösteren yönetmelik türü yasal düzenlemeler hazırlanamamaktadır. Gelişmiş ülkelerde, teknik konulara yönelik yönetmeliklerde mevcut teknik standartlara atıf yapılıp uygulamanın amacının esaslarına uygun, risk analizine dayalı, bilimsel çözümler istenirken, gelişmekte olan ülkelerin benzer yönetmeliklerinde "bilimsel bulgu esnekliğine olanak sağlamayan" kısıtlayıcı kriterler yer alabilmektedir. Yasal düzenleme ile getirilen bu tür kısıtlama kriterleri, mühendislik projelerinin tasarımında yenilikçi çözümlerin önünü kesebilir, projelerin yapılabilirliğini olumsuz etkileyecek nitelikte olabilmektedir.

Bu sunumda, atık yönetimi, su ve toprak kirliliğinin kontrolüne yönelik çevre mevzuatımızda yeterince yer almayan mühendislik jeolojisi konuları irdelenecek ve madencilik atıklarının yönetimi projelerinin tasarımı ve büyük bir deprem sonrasında toprağa dökülmüş kimyasallarla ilgili bir çevresel inceleme ve temizleme uygulamasında mühendislik jeolojisi bilgilerinin önemi örneklerle irdelenecektir.

ABSTRACT: *Engineering practices are based on fundamental principles of physics, chemistry and mathematics (Basic Sciences) and biology and earth sciences (Natural Sciences) which are the wealth of information that can explain the physical occurrences in logical and reliable means and ways deduced from verifiable/repeatable experiments, observations and measurements.*

In general, objectives of engineering projects are to develop safe and economical applications by means of design, construction/manufacturing and operation of equipment/products and structures to provide infrastructure, production and services towards sustainable development efforts of the communities. In recognition that all of the engineering projects rely on utilization of raw materials and energy derived from the natural resources, "environment-friendliness" is also an important design criterion along with safety/reliability and economics.

Geology is involved in all engineering projects to the extent they are involved with natural materials on earth. In addition to applied science principles based on basic sciences, a "factor of safety" concept is used as design criteria for surface and subsurface structure projects to accommodate uncertainties inherent in natural materials and potential extra loads due to natural phenomena like earthquakes, floods, etc. Optimization of safety factors, which tend to directly affect the economics of the projects depend heavily on good understanding of engineering geology features of the geological media hosting the projects. In this context, it is quite apparent that engineering geology plays a major role in design and post-design stages of engineering project related investigations ranging from land use planning, site selection to hydrological, hydrogeological, and geotechnical and borrow material supply matters.

Regulatory requirements to assure workplace safety and protect communal rights are also mandatory design criteria along with the technical specialty standards developed based on long-term practical experience gained in the field. These criteria establish the foundations of environmental and safety liabilities for the project owners. Regarding the engineering standards, international-level commonly accepted procedures, like ASTM, DIN, CEN, etc. standards, that receive wide acceptance are commonly used; however, similar concurrence in environmental regulations at global level cannot be achieved due to distinct differences in legal systems and political climates in different countries. Regulations on technical topics in developed countries refer to technical standards and allow use of risk-based scientific approaches to fulfill the requirements of the applicable legislations. However, similar regulations in the developing countries tend to impose strict limiting design criteria that leave no room for use of site-specific alternative design criteria that may be developed based on scientific engineering wisdom. Imposition of such regulatory limitations/restrictions tends to discourage innovative site-specific solutions that would negatively affect the feasibilities of engineering projects.
In this presentation, shortfalls of deficient regard to engineering geology in the current waste management, water and soil pollution protection regulations will be reviewed and role of engineering geology inputs in design of mining waste facilities and remedial investigation/effective clean-up of a site which experienced a major chemical spill after a major earthquake in Turkey will be discussed.

Yeraltı Kazılarında Mühendislik Jeolojisi

Tünellerdeki (Zigana ve Torul) Beton Kalitesinin ve Bozulmaların Yer Radarı Yöntemi ile Görüntülenmesi

Imaging of the Deteriorations and Contrete Quality of the Tunnels (Zigana and Torul) with Ground Penetrating Radar

I. Sarıçiçek[1,*], A. Şeren[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniv. Jeofizik Müh. 61080, Trabzon, Türkiye*
*(*isil.mataraci61@windowslive.com)*

ÖZ: Yüksek çözünürlüklü görüntü veren ve araştırılan yüzeye herhangi bir hasar vermeyen Yer Radarı (GPR) yöntemi, yakın yüzey sığ araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada; su sızdırma riskli alanların varlığını ve yapı içeriğini Yer Radarı yöntemi ile araştırmak için, Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan Zigana tünel duvarlarının kırık-çatlak varlığı, stratigrafi ve bozulmaların ve ayrıca Zigana tüneline ek olarak yeni inşa edilen Torul tünelinin beton yapısının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar sırasında, 500 ve 800 MHz'lik korumalı antenler kullanılarak, tünel giriş kısımlarının her iki duvarı boyunca 15 profilde veri toplanmıştır. Toplanan verilere gerekli veri işlem adımları uygulandıktan sonra araştırılan ortamların iki boyutlu (2B) profil kesitleri (radargramlar) ve üç boyutlu (3B) derinlik düzlemleri elde edilmiştir. Değerlendirmeler sonucu tünel duvarlarının 1.5 m'lik içi yapısındaki kırık-çatlak durumu, bozulmalar ve su sızdırma riskli alanlar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yer Radarı Yöntemi, Zigana ve Torul Tünelleri, Beton Kalitesi

ABSTRACT: *Ground Penetrating Radar (GPR) that gives high resolution image and doesn't damage to investigated surface, holds an important place at near surface shallow researches. In this study; it is aim to investigate the fracture-crack system, the stratigraphy and the deterioration of the walls of Zigana tunnel which is located at the way Trabzon-Gümüşhane in order to research the existence of risk area leaking water out and structure contents and furthermore, in addition Zigana tunnel, the concrete quality of the Torul tunnel which has built recently. During examinations, GPR data were collected along totally 15 profiles at the entrance of the both sides of tunnels by using 500 and 800 MHz shielded antennas. After applying data processing stage to the collected data, 2D radargrams and 3D images of investigated area were acquired. At evaluation result, fracture-crack condition, deterioration and leaking water areas at the 1.5m internal structure of tunnel walls from these images have identified.*

Keywords: *Ground Penetrating Radar, Zigana and Torul Tunnels, Concrete Quality*

1. GİRİŞ

1863'lü yıllarda yapılmaya başlayan tüneller; karayolları, su kanalları ve demir yollarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Karayolu, metro gibi ulaşım hatlarında topoğrafik yapının düzgün olmadığı yerlerde ulaşım genellikle tüneller aracılığıyla sağlanmaktadır. Ülkemizde Doğu Karadeniz Bölgesi dağlık bir topoğrafyaya sahip olduğundan yol yapımında tünellere sıklıkla rastlanmaktadır. Tünellerde zamana bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Karayollarında ulaşımı kolaylaştıran tünellerde görülen bozuklukları incelerken tünelin bulunduğu hattın jeolojik yapısı, tünel yapımı sırasında kullanılan betonun kalitesi, betonda bulunan kırıklı-çatlaklı yapılar, beton içerisinde su sızıntısı sebebiyle oluşmuş boşluklar dikkat edilmesi gereken önemli unsurlardır. Ayrıca tünellerde genelde yaşlanma, donma-çözülme, karbonatlaşma ve kusurlu inşaat gibi birçok etken yıkıcı hasarlara neden olmaktadır(Locatelli vd.,2001; Carderelli vd.,2003; Xie., 2004).

Tünellerde meydana gelen problemleri incelemek için sığ zemin koşullarını yüksek çözünürlülükte görüntüleyebilen tahribatsız Yer Radarı (GPR) yöntemi, tünel birimlerinin ve kalitesinin kontrol edilmesinde kullanılan başarılı bir yöntemdir (Sezer, 2010). Bu yöntem, tünel iyileştirme çalışmalarında, hasarların belirlenmesine ve çözümüne yönelik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; dağlık bir topoğrafyaya sahip olan Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki Trabzon-Gümüşhane karayolunda ulaşımı sağlayan Zigana ve Torul tünellerinin duvar beton kalitesi, kırık-çatlak durumu, su sızdırma riskli alanları Yer Radarı yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca yeni kullanıma açılmış olan Torul tünelinin duvar beton yapısının aynı yöntemle incelenmesi de amaçlanmıştır. İncelemeler sırasında, Mala GPR ProEx sistem ile 500 ve 800 MHz'lik korumalı antenler kullanılarak, tünel giriş kısımlarının her iki duvarı boyunca 15 profilde veri toplanmıştır. Toplanan verilere gerekli temel veri işlem adımları uygulandıktan sonra elde edilen işlenmiş iki-boyutlu (2B) radargramlar ve bunların ard arda sıralanmasıyla elde edilen 3B derinlik düzlemleri elde edilmiştir. Bu görüntülerden incelenen tünellerin duvar iç yapısı 1.5 m'ye kadar görüntülenmiştir. Bu görüntülerde gözlenen yüksek genlikli yansımaların beton içerisindeki farklılıklara (beton bağlantı yerleri, kırık-çatlak, bozulma, su sızıntısı olan alanlar vb) karşılık geldiği şeklinde yorumlanmıştır.

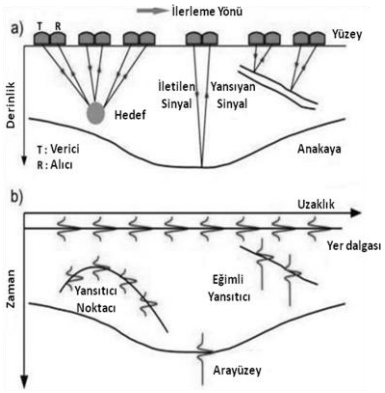
2. AMAÇ VE KAPSAM

Su sızdırma riskli alanların varlığı ve yapı durumunu değerlendirmek için, Trabzon - Gümüşhane karayolu üzerinde Trabzon'dan 58 km mesafedeki Zigana tünel duvarlarının kırık-çatlak durumu, stratigrafi ve bozulmaların ve ayrıca yeni inşa edilen Torul tünelinin beton kalitesinin Yer Radarı yöntemi ile görüntülenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

Zigana ve Torul tünelinin her iki girişinden alınan ölçümlerde 500 ve 800 MHz korumalı antenler kullanılarak, 30 cm profil aralıkları ile 15 profilde farklı uzaklıklarda yer radarı verileri toplanmıştır. Bu veriler ReflexW programı ile değerlendirilmiş olup Easy3D programı ile üç boyutlu görüntüler elde edilmiştir.

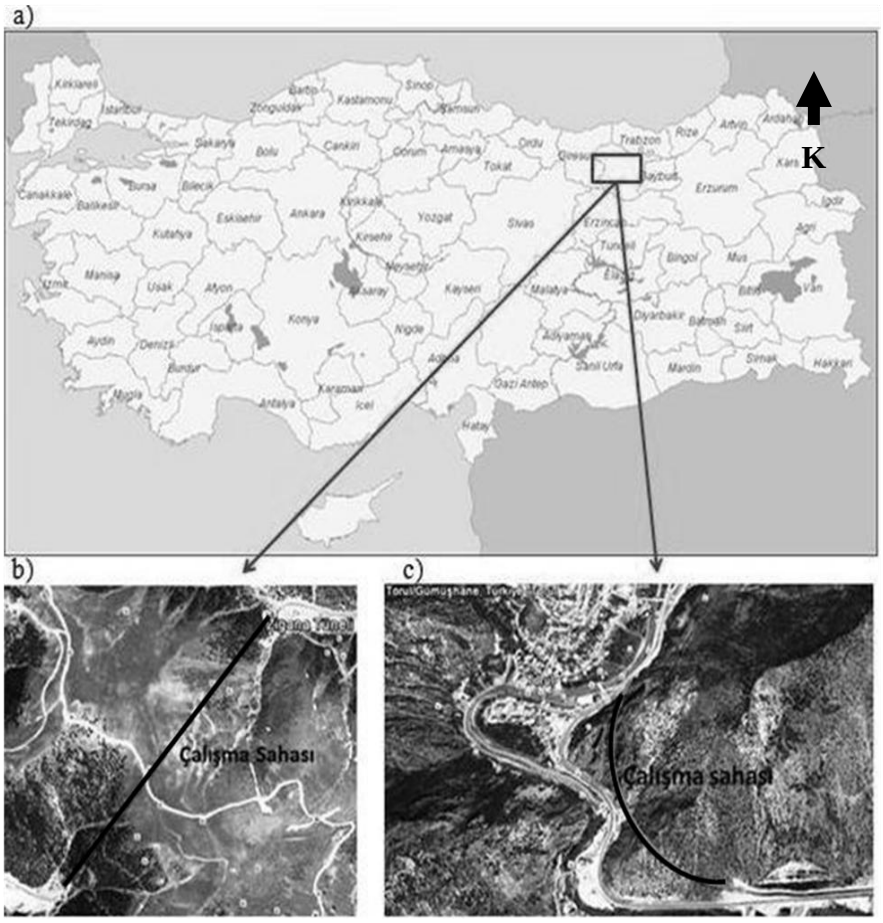
3. MALZEME VE YÖNTEM

Yer Radarı (GPR), araştırılan yüzeyin sığ derinliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleyen elektromanyetik bir jeofizik yöntemdir. Bu yöntemde, bir kaynak tarafından araştırılan ortama gönderilen ve zaman içinde değişen yüksek frekanslı elektromanyetik alanlar kullanılarak incelemeler yapılmaktadır (Şekil 1). Değişken zamanlı elektromanyetik alanlar, elektrik ve manyetik alanların bileşiminden oluşmaktadır. Bu iki alan, yeraltında bulunan malzemelerin etkisi altında değişmekte ve yeraltındaki yapıların elektriksel özelliklerinin değişiminin gözlenmesine izin vermektedir (Daniels,1996; Annan, 2003).

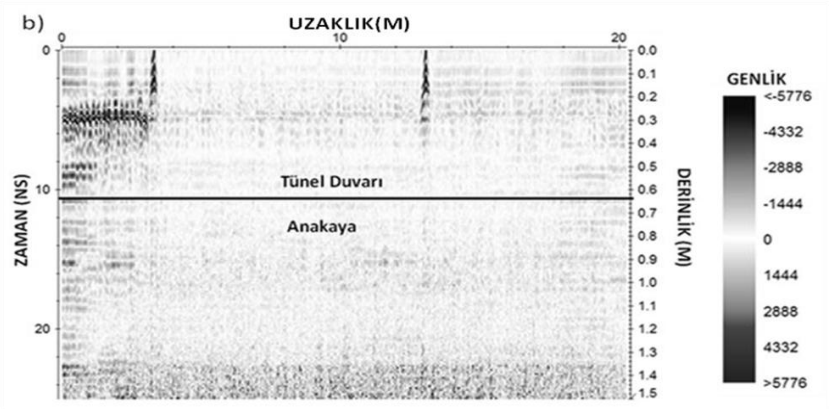


Şekil 1. (a)Yer radarı yönteminin genel çalışma sistemi, (b) radargram (Grégoire vd., 2003).

Çalışma sahası Türkiye'nin kuzeydoğusunda yer alan (Şekil 2a) Zigana Dağı'nı karayolu ile geçmek için 1977 yılında trafiğe açılmış olan Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerindeki Zigana tünelidir (Şekil 2 b). Diğeri çalışma sahası ise, Torul tünelidir (Şekil 2 c).



Şekil 2. (a) Çalışma alanının yer bulduru haritası, (b) Zigana tünelinin yeri, (c) Torul tünelinin yeri



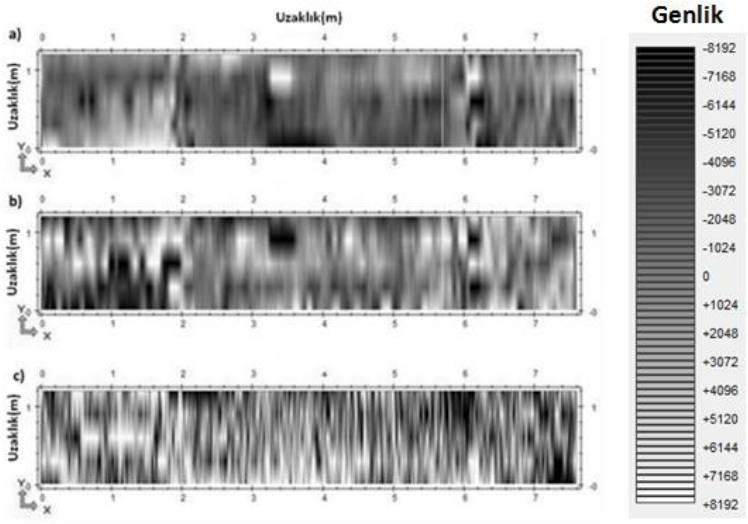
Şekil 3. 800 MHz antenle (a) Zigana ve (b) Torul tünellerinin duvarlarından toplanan verilerin ilk 1.5 m derinliğe ait detaylandırılmış görünümleri

Zigana tünelindeki en önemli sorun olan kırık-çatlak durumunu değerlendirmek amacıyla veri alınmıştır. Torul tünelinde ise, beton yapısı değerlendirilmiştir. Zigana tünelinin duvarından 1.5 m derinliğe kadar olan kısmın radargram üzerindeki görünümünden beton yapısının oldukça bozuk ve sıklıkla kırık-çatlaklar içerdiği gözlenmektedir (Şekil 3a). Yeni kullanıma açılmış olan Torul tünelinin duvarından 800 MHz antenle elde edilmiş radar kesitinde ise, beton bağlantı noktaları ve donatıların dışında yüksek genlikli bozucu yansımaların olmayışı betonun sağlam olduğunu göstermektedir (Şekil 3b). Ayrıca her iki kesitte tünel duvarı ile oyuldukları ana kaya sınırları belirgin bir şekilde ayırt edilmektedir (Şekil 3). Zigana tüneli Gümüşhane girişinde su sızıntıları ve kırıklı-çatlaklı yapının genel bir görünümü Şekil 4'te görülmektedir.

Şekil 4. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde su sızıntıları ve kırıklı-çatlaklı yapının genel görünümü

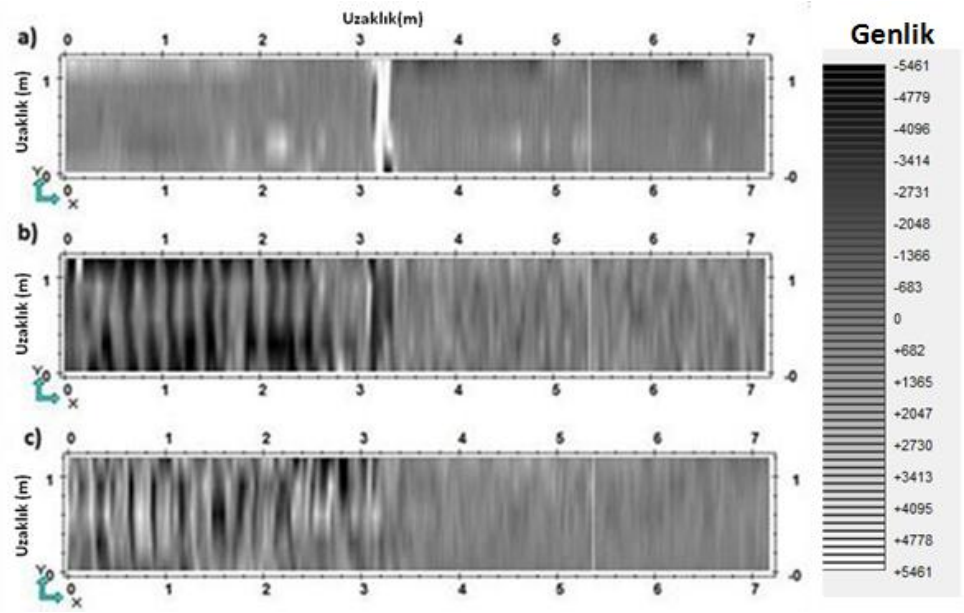
Çalışma alanlarında birbirine paralel yönlerde seçilmiş profillerde toplanan yer radarı verilerinde gözlenen anomalilerin yanal ve düşey yöndeki değişimlerinin izlenebilmesi için 3B'lu görüntüler ve genlik-dilim haritaları; Easy3D (Mala GeoScience) (URL-1) programı ile oluşturulmuştur.

İncelenen tünellerin yan duvarlarında seçilen 3 farklı alanda toplam 15 profilde ölçümler alınmıştır (Şekil 4 ve 8) ve her bir alanda 5 tane paralel profil seçilerek aralıkları 30 cm olacak şekilde GPR verileri toplanmıştır.



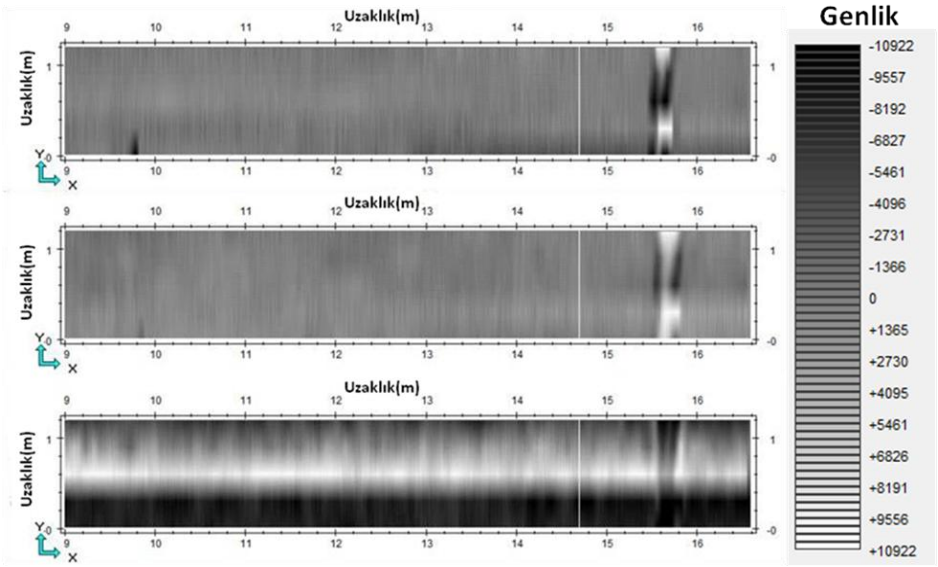
Şekil 5. Zigana tüneli Gümüşhane girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.6 m'deki (a) 0.4, (b) 0.8 ve (c) 1.2 m'lerdeki GPR derinlik düzlemleri ve genlik değişimi

Zigana tüneli Gümüşhane girişinden 500 MHz ile elde edilen genlik-dilim haritaları incelendiğinde iki önemli kırık, Şekil 5a'da 0.4 m derinliğinde yaklaşık 2 m ve 6 m'de görülmektedir. Şekildeki diğer genlik-dilim haritaları birçok kırık ve bozulmuş kısımları içermektedir.



Şekil 6. Torul tüneli Gümüşhane girişinde 800 MHz ile alınan GPR verilerinin 0-7.1m'deki (a) 0.2, (b) 0.4 ve (c) 0.6 m' lerdeki GPR derinlik düzlemleri ve genlik değişimi

Torul tüneli Gümüşhane girişinden 800 MHz ile elde edilen genlik-dilim haritasında yaklaşık 3.2 m uzaklığındaki bağlantı noktası, farklı derinliklere ait genlik-dilim haritalarında yüksek genlikli yansıma vermiştir (Şekil 6) ve ayrıca birbirine bitişik küçük hiperbolik yansımalardan kaynaklanan yüksek genlikli anomaliler de net bir şekilde görülmektedir (Şekil 6 b-c). Bu anomaliler demir örüntüleri temsil etmektedir.



Şekil 7. Torul tüneli Trabzon girişinde 500 MHz ile alınan GPR verilerinin 9-16 m'deki (a) 0.2, (b) 0.4 ve (c) 0.6 m'lerdeki GPR derinlik düzlemleri ve genlik değişimi

Şekil 6'da 3.2 m'de ve şekil 8'de 15.7 m'de betonların bağlantı noktaları olan dar boşluklar açıkça gözlenmiştir.

Şekil 8. Torul tünelinin beton bloklarının bağlantı noktaları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan Zigana tüneli ve Gümüşhane ili Torul ilçesinde yeni inşa edilmiş olan Torul tünelinde yer radarı yöntemi ile alınan veriler kullanılarak beton yapısı, kırık-çatlak sistemleri ve çeşitli bozulmalar değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Genel jeolojik gözlemlerden elde edilen sonuçlardan; tünel içerisindeki tünel kaplama malzemelerinde kırık ve çatlaklar oluştuğu ve bu kırık-çatlaklardan sızıntı sularının geldiği, kırık-çatlaklardan sızan suların büyük çoğunluğunun tünel kenar duvarlarından geldiği, tünel duvarlarından sızan suların tek bir kısımdan değil, farklı noktalarda tünel içerisine sızdığı gözlenmiştir.

Yorum aşamasında eski tünellerde en önemli sorunlar olan tünel içine su akışı, su akışına bağlı kaplamada hasarlar, kaplama ile arkasındaki zemin arasında oluşan boşluklar, çevre zeminde zamanla bozuşmuş gevşemiş zeminlerin oluşması, kaplamaya kapasitesinin üzerinde yük gelmeye başlaması nedenleriyle oluşan bozulmaların radargramlar üzerindeki görünümleri izlenmeye çalışılmaktadır.

Tünel içinde tünel yan duvarlarından toplanan yer radarı verilerine ait kesitler genel olarak değerlendirildiğinde; ilk çalışma alanı olan Zigana tünelinde kesitlerin bazı uzaklıklarında su sızıntısından kaynaklanan elektromanyetik dalganın sönümlendiği yerler, ve kırıklı-çatlaklı ve bozunmuş yapıların yüksek genlikli anomaliler verdiği kısımlar gözlenmiştir.

İkinci çalışma alanı olarak değerlendirilen Torul tünelinde ise, 0-3 m uzaklıklar arasındaki yüksek genlikli, küçük ve birbirine bitişik hiperbolik yansımaların tünel girişlerinin ana kaya ile tünel ağzı arasındaki boşluklu kısma döşenmiş beton donatı demirlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca ölçüm alım sırasında tünel bağlantı noktalarının üzerinden geçildiği yerler (Şekil 8) radargramlarda gözlenmiştir.

Zigana tünel duvarından 1.5 m derinliğe kadar olan kısmın radargram üzerindeki görünümünden beton kalitesinin oldukça bozunmuş ve kırık-çatlakların yoğun olduğu gözlenmektedir.

Her iki tünel için elde edilen 3B görünümlerden seçilen genlik-dilim haritaları tünel duvarlarında gözlenen bozulmaların derinliğe bağlı olarak yanal yönde değişimlerini ortaya koymuştur. Bu haritalarda gösterilen genlik değerlerindeki siyah ve beyaz olan görünümler mutlak değer olarak yüksek genlikli kısımları ifade etmekte olup farklı fiziksel ortamları belirtmektedir.

5. KAYNAKLAR

Annan A.P., 2003. Ground Penetrating Radar workshop notes. Sensors Software Inc., Mississaugo, Ontario, Canada.

Carderelli E., Marrone C., Orlando L., 2003. Evaluation of tunnel stability using ıntegrated geophysical methods. Journal of Applied Geophysics, 52, 93-102.

Daniels D.J., 1996 Surface Penetrating Radar, Radar, navigation and avionic series 6. Institute of Electrical Engineers, London, UK.

Grégoire C., Halleux L., Vervoort A., 2003. Application of Ground Penetrating Radar in a mining environment. Mining and Mineral Processing, Sofia, 179- 183.

Locatelli L., Marco Di G., Zonichelli C., Jarre P. 2001. Rehabilitation of Highway tunnels–techniques and procedures. A.I.T.E.S.-ITA 2001 World Tunnel Congress. Progress in Tunneling After 2000-Milano.

Saricicek I. 2014. Tünellerdeki (Zigana, Torul) beton kalitesi ve bozulmaların yer radarı yöntemi ile görüntülenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Sezer, H., 2010. Yer radarı yöntemi ile Zonguldak demiryolu tünelinin duraylılığının ve çevresel etkilerinin araştırılması.

Xie X., Liu Y., Huang H., Shao, J., 2004. Research of GPR non-damaged test of grouting behind lining of shield tunnel.

URL-1 https://www.google.com.tr/?gws_rd=ssl#q=mala+geoscience

Tünel Girişinde Zemin İyileştirmesi: Bağışlı Tüneli Örneği, Trabzon

Soil Improvementin TunnelEntrance: Example of Bağışlı Tunnel, Trabzon

N. Kılıç[1,*], A. Sayın[1], O. Başer[2]

[1] *Karayolları 10.Bölge Müdürlüğü, Ar-Ge Başmühendisliği, 61310, Yıldızlı, Trabzon*
[2] *Zemka Proje Ltd. Şti., 06700, Çankaya, Ankara*
*(*nesejeo@gmail.com)*

ÖZ: Bağışlı Tüneli, "Trabzon-Gümüşhane Bölünmüş Devlet Yolu Projesi" kapsamında Km:37+230-37+960 arasında 730 m uzunluğunda tek tüp olarak tasarlanmıştır. Tünel giriş portali ve ekseni Çatak Formasyonuna ait bazalt, andezit lav ve piroklastları içerisinde açılacaktır. Çıkış portali ve portale yakın eksen kesimi ise, volkanik kökenli moloz ve çakıllardan oluşan yamaç molozu birimi içerisinde yer almaktadır. Eski bir heyelan sahası olan çıkış portali kesiminde tünel yapımı sırasında stabilite problemi oluşması yüksek olasılıktadır. Bu nedenle bu kesimde 10 adet araştırma sondajıaçılmış, litolojik birimlerin yanal ve düşey değişimleri belirlenmiş, arazi ve laboratuvar deneyleri yapılarak kaya ve zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Araştırma bulgularına göre çıkış portalinde 209 m uzunluğundaki kesimde zemin iyileştirilmesi yönteminin, açık kazı ve destek uygulamasından daha ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Tünel kazısından önce zeminin iyileştirilmesi amacıyla konsolidasyon enjeksiyonu projesi hazırlanmıştır. Bu projeye göre; her kesitte 10-11 adet enjeksiyon kuyusu 1,5x1,5 düzenle açılmıştır. Birbirini izleyen kesitlerde şaşırtmalı olarak açılan kuyularda enjeksiyon karışım oranı, sondajdaki refü basıncına göre 1/3-7/5 arasında değişmektedir. Enjeksiyon sınırı, tünel kesiti içerisinde tavanda minimum 8 m, omuzlarda 10 m ve yan aynalarda 6 m arasında olmak üzere uygulanmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonu sonrasında zeminde yapılan presiyometre deneyleriyle zeminin % 100 oranında iyileştirildiği belirlenmiştir. Böylece, enjeksiyonla iyileştirilmiş zeminin açılacak olan tünel cidarında bir kabuk oluşturması sağlanacaktır. İyileşmiş zemin parametreleriyle yapılan nümerik analizler sonucunda bir duraysızlık beklenmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bağışlı Tüneli, Yamaç Molozu, Enjeksiyon, Presiyometre

ABSTRACT: *Bağışlı Tunnel is designed compass of "Trabzon and Gümümhane Separated State Highway Project" between Km:37+230-37+960 and 730 m in length as a single tube. Tunnel entrance portal and axis will construct in Çatak formation of basalt, and esitelavas and pyroclastics. İn case the exit portal and near the portal axis zone is located with in talus unit consisting of volcanic ruble and gravel.At the exit portal, which is part of an old landslide areas, stability problems are very likely to ocur during the tunnel construction. Therefore, in this section, opened 10 research drilling, identi fied lateral and vertical variations of lithological units, rock and soil engineering properties are determined by in field and laboratory tests. According the research findings, it has been decided that the ground improvement with injection method is became more economic and applicable than removing and supporting all slope debris material from portal structures. Before the tunnel excavation, in order to improve ground, consolidation grouting project were prepared. According to this design; 10 to 11 grouting holes were drilled in each section with layout of 1,5*1,5. According to pressure in drilling, staggered in consecutive sections in injection wells in the mixing ratio, (cement/water ratio) between 1/3-7/5 ranged. Injection limit in cross-section tunnel will be minimum 8 m at the tunnel crown, 10 m at shoulders and 6 m in the tunnel face. Thus, grouting applications is designed to form a crust on the walls of the tunnel. After consolidation injections of the ground verified that improved by 100 % with the ground is made pressiometer experiments. Thus, the ground improved by injection will provided to form a crust in the tunnel wall to be opened. As a result of numerical analysis has concluded it will not be expected to instability with made with improved ground of the parameter.*

Keywords: *Bağışlı Tunnel, Talus, Injection, Pressiometer*

1. GİRİŞ

Trabzon-Gümüşhane Bölünmüş Devlet Yolu Projesi kapsamında projelendirilen Bağışlı Tüneli, 730 m uzunluğunda ve tek tüpten oluşmaktadır. Bahsi geçen güzergahın ilgili kesiminde yol genişlemesi için mevcut derenin kesitinin çok dar olması ve inceleme alanında yer alan HES projesi nedeniyle bölünmüş yolun dağ tarafına doğru açılması zorunluluğu doğmuştur. Ancak, mevcut arazinin dik ve kazı yapılması durumunda çok yüksek yarma şevlerinin ortaya çıkacak olması ve trafik güvenliği nedenleriyle bu tünel projelendirilmiştir. Tünel güzergahının bir kısmı yamaç molozu içerisinde olacaktır. Bu bildiride, tünel kazısı ve tünelin işletme aşamasında karşılaşılması muhtemel duraysızlıkların önlenmesine yönelik olarak yapılan mühendislik jeolojisi çalışmaları ve yamaç molozunda uygulanan enjeksiyonla uygulamaları konu edilmektedir.

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

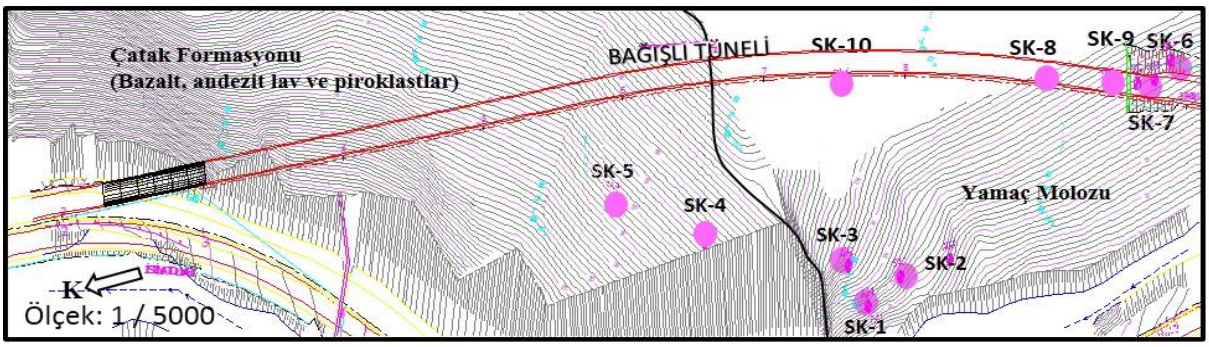
İnceleme alanındaki hakim birim Üst Kretase yaşlı Çatak Formasyonu'na ait bazalt, andezitik lav ve piroklastlarıdır. Bununla birlikte sahada, yamaç molozu da yer almaktadır.Yamaç molozu; ağırlıklı olarak volkanik kökenli moloz ve çakıllardan oluşmakla birlikte, yer yer hakim kil seviyelerini de içermektedir.Tünel güzergahında yamaç molozu birimi Km:37+420'den itibaren 37+960'a (tünel çıkışına) kadar yüzlek vermektedir (Şekil1 ve 2).

Şekil 1. (a) Çatak Formasyonu (Tünel giriş kesimi), (b) yamaç molozu (tünel çıkış kesimi)

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİVE JEOTEKNİK

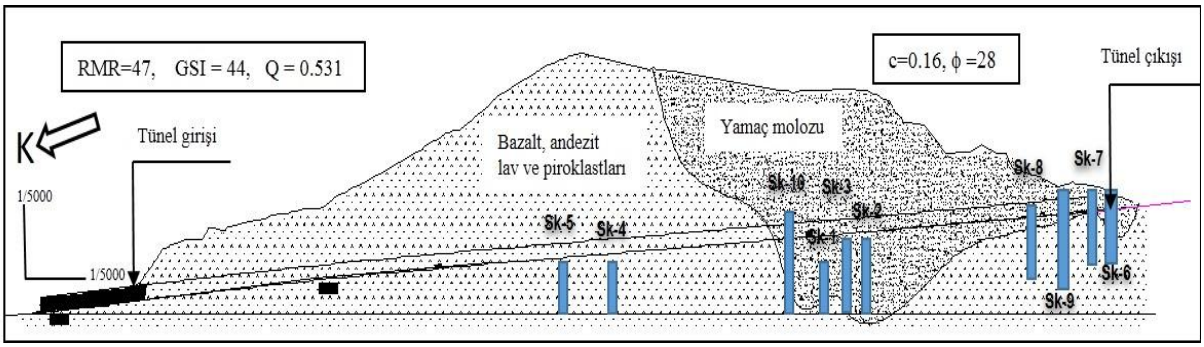
3.1. Araştırma Sondajları ve Güzergahın Mühendislik Jeolojisi

Tünel projesinin tasarımına yönelik olarak; sahanın mühendislik jeolojisi modelinin ortaya koyulması ve zeminin jeomekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla öncelikli olarak 10 adet sondaj kuyusu planlanmış ve Km:37+580–37+650 arasında yapılan SK-4 ve SK-5 sondajları tamamen Çatak Formasyonu içerisinde açılmıştır. Diğer sondajlarda ise (SK-1, SK-2, SK-3, SK-6, SK-7, SK-8, SK-9 ve SK-10) kalınlığı eksende 81 m'yi bulan yamaç molozu kesilmiştir. Yamaç molozu, yoğun yağış etkisi nedeniyle dik morfolojik yapıdaki volkanik kayaçların ayrışmasıyla oluşmuştur ve tünel çıkış portalindeki yamaç düzlüklerinde kesilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Tünel güzergahının ve sondajların konumları

İnceleme alanında anakaya; Çatak Formasyonunun sarımsı-grimsi bordo renkli az ayrışmış, yer yer ayrışmamış, hematitleşmiş, limonitleşmiş orta dayanımlı-dayanımlı bazalt, andezitik lav ve piroklastikleriyle temsil edilmektedir. Bununla birlikte, yamaç molozu da tünelin orta ve çıkış kesimleri arasında Çatak Formasyonunun üzerinde yer almaktadır(Şekil 2).Arazinin topoğrafik yapısı gereği, sondajlar tünel eksenine mümkün olduğunca yakın konumda açılmıştır. Ancak tamamı tünel ekseninde açılamamıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Tünelin konumunu da gösteren jeoloji kesiti

Yamaç molozu içerisinde birkaç metreye varan, volkanik kökenli, sert-orta sert, dayanımlı-orta dayanımlı serbest bloklar izlenmektedir. Eski yamaç molozu içerisinde yapılan SPT deneyleriyle elde edilen örselenmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerine ait sonuçlar aşağıdaki gibidir (Çizelge 1). Yamaç molozu granüler yapısından dolayı geçirimli özelliklere sahiptir. Ayrıca yamaç molozu birimden alınan örselenmiş numuneler kabul edilen birim hacim ağırlıklara göre sıkıştırılarak direkt kesme deneyine tâbi tutulmuşlardır.

Çizelge 1. Yamaç molozunun indeks ve dayanım özelikleri

Sondaj No.	Numune No.	Derinlik (m)	γ_n (kN/m^3)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Zemin Sınıfı	Makaslama dayanımı	
				LL	PL	PI	+4	-200		c (kPa)	ϕ (^{o})
SK-3	SPT-1	3,00-3,45	17,7	39,20	24,09	15,10	42,6	18,9	GC	9,8	29
SK-3	SPT-1	6,00-6,45	17,8	41,70	24,37	17,30	31,1	38,3	GC	-	-
SK-7	SPT-2	1,50-1,95	17,0	52,80	24,12	28,70	0,00	69,0	CH	-	-
SK-8	SPT-1	6,00-6,45	17,5	36,20	23,41	12,80	43,5	16,2	GC	15,7	28
SK-9	SPT-3	7,50-7,95	17,0	39,50	23,40	16,10	28,2	22,5	SC	-	-
SK-10	SPT-1	9,00-9,45	17,6	38,60	22,95	15,60	41,6	21,1	GC	16,7	28

3.2.Kaya Kütle Sınıflaması

Tünel portal girişi için Bieniawski(1989) tarafından geliştirilen kaya-kütlesi puanlama sınıflamasına (RMR) göre yerinde yapılan ölçüm ve gözlemlerle RMR değeri hesaplanmıştır (Çizelge 2). Buna göre RMR değeri 52, yüzeyde ölçülen süreksizliklere bağlı düzeltilmiş RMR değeri ise 47 olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre, tünel girişindeki kaya orta kaya niteliğindedir(Çizelge2).

Çizelge2. Bağışlı tüneli Çatak Formasyonuna ait (RMR) sınıflaması

	Parametre	Min. Değer/Tanım	Puan
1	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	34	4
2	Kaya Kalite Göstergesi RQD (%)	50	8
3	Süreksizlik Aralığı (mm)	60-200 mm	8
4	Süreksizliklerin Durumu		
	Devamlılık (m)	10-20 m	1
	Açıklık (mm)	0.1-1.0 mm	4
	Pürüzlülük	Pürüzlü	5
	Dolgu	Sert Dolgu < 5 mm	4
	Bozunma	Orta derecede bozunmuş	3
5	Yeraltı Suyu	Yok	15
	Temel RMR		52
	Süreksizlik durumu için değer düzeltme		-5
	Nihai RMR		47

Yapılan Q sınıflaması (Barton vd.,1974) sonucuna göre birimin Q değeri 0.531 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). Bu şekliyle Çatak Formasyonu içindeki kayaçların Q ve Eşdeğer boyuta göre tahkimat kategorisi 27 dir ve bu sınıflamaya göre çok zayıf kayaç özelliğindedir.

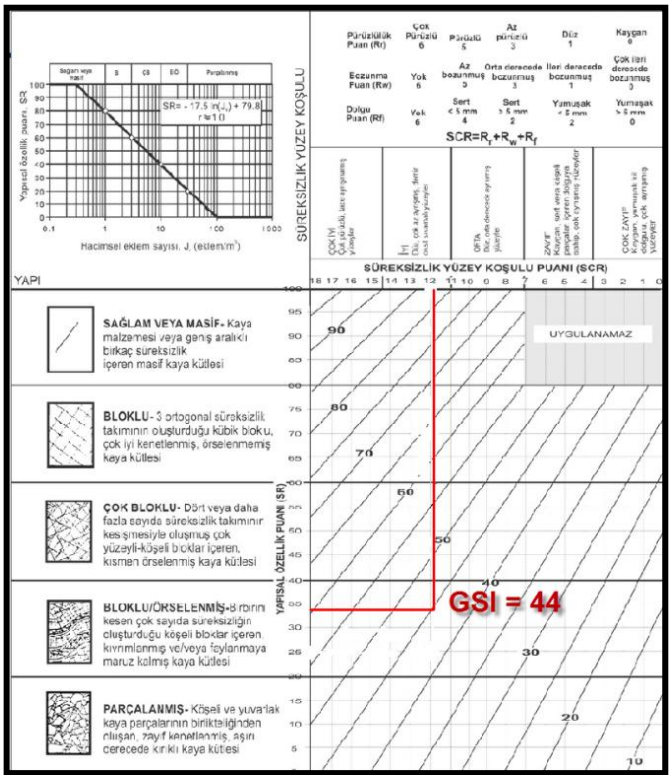
Çizelge 3. Bağışlı tüneli Çatak Formasyonuna ait Q sınıflaması

Litoloji	Kaya Kalite Göstergesi (RQD)	Eklem takım sayısı (J_n)	Çatlak pürüzlülük durumu (J_r)	Çatlak ayrışma durumu (J_a)	Çatlak suyu durumu (J_w)	Gerilme azaltım faktörü (SRF)	Q
Bazalt, andezitik lav ve piroklastlar	50	24	3	2	0.85	5.00	0.531

3.3.Jeoteknik Değerlendirme

İnceleme alanındaki yamaç molozunda iyileştirme çalışmaları öncesinde ve sonrasında presiyometre deneyleri yapılmıştır. Presiyometre çalışmalarında, deformasyon modülü $E_{p(ort)}$=0.0186GPa olarak ölçülmüş olup Briaud(1992) tarafından önerilen görgül ilişkiden birimin elastisite modülü E = 0.0558 GPa olarak hesaplanmış ve nümerik analizlerde kullanılmıştır.

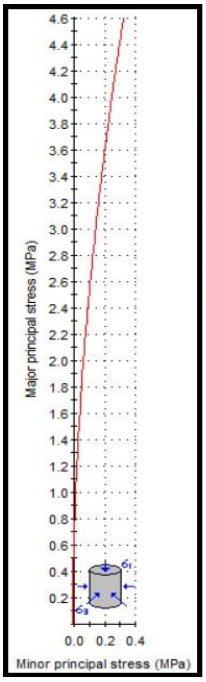
Kaya kütlesinin yerinde dayanım parametrelerinin belirlenmesinde GSI (Hoek,1999) değerleri kullanılmıştır. GSI değerinin bulunması için Sönmez ve Ulusay(2002) masif kaya grubunu ekledikleri kantitatif GSI abağından yararlanılmış ve bu amaçla SR ve SCR değerleri sırasıyla 12, ve 34 olarak hesaplanmıştır. Proje güzergahında jeolojik haritalama ve mühendislik jeolojisi çalışmaları sırasında Bağışlı Tüneli kaya birimleri için ortalama GSI değeri yaklaşık olarak 44 bulunmuştur (Şekil 4).



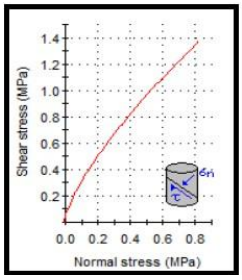
Şekil 4. Sönmez ve Ulusay(2002) tarafından önerilen modifiye edilmiş
Kantitatif GSI abağı ve incelene kaya kütlesinin bu abaktaki yeri

Bazalt ve andezit birimleri için önerilen kaya türüne göre önerilmiş değerlerden kaya malzemesi sabiti m_i =25 olarak belirlenmiştir. Laboratuvar deney sonuçları ve GSI değerleri ışığındaanalizlerde kullanılacak kaya kütlesi parametreleri RocLab programı (URL-1) kullanılarak elde edilmiş olup, Şekil 5'deverilmiştir(Hoek ve Brown, 1980 a,b).

.

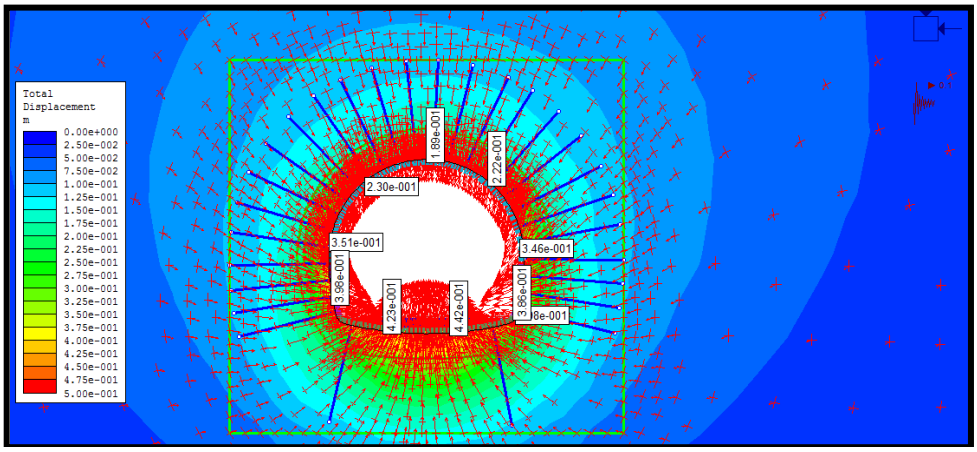


Hoek-Brown Sınıflaması
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı=34 MPa
GSI=44 mi=25 örselenme faktörü (D)=0.5
Ei=11900 Mpa
Modül oranı (MR)=350
Hoek-Brown yenilme ölçütü parametreleri
Mb=1.737 s=0.0006 a=0.509
Mohr-Coulomb Kriterleri
C=0.182 MPa f=56.95°
Kaya Kütle Parametreleri
Çekme gerilmesi=-0.011 Mpa
Tek eksenli sıkışma dayanımı=0.762 Mpa
Global gerilme=5.803 Mpa
Deformasyon modülü=1180.59 MPa



Şekil 5. İncelenen kaya kütlesinin Hoek-Brown ölçütüne göre çizilmiş yenilme zarfı

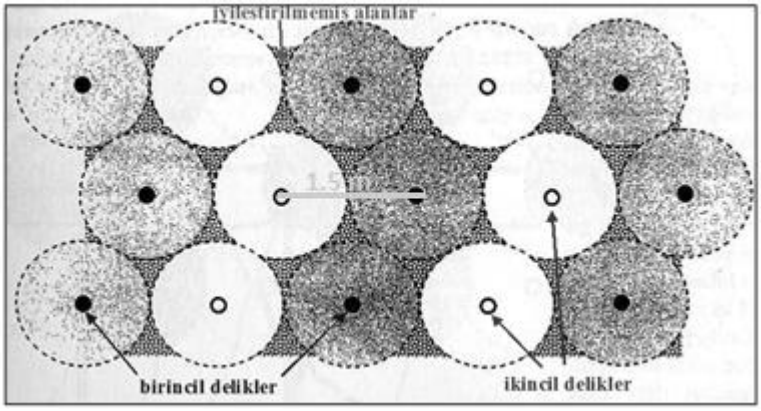
İnceleme alanındaki Çatak Formasyonu'na ait birimler andezit ve bazaltlardan oluştuğu için herhangi bir iyileştirme çalışması gerektirmemektedir. Ancak, yamaç molozunda tünel kazı ve destekleme aşamasında kazı ve destekleme sırasında stabilitenin sağlanması için iyileştirme çalışmasına ihtiyaç vardır. Yamaç molozunun Bölüm 3.3'de verilen dayanım parametrelerine yönelik değerlendirmelerin yapılması sonrasında,tünel stabilite analizleri tüneldeki beklenen deformasyonların analiz edilebilmesi ve yapısal elemanların üzerindeki yüklerin değerlendirilebilmesi Phase^2 yazılımı (www.rockscience.com)ile yapılmıştır. Analizler Bölüm 3.3'de verilen malzeme parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Analizler neticesinde yamaç molozu içerisinde kalan kesim için tünelde çok yüksek düzeyde yer değiştirmelerin gerçekleşeceği ardından tünelde göçük olacağı sonucuna varılmıştır.Yapılan analizlerde üst yarı kazı ve desteklemesinin ardından, yer değiştirmeler yaklaşık 47 cm düzeyine çıkmaktadır. Bu aşamada püskürtme beton,oluşan gerilmelerin altında yenilmeye başlamaktadır. Alt yarı kazısıyla birlikte sistem yenilmekte ve denge koşulu sağlanamamaktadır. Bu aşamada tünelde göçük oluşmaktadır (Şekil 6). Model bulgularından yamaç molozunda iyileştirme çalışmalarının yapılmasına karar verilmiştir(Emre Özcan Müh. Müş. Ltd. Şti.,2014).



Şekil 6. Alt yarı kazısı ile birlikte gelişen yenilme mekanizması

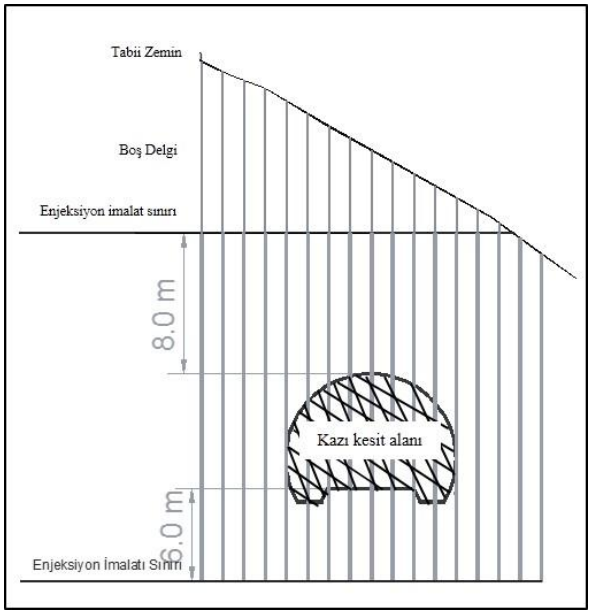
4. ZEMİN İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Bağışlı Tüneli'nin yamaç molozunda açılacak kesiminde planlanan enjeksiyon önlemlerinde dayanımın arttırılması ve kemerlenmenin oluşturulması hedeflenmiştir. Burada, zemindeki boşlukları %100 doldurmaya gerek görülmemiş olup, yer yer iyileştirilmemiş kesimlerin kalmasına suyun drenajı için izin verilmiştir.Enjeksiyon çalışmasında konsolidasyon enjeksiyonu yöntemi seçilmiş olup, enjeksiyon kademe boyları 1m, kuyuların merkezden merkeze uzaklığı ise 1.5 m olarak belirlenmiştir(Şekil 7).



Şekil 7. Enjeksiyon tip yerleşimi(Merkezden merkeze uzaklık 1.5 m)

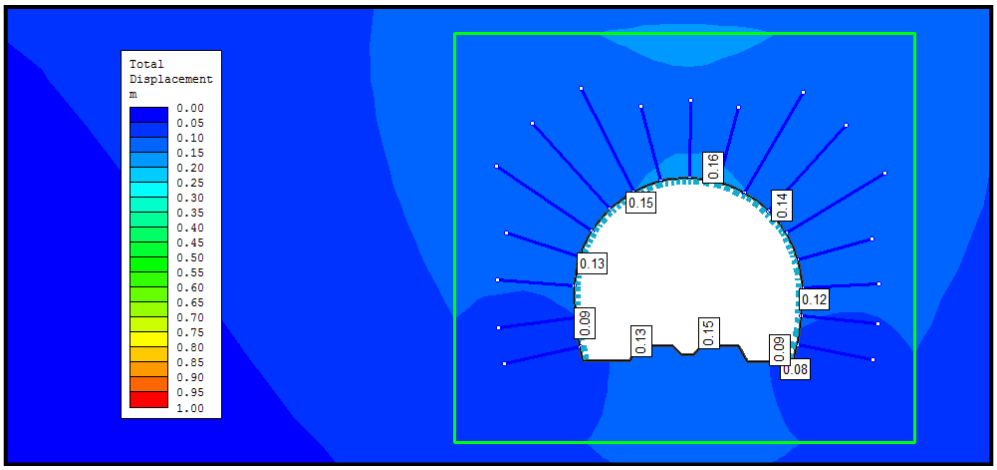
Her kademede ortalama 720 kg enjeksiyon(480-960 kg arasında), ve 400 kg/m katı madde basılmıştır. Enjeksiyon çalışmalarında zeminde hidrolik çatlatma oluşmaması için,enjeksiyon düşük basınçta ve düşük akış hızında uygulanmıştır. Karışımlarda bentonit ve sodyum silikat kullanılmamıştır. ve çimento/su oranı = 1 / 3 ile 7 / 5 arasında uygulanmıştır. Enjeksiyon uygulaması tünel üst kotunun 8.0 m üstünden itibaren başlamakta olup, kazı kesiti içerisinde enjeksiyon uygulanmamıştır. Enjeksiyon imalatı tünelin alt kotundan itibaren 6.0 m derinliğe kadar devam ettirilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Enjeksiyon yerleşimi

İyileştirme önlemleri sonrasında yapılan presiyometre ölçümlerinde ise $E_{p(ort)}$=0.0379GPa olarak ölçülmüş olup, birimin elastisite modülü E = 0.1139 GPaolarak hesaplanmıştır. (Bu değerler enjeksiyon öncesi değerlere göre %100oranında yüksek olup, alınan enjeksiyon önlemlerinin başarılı olduğunu kanıtlamaktadır.

Enjeksiyon başarısını kontrol etmek ve yamaç molozun datünelin açılabilirliğini tartışmak amacıyla, iyileştirme sonrası elde edilen zemin parametreleri kullanılarak nümerik analizler tekrarlanmıştır. Modelleme sonucunda tünel çevresinde oluşacak yer değiştirmelerin azaldığı görülmüş olup, herhangi bir duraysızlık da beklenmemektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Alt yarı kazısı ile birlikte gelişen yenilme mekanizması-iyileştirme sonrası

Yapılan değerlendirmeler ve analizler ışığında tünelin tamamında uygulanacak kazı destek sistemi (NATM) B3 olarak belirlenmiştir(KGM, 2013). Bulon boyları yan duvarlarda 4 m, omuzlarda 6 m olarak belirlenmiştir. Kesitte bulonlar arası 1.0 m, ilerlemede 1.5 m'dir. Püskürtme Betonu (C20/25)20 cm olup, hasır çelik (Q221x221) çift sıradır. Enjeksiyonlu süren uygulaması üst 120°de 20-30 cm ara ile 4 m uzunluğundadır. Çelik iksa I 140 1-1,5 m arayla yerleştirilecek olup, halka boyu üst yarıda 1.5 m, alt yarıda 3 m'dir.

5. SONUÇLAR

Tünel portal kesiminde 10 adet araştırma sondajı açılmış, litolojik birimlerin yanal ve düşey değişimleri belirlenmiş, yerinde ve laboratuvar deneyleri ile kaya ve zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Araştırma bulguları ışığında çıkış portalinde 209 m uzunluğundaki kesimde zemin iyileştirilmesi yönteminin açık kazı ve destek uygulamasından daha ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Zeminin iyileştirilmesi amacıyla konsolidasyon enjeksiyonu projesi hazırlanmıştır. Bu projeye göre; her kesitte 10-11 adet enjeksiyon kuyusu 1,5x1,5 dizilimle açılmıştır. Birbirini takip eden kesitlerde şaşırtmalı olarak açılan kuyularda enjeksiyon karışım oranı, sondajdaki refü basıncına göre 1/3-7/5 arasında değişmektedir.Enjeksiyon uygulaması tünel kazısı öncesinde tabii zeminden aşağıya, tünel kotuna doğru yapılmıştır. Enjeksiyon sınırı ise tünel kesiti içerisinde tavanda minimum 8 m, omuzlarda 10 m ve yan aynalarda 6 m arasında olmak üzere projelendirilmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonu sonrasında zeminde yapılan presiyometre deneyleri sonucunda zeminin % 100oranında iyileştirildiği belirlenmiştir. Böylece enjeksiyonla iyileştirilmiş zeminin açılacak olan tünel cidarında bir kabuk oluşturması sağlanmıştır. İyileşmiş zemin parametreleriyle yapılan nümerik analizler sonucunda bir duraysızlık beklenmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Tünelde kazı destek sistemi B3 olarak belirlenmiş olup, yamaç molozu içerisindeki kesimler enjeksiyon ile iyileştirilecektir. Enjeksiyonla iyileştirme sonrası elde edilen sonuçlar ışığında tünelin güvenle teşkil edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

Barton, N.,LienR., Lunde. J.,1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-236.

Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons,New York.

Briaud, J.L. 1992. The Pressuremeter. Balkema, Rotterdam.

Emre Özcan Müh. Müş. Ltd. Şti. 2014. Trabzon-Gümüşhane bölünmüş devlet yolu projesi bağışlı tüneli kesin proje hesap raporu.

Hoek, E., Brown, E.T. 1980b. Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(GT9), 1013-1035.

Hoek, E.,Brown, E.T. 1980a. Underground Excavations in Rock. Inst. Min. Metall.,London.

Hoek, E. 1999. Support for very weak rock associated with faults and shearzones.Distinguished Lecture for the Opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia.

KGM, 2013. Karayolları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü,Ankara.

Sönmez, H.,Ulusay, R., 2002. A Discussionon the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 26, 77-99.

URL-1, 2015. www.rocscience.com.

Yamaç Tüneli Portal Tasarımı: Kürtün Tüneli Örneği, Gümüşhane

Portal Design of Slope Tunnel: Example of Kürtün Tunnel, Gümüşhane

N. Kılıç[1,*], A. Sayın[1], A. Şirin[2]

[1] *Karayolları 10.Bölge Müdürlüğü, Ar-Ge Başmühendisliği, 61310, Yıldızlı, Trabzon*
[2] *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı, 06790, Etimesgut, Ankara*
*(*nesejeo@gmail.com)*

ÖZ: Doğrultusu yamaca paralel olan yamaç tünellerinin portali özel tasarım gerektirir. Bu özelliklere sahip Kürtün Tüneli, Kuzeydoğu Türkiye'de Trabzon-Gümüşhane Devlet Yolu üzerinde yer almaktadır. Tünelin tasarımına yönelik olarak açılmış olan araştırma sondajlarında basınçlı su testleri ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Bu sondajların korelasyonu sonucunda tünel portalinin yatayda sol tüpte 120 m'si, sağ tüpte ise 98 m'sinin tamamen yamaç molozu içerisinde açılacağı belirlenmiştir. Sondaj verileri ışığında, portaldeki olumsuz zemin koşullarının bulunduğu bölgede enjeksiyon yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılmasının açık kazı ve destek uygulamasından daha ekonomik ve uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Yamaç tünelinde yükler, tünelin dağ tarafındaki şevine toplanmıştır. Bu yüklerin tünel çeperlerinde dağılımını ve sönümlenmesini sağlamak amacıyla kademeler halinde yamaç destek betonu tasarlanmıştır. Böylelikle tünel portal kesimlerinin maruz kalmış olduğu yük tünel çeperine dağıtılmış, deformasyon ve göçük riski en alt düzeye indirilmiştir.

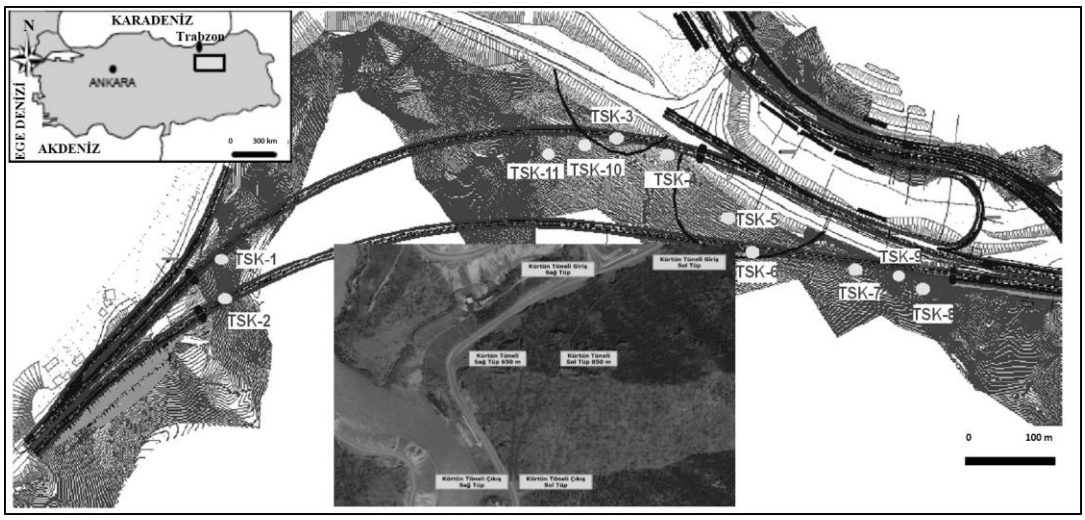
Anahtar Kelimeler: Kürtün Tüneli, Portal, Yamaç Tüneli, Enjeksiyon, Destek Betonu

ABSTRACT: *Direction that is parallel to the slope of the hillside tunnel portals require special design. The Kürtün tunnel is located on Trabzon–Gümüşhane Road at North–East Black Sea Region in Turkey. For the design of the tunnel; opened exploratory drilling in water pressure tests and pressuremeter tests were performed. Interpretation of these borehole results illustrate that the 120 m length in left tube and 98 m in right tube are located in slope debris material. It has been decided that the ground improvement with injection method is became more economic and applicable than removing and supporting all slope debris material from portal structures. Ground stress is usually concentrated at toe of the mountain slope side where the tunnel is located parallel to natural slope. In order to distribute the loads at tunnel circumstances and damping it properly, portal slope was designed by concrete support by stages. By doing this, slopping tunnel portal was supported and risk of collapse was minimized before entering the bored tunnel section.*

Keywords: *Kürtün Tunnel, Portal, Slope Tunnel, Injection, Support Concrete*

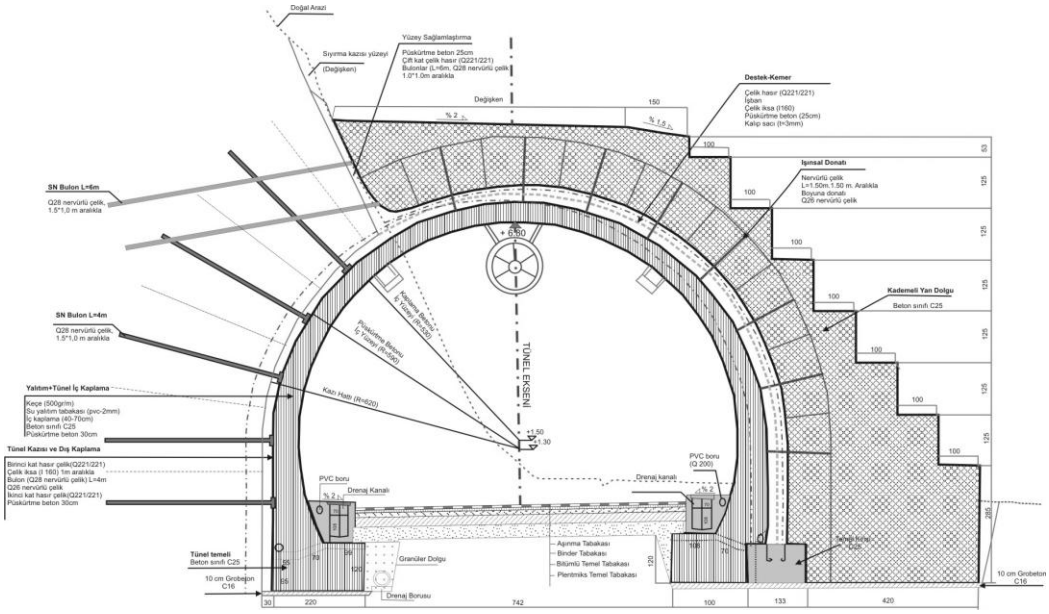
1. GİRİŞ

Doğrultusu yamaca paralel olan karayolu ve otoyol tünellerinin portalleri, özellikle heyelanlı veya litolojik olarak şev duraylılığı sorunu olan birimlerden (yamaç molozu, alüvyon, killi-siltli zeminler vb.) oluştuğunda ve örtü kalınlığının az olduğu durumlarda, genel olarak tünel proje tasarımının ve inşasının en güç gerçekleştirildiği kesimler olarak ortaya çıkarlar. Kürtün Tüneli'nin tasarımından önceki yol güzergahı 70 m yarıçaplı kurp içermektedir. Trabzon-Gümüşhane yol güzergahının baraj gölü kıyısında oldukça sarp bir arazide yer alması, yolun geometrik standardının düşük olması ve buna bağlı olarak trafik kazalarının sıklıkla meydana gelmesi bu tünelin yapımını gerekli kılmıştır (Şekil 1). Kürtün Tüneli, Kuzeydoğu Türkiye'de Trabzon-Gümüşhane Devlet Yolu üzerinde iki tüplü olarak projelendirilmiştir. Sağ tüp 650 m, sol tüp 850 m olarak projelendirilen tüneller, 5.00 x 8.00 m'lik gabariye sahiptir. Tünellerde iç kaplama iç yüzeyine göre tünel yarıçapı 530 cm, kazı hattına göre yaklaşık yarıçapı 620 cm'dir.



Şekil 1. Tünel güzergahını ve sondaj noktalarını gösteren plan

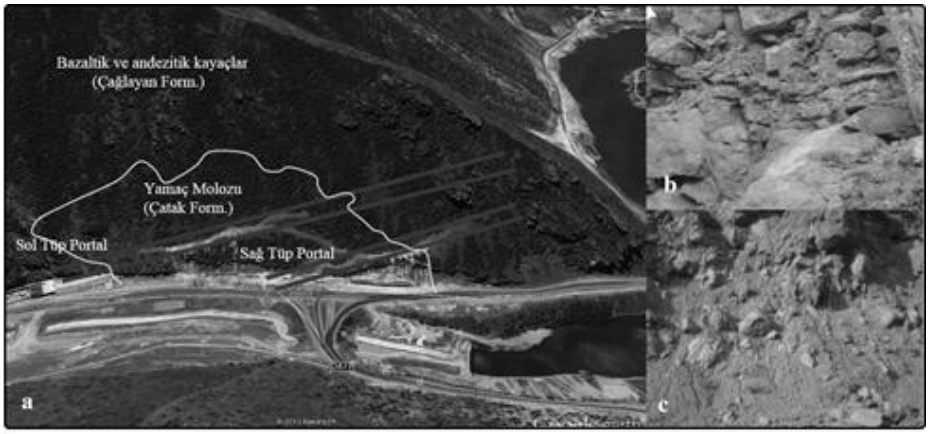
Portalde destek betonu uygulaması, Türkiye'de ilk kez Doğu Karadeniz Sahil Yolu'nun yapımında Çayeli Tüneli'nde uygulanmıştır (Vardar vd.,2005). Benzer özelliklere sahip Kürtün Tüneli'nin de doğrultusu yamacı verev kestiği için, tünel giriş geometrisi verev girişi gerektirmektedir. Ayrıca tünelin portal kesimi duraylılık sorunu oluşturabilecek bloklu, andezit kökenli kil ve çakıl boyutunda malzeme içeren yamaç molozu biriminden oluştuğu için yamaç tüneli tasarlanmıştır (Şekil 2). Bu çalışmada, tünel giriş portali için yapılan analizler ile kazı ve destekleme aşamaları irdelenmiştir.



Şekil 2. Kürtün Tüneli yamaç destek betonu uygulamalı tünel tip kesiti

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

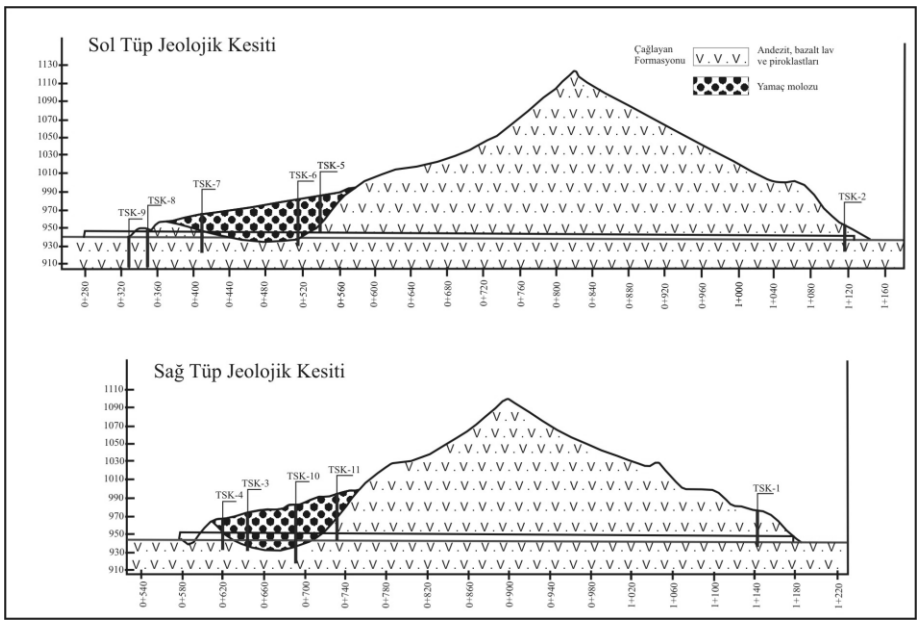
Doğu Pontidler içerisinde yer alan inceleme alanında Üst Kretase dönemi boyunca kuzey zonunda gelişen aktif volkanizma sonucu volkano-tortul bir istif birikmiştir. Tünel hattı boyunca, bu istifin ilk evredeki bazik lavlarını oluşturan Çatak Formasyonu ve asidik lavlarını oluşturan Kızılkaya formasyonları yüzeylenmektedir. Bunun yanı sıra, tünel girişinde Çatak Formasyonu içerisinde gelişmiş köşeli taneli, molozlu-bloklu-kumlu çakıl özelliğinde yamaç molozları bulunmaktadır (Şekil 3a,c). Çağlayan Formasyonu ise ağırlıklı olarak andezit ve bazaltlardan oluşmaktadır (Şekil 3b).



Şekil 3. (a) Bölgesel jeolojisi, (b) andezitik ve bazaltik lavlar, (c) yamaç molozu

3. ARAŞTIRMA VE ZEMİN İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

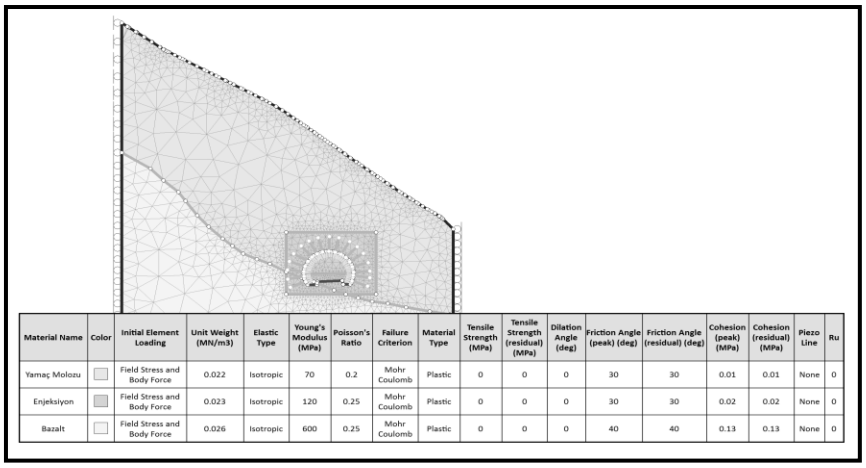
Giriş portali yamaç molozu birimi içinde açılacak olan tünel projesinin tasarımına yönelik olarak; sahanın jeolojik-jeoteknik modelinin ortaya koyulması ve zeminin jeomekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, öncelikli olarak, tünel sağ ve sol tüp portal kesiminde 11 adet sondaj yapılmıştır. Sağ tüpte ilk iki sondajda, sol tüpte ise ilk üç sondajda tünel kırmızı kotunun 10 m altına kadar kayaya rastlanılmamıştır. Diğer sondajlarda ise 24 m, 14.5 m ve 10 m'de orta-sert dayanımlı, parçalı-kırıklı andezit birimi kesilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Arazi ve sondaj verilerine göre Kürtün Tüneli sol ve sağ tüp jeolojik kesiti

Tünelin sol ve sağ tüp giriş portalinde ilk kazının yapılacağı kesimde yersel olarak bazalt ve andezitler ve devamında ise yamaç molozları yüzlek vermektedir. Portaldeki bu olumsuz zemin koşullarının bulunduğu bölgede zemin iyileştirmesi yapılmasının açık kazı ve destek uygulamasından daha ekonomik ve uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Zemin iyileştirilmesi amacıyla konsolidasyon enjeksiyonu projesi hazırlanmıştır. Konsolidasyon enjeksiyonu, birbirini takip eden kesitlerin her birinde 10-11 adet olmak üzere şaşırtmalı olarak konumlanan (1,5 m x1,5 m dizilimle) ve 56 mm çapında açılan enjeksiyon kuyularından yapılmıştır.

Enjeksiyon karışım oranları ise (çimento/su oranı), hedeflenen refü basıncına göre 1/3 ile 7/5 arasında gerçekleştirilmiştir. Tünel kesiti içerisinde enjeksiyon sınırı; tavanda minimum 4 m, omuzlarda 3 m ve yan aynalarda 1,5-2 m olmak üzere, tünel cidarında bir kabuk oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Enjeksiyon uygulaması öncesi yapılan sondaj verileri ve enjeksiyon sonrası zemin parametreleri (birim hacim ağırlık, poisson oranı, içsel sürtünme açısı ve kohezyon) Plaxis sonlu elemanlar ağında analiz edilmiştir (Şekil 5). Enjeksiyon sonrası yapılan pressiyometre deneyleri sonucunda zeminin % 70 oranında iyileştirildiği, elastisite modülünün 30 MPa'dan 120 MPa'a ulaştığı belirlenmiştir.



Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (MN/m3)	Elastic Type	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (MPa)	Tensile Strength (residual) (MPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (MPa)	Cohesion (residual) (MPa)	Piezo Line	Ru
Yamaç Molozu		Field Stress and Body Force	0.022	Isotropic	70	0.2	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	30	30	0.01	0.01	None	0
Enjeksiyon		Field Stress and Body Force	0.023	Isotropic	120	0.25	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	30	30	0.02	0.02	None	0
Bazalt		Field Stress and Body Force	0.026	Isotropic	600	0.25	Mohr Coulomb	Plastic	0	0	0	40	40	0.13	0.13	None	0

Şekil 5. Sol tüp (Km 0+480) Plaxis sonlu elemanlar ağı ve enjeksiyon öncesi ve sonrası zemin değerleri

4. JEOTEKNİK DEĞERLENDİRME VE KAYA KÜTLESİ SINIFLAMALARI

Bu bölümde Kürtün Tüneli sol tüp giriş portalinin 90 metresi ve sağ tüp giriş portalinin 30 metresinde yüzlek veren andezitik ve bazaltik kayaçlar için jeomekanik değerlendirme ve kaya kütlesi sınıflamaları yapılmış ve bu sınıflamalara göre kazı ve destek sistemi belirlenmiştir. Aşağıda alt başlıklar halinde bu sınıflama sonuçları verilmiştir.

4.1. Q Kaya Kütle Sınıflaması

Q sınıflama sistemine göre (Barton vd., 1974) tünel portal bölgesindeki kayaçlar zayıf kaya özelliğindedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kürtün tüneli sol ve sağ tüp giriş portali Q kaya kalite sınıflaması

Litoloji	Kaya kalite göstergesi (RQD)	Eklem takım sayısı (Jn)	Eklem pürüzlülük durumu (Jr)	Eklem ayrışma durumu (Ja)	Eklem suyu durumu (Jw)	Gerilme azaltım faktörü (SRF)	Q
Andezitik, bazaltik kayaçlar	5-15	2x12 4 eklem takımı	3 pürüzlü	8 Kil dolgulu, çok altere	0.66 Orta dereceli su içeriği	2.5 Düşük basınçlı	0.02-0.06

4.2. Kaya-Kütlesi Puanlama (RMR) Sistemi

Kaya kütlesinin RMR değeri portal girişi için yerinde yapılan ölçüm ve gözlemlerle kaya kütlesinin RMR değeri portal girişi için Çizelge 2'de verilen şekliyle süreksizliklerin konumuna bağlı değer düzeltmesi yapılarak hesaplanmıştır (Bieniawski, 1989). Buna göre RMR değeri 45, süreksizliklere

bağlı düzeltilmiş RMR değeri ise 40 olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre, giriş portalinde jeolojik ortam zayıf kaya niteliğindedir.

Çizelge 2. Kürtün tüneli sol ve sağ tüp giriş portali için (RMR) puanları

RMR		Sol tüp	Sağ tüp
		0+280-0+580	0+580-0+720
1-Sağlam kayanın dayanımı	Tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c)	35 MPa	35 MPa
	Puan	4	4
2- Kaya Kalite derecesi-RQD	Özellik	5	15
	Puan	3	3
3-Süreksizlik aralığı	Özellik	60-200 mm	60-200 mm
	Puan	8	8
4- Süreksizlik durumu	Özellik	Az pürüzlü yüzey, Yumuşak duvar kayası, açıklık < 1mm	Az pürüzlü yüzey, Yumuşak duvar kayası, açıklık < 1mm
	Puan	20	20
5-Yeraltı suyu	Özellik	Nemli	Nemli
	Puan	10	10
Süreksizliklerin Konumuna göre değer düzeltme		Orta	Orta
		-5	-5
RMR Puanı		45	45
RMR Final Puanı		40	40

4.3. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Kayaçların yerinde dayanım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan GSI (Hoek ve Brown,1988) değerleri Kürtün Tüneli için Çizelge 3'de verilmiştir. 35 olarak hesaplanan GSI değeri birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmış kaya kütlesini ifade etmektedir.

Çizelge 3. Kürtün tüneli sol ve sağ tüp giriş portali GSI sınıflaması

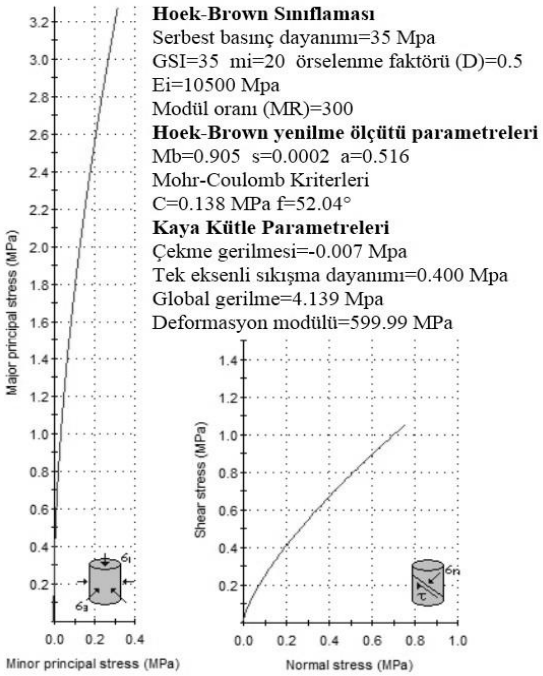
Km	Tek eksenli sıkışma dayanımı (σb) MPa	Kaya sabiti (mi)	Örselenme faktörü (D)	Kaya modül oranı (mr)	Derinlik (m)	GSI
Sol tüp (0+280-0+580)	35	20	0.5	300	23	35
Sağ Tüp (0+580-0+720)	35	20	0.5	300	20	35

5. JEOMEKANİK DEĞERLENDİRME

Roc Lab Programı ile Hoek-Brown sınıflama parametreleri (serbest basınç dayanımı, GSI indeksi, kayaç sabiti, yenilme ölçütü parametreleri (mb, s ve a) ve kaya kütlesi için eşdeğer Mohr-Coulomb parametreleri (kohezyon ve sürtünme açısı) değerleri kullanılarak her iki tüp bölgesi için kaya kütlesinin makaslama dayanımları hesaplanmıştır (Çizelge 4, Şekil 6).

Çizelge 4. Kürtün tüneli sol ve sağ tüp giriş portalindeki kaya kütlelerinin makaslama dayanımları

Km	(σb) MPa	GSI	mi	mb	s	a	σ_c	σ çekme	c (MPa)	ϕ	Def. Mod. E_s (MPa)
Sol tüp (0+280-0+580)	35	35	20	0.905	0.0002	0.516	0.400	-0.007	0.138	52	599.99
Sağ Tüp (0+580-0+720)	35	35	20	0.905	0.0002	0.516	0.400	-0.007	0.129	53	599.99



Şekil 6. Sol tüp giriş portali stabilite analizlerine yönelik kaya kütlesi dayanımları (Hoek ve Brown, 1980 a,b)

Daha güvenli tarafta kalmak amacıyla, Hoek-Brown ölçütüyle hesaplanmış kaya kütlesi dayanımları düşürülmüş ve stabilite analizlerinde kullanmak üzere Çizelge 5'deki jeomekanik büyüklükler alınmıştır. Kürtün tünelleri için yapılan kaya kütlesi sınıflamaları, tünel portallerinin genellikle düşük-orta kaliteli kayaçlar içerisinde açılacağını göstermektedir.

Çizelge 5: Stabilite analizlerine esas yerinde kaya dayanımları

Km	Litoloji	Elastisite modülü E (kPa)	v	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m^3)	GSI
Sol tüp (0+280-0+580) Sağ Tüp (0+580-0+720)	Yamaç molozu	70.000	0.30	10	30	22	-
	Andezitik, bazaltik	600.000	0.25	130	40	26	35

Tünelde uygulanacak olan destek elemanlarının ve kaya destek sınıfları Bieniawski (1989)'ye göre belirlenmiştir. Ayrıca RMR ve Q sistemlerinin değerlendirmesine göre Kürtün tünellerinde uygulanması için önerilen Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) destek sınıfı da Çizelge 6'da verilmiştir

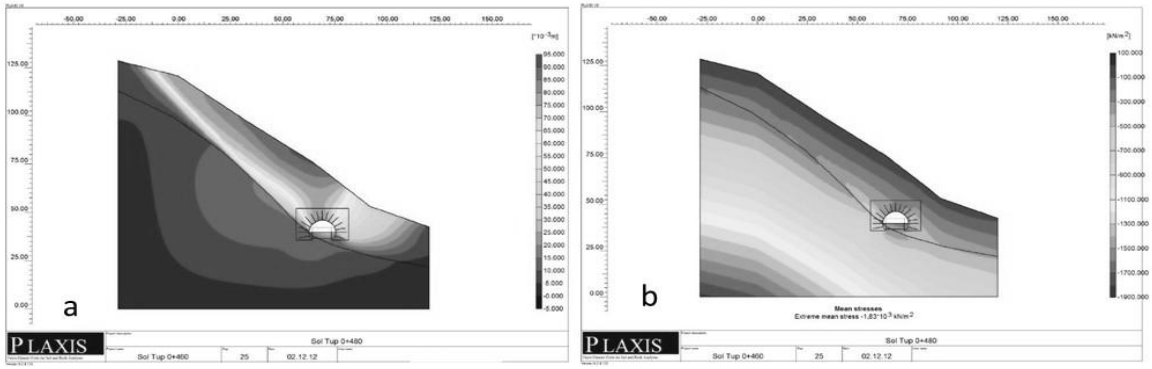
Çizelge 6. Kaya kütle sınıflamalarına göre önerilen destek sınıfları

Km	Litoloji	E (kPa)	c (kPa)	ϕ	GSI	RMR	Q	Destek Sınıfı	
								Bieniawski (1989)	KTŞ (Önerilen Klas)
Sol tüp (0+280-0+580)	Yamaç molozu	70.000	10	30	-	-	-	B3	B3 $_{Special}$
Sağ Tüp (0+580-0+720)	Andezitik, bazaltik kayaçlar	600.000	130	40	35	40	0.02-0.0618	B3	B3 $_{Special}$

Kohezyonun ve kayaç dokusundaki kenetlenmenin az olmasından dolayı yüksek yer değiştirmeler olabileceği sağ ve sol tüp giriş portallerinde, B3 özel destek sistemi uygulanacaktır. İç kaplama betonu donatılı olarak imal edilecektir. Kazı ilerleme boyu üst yarıda 1.2 m, alt yarıda 2.4 m'dir. Tünel imalatı ön sağlamlaştırmalı ve iyileştirmeli olarak ilerleyecektir. İç kaplama betonunun kazıyı takip etmesi ve halka kapanımının hemen sağlanması önerilmektedir. Kürtün tüneli giriş portalinde önerilen destekleme-sağlamlaştırma elemanlarını: NPI 160 çelik iksa, 25 cm, 14-15 adet L = 4-6 m uzunluğunda, Ø 28 mm, 1.5 m x 1.2 m ara ile SN bulon, çift kat Q221/221 çelik hasır, 25 cm püskürtme beton ve 40-69 cm kalınlığında iç kaplama betonu oluşturmaktadır.

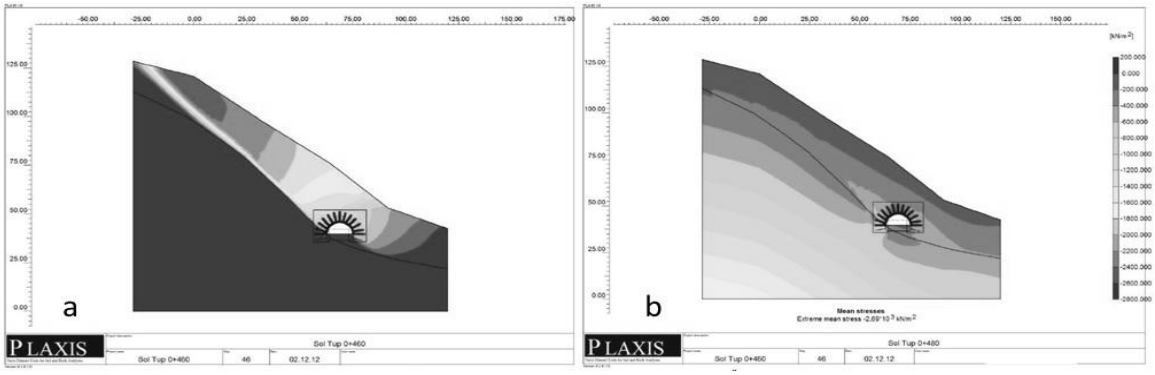
6. STABİLİTE ANALİZLERİ

Kürtün tüneli stabilite analizleri, sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis adlı yazılım kullanılarak yapılmıştır. Nümerik analizlerde kazı ve destekleme ayrı aşamalarda tanımlamış olup, her aşama için gerilmeler ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır. 290 m uzunluğundaki sağ tüp giriş portalinin 90 m'si bazalt içerisinde inşa edilecek olup, tünelin üzerindeki enjeksiyon ile % 70 oranında iyileştirilmiş yamaç molozu kalınlığı 40 m'dir.



Şekil 7. (a) Üst yarı kazısından sonra yer değiştirmeler, (b) kazı sonrası çekme gerilmeleri

Kazı sonrası yamaç molozunda bir gevşeme olmakta, ancak tüneli çevreleyen iyileştirilmiş zemin ve andezit gevşemeleri karşılayabilmektedir. Kazı sonrası yer değiştirmeler 9.1 cm'ye ulaşmaktadır (Şekil 7a). Tünel kazı alanı içerisinde tabanda 1830 kPa'lık çekme gerilmesinden dolayı yenilmeler beklenmektedir (Şekil 7b). Plastikleşen noktalar ise, çoğunlukla yamaç molozu içerisindedir.



Şekil 8. (a) Üst yarı desteklemesi sonrası yer değiştirmeler, (b) üst yarı destekleme sonrası çekme gerilmeleri

Tünel üst yarısında destek sisteminin uygulanmasından, denge koşulu oluncaya kadar yer değiştirmeler 2.34 cm düzeyine kadar çıkmaktadır (Şekil 8a). Yer değiştirmeler ağırlıklı olarak tünel tavanında ve yükün daha fazla olduğu sol duvarda etkili olmaktadır. Yamaç şevinde olabilecek yer değiştirmeler ve yenilmeler yamaç molozu ile sınırlı kalmakta, dolayısıyla şev duraysızlığı ana kaya

içerisine ve tünele ulaşamamaktadır (Şekil 8b). Tünel içerisinde plastikleşmeler daha çok iksa tabanlarında oluşmaktadır (Şekil 8c). Bunun önlenmesi için halka kapanımının hemen yapılması, alt yarı kazısının üst yarı kazısını kısa mesafelerde takip etmesi gerekmektedir.

7. YAMAÇ DESTEK BETONU UYGULAMASI

Kürtün tünelinde tünel doğrultusu yamacı verev yönde kestiği için bir alın şevi ve iki yan şev oluşturularak kazıya başlanması mümkün değildir. Giriş portalinin büyük kısmında yüzlek veren yamaç molozunun stabilite sorununa neden olması muhtemeldir. Giriş portalinin bir kısmında yüzlek veren kayaçlar ise çok ayrışmıştır. Tünelin tavan ve omuz kesimlerinde et kalınlığının düşük oluşu, kazı ve destekleme esnasında stabiliteyi etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Ayrıca tünel girişinde çok dik doğal şevlerin olması, kazı çalışmaları sırasındaki iş güvenliği riskini artırmaktadır.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı Kürtün Tüneli girişi için, portal bölgesi yamaç destek betonu ile desteklenmiştir. NATM tünelcilik yönteminin felsefesine göre; kayanın kendi yükünü taşıyabilmesi için tünel cidarına gelen yüklerin dağılımının homojen olması gerekir. Bu yüklerin eşit oranda dağılmaması durumunda deformasyon ve göçük kaçınılmaz olur. Yamaç tünelinde yükler, tünelin dağ tarafındaki şevine toplanmıştır. Bu yüklerin tünel çeperlerinde dağılımını ve sönümlenmesini sağlamak amacıyla kademeler halinde yamaç destek betonu tasarlanmıştır. Böylelikle tünel portal kesimlerinin maruz kalmış olduğu yük, tünel çeperine dağıtılmakta, deformasyon ve göçük riski en alt düzeye indirilmektedir.

8. SONUÇLAR

Kürtün Tüneli güzergahında yapılan sondaj çalışmaları, arazi ve laboratuvar deneyleri, kaya kütlesi sınıflamaları tünel portalinin bir kısmının zayıf-orta kaya kütlesi ortamında, bir kısmının da yamaç molozu içerisinde açılacağını göstermiştir. Yamaç molozu içeren portal kesimi konsalidasyon enjeksiyonu ile iyileştirilmiştir. Jeomekanik değerlendirmeler ve stabilite analizleri sonucunda tünel portalindeki kazı ve destek sistemi "B3 Özel" olarak belirlenmiştir. Kürtün Tüneli'nde tünel doğrultusunun doğal şevi verev yönde kesmesi, örtü kalınlığının az olması, litolojinin altere kaya ve yamaç molozundan oluşması nedeniyle donatılı yamaç destek betonu tasarlanmıştır. Kademeler halinde inşa edilen yamaç destek betonu uygulamasıyla tünel portal kesiminin maruz kalmış olduğu yük, tünel çeperine dağıtılmış, deformasyon ve göçük riski en alt düzeye indirilmiştir.

9. KATKI BELİRTME

Yazarlar, katkılarından dolayı TTS Müh. Müşv. Ltd. Şti'ne ve Cengiz İnşaat Köstere Deresi-Gümüşhane Şantiyesi teknik personeline teşekkür ederler.

10. KAYNAKLAR

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-236.

Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley and Sons, New York.

Hoek, E., Brown, E.T. 1980b. Empirical strength criterion for rock masses. Journal of Geotechical Engineering, 106(GT9), 1013-1035.

Hoek, E., Brown, E.T. 1980a. Underground Excavations in Rock. Instn Min. Metalurgy, London.

Hoek, E., Brown, E.T., 1988. The Hoek–Brown failure criterion 1988a Update. Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. University of Toronto, 31-38.

KTŞ (Karayolları Teknik Şartnamesi), 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü. 525.

Vardar, M., Karaoğlan, H. Koçak, C., 2005. Tunnel portal problems in landslide areas in Black Sea Highway Project-Turkey, underground space use. analysis of the past and lessons for the future, two volume set. Proceedings of the International World Tunnel Congress and the 31st ITA General Assembly, Istanbul, Turkey.

Yeni Zigana Tünel Güzergâhındaki Olası Fay ve Kırıkların Audio Manyetotellürik Yöntem (AMT) İle Araştırılması

The Investigation of Possible Faults and Cracks in New Zigana Tunnel Route with Audio Magnetotelluric Method (AMT)

N. Demirbaş[1,*], A. Sayın[1], E. İçöz[2], E. G. Yurtkal[2]

[1] Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü AR-GE Başmühendisliği 61130Yıldızlı Trabzon
[2] Su-Met Yerbilimleri İzmir
*(*nuh_demirbas@hotmail.com)*

ÖZ: Karadeniz tektonik kuşağının Kuzey Doğu bölgesinde yer alan Zigana Dağı, Trabzon-Gümüşhane sınırları arasında sahile paralel uzanan 2000-3500m yüksekliğindeki sıra dağların arasında 2032m yüksekliğindedir. Karayolu ulaşım hizmetlerinin standartlarındaki gelişmeler, bilhassa sis, kar ve buzlanma ile mücadele maliyetinin düşürülmesi ve yakıt sarfiyatının azaltılması amaçlamaktadır. Bu amaçla, Trabzon-Gümüşhane Devlet Karayolunun (45+180-59+397 km) arasında karla mücadeleye başlanılan sınır kotlarından girilerek 12 km uzunluğunda çift tüplü 2*2 şeritli yeni bir tünelin projelendirme çalışması yapılmıştır. Bu projeyle Trabzon–Gümüşhane arası mesafe 10 km kısalacaktır. Tünel hattının doğal topografyası ile tünel kırmızı kotu arasında 700-900 m kot farkı olması gibi nedenlerden dolayı, jeofizik yöntemlerden biri olan Audio Manyetotellürik (AMT) yöntem ile 10 noktada 115 metre aralıklarla araştırma yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ile çalışılan alanın 2D özdirenç ve özdirenç değerleri 200-700 ohm arasında değiştiği belirlenmiştir. AMT yöntemi ve diğer çalışmalardan elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesiyle 1200 m derinliğe kadar olan jeolojik yapı modellenerek ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Zigana Tüneli, Faylar, Jeolojik Model, AMT

ABSTRACT: *Zigana Pass is located in the northwestern region of the Black Sea tectonics belt, between Trabzon and Gümüshane province borders. The mountain elevation's are about 2032 m above sea level. Improvements in the standard of road transport services, particularly fog, snow and ice with removal will provide the reduction of fuel consumption and cost. For this purpose, A new tunnel project work has been done between Trabzon-Gümüşhane highway in distance of 12 km and double tube 2*2 lanes. The distance between Trabzon and Gümüşhane province will be 10 km shorter when this project will be finished. Geological structures and possible cracks and faults have a big importance in determination of the tunnel route and excavation methods for the new tunnel. Sudden changes in topography an route of new the Zigana Tunnel, high levels of burden thickness and difficulties in transportation required to use of various survey methods. The Audio Manyetotelluric method, one of the geophysical methods was used because of transportation difficulties in topography which ranges from 52+900 km to 53+900 km along the tunnel route and because elevation is 700-900 m more higher than the tunnel axis. A total of ten measurements were taken, one every 115 m. Finally, 2D resistivity section were obtained from AMT data and resistivity values are changed between 200 and 700 ohm. According to these results, geological structures, from surface to depths of below 1200 m, at the survey site were revealed by the help of AMT method and other studies.*

Keywords: *Zigana Tunnel, Faults, Geological Model, AMT*

1. GİRİŞ

Tünel açmak için yapılan kazılarda, kazı yönteminin, ilk destekleme işleri için çalışma alanında bulunan jeolojik birimlerin ve kritik bölgelerinin (fay zonu, zayıflık zonu, yeraltısuyu, vb.) tespit edilmesi büyük bir öneme sahiptir. Jeofizik yüzey araştırması teknikleri arasında, Audio Manyetotellürik (AMT) yönteminin özellikle ulaşımı ve topografik nedenlerle çalışılması zor alanlarda, derin jeolojik yapıyı belirlemede etkili olduğu birçok çalışmada kanıtlanmıştır (Zhiguo vd.,

2008; Zhiping vd., 2010). Ekipmanların küçük boyutlu olması, mobilizasyon kolaylığı, topografyadan az etkilenmesi, düşük maliyet avantajları ve zaman kazanımı ile araştırmaların yapılabilmesi bu tür çalışmaları oldukça değerli bir seçenek haline getirmiştir.

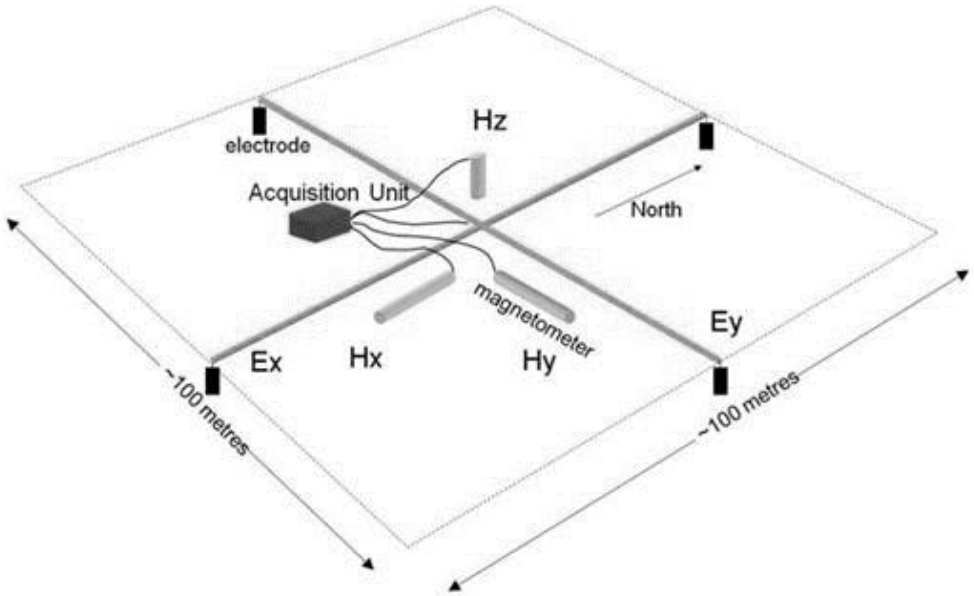
Günümüzde manyetotellürik(MT)yöntem bir hayli geniş ve aynı ölçüde çeşitlilik gösterebilen uygulama yelpazesinde kullanılabilen temel ve güvenilir bir yöntemdir. Bu aralık, kabuk ve üst mantoyu hedefleyen çok derin ve çok geniş ölçekteki çalışmalardan, petrol ve jeotermal sistemlerini ortaya çıkarmaya yönelik çok çeşitli uygulamalara ve maden yataklarının, endüstriyel ham maddelerin, tünel ve yeraltısularının aranması uygulamalarını da içine alabilecek kadar değişiklik göstermektedir. MT yöntem, yukarıda bahsedilen uygulamaların birçoğunda, diğer başka bir metodun uygulanması ile elde edilemeyen birçok parametreyi de araştırmacıya sağlamaktadır.

Bu çalışmada, T.C. Karayolları 10. Bölge Müdürlüğünce, Kasım 2013 tarihinde, Yeni Zigana Tünelinin, Jeolojik-Jeoteknik etüt çalışmaları kapsamında, tünelin, 52+900 - 53+900 km'leri arasındaki topografik olarak çalışılması zor (dağlık, ulaşımım sağlanamadığı, uzak bölgelerde) alanında bulunan bir kilometrelik mesafede 10 adet Audio Manyetotellürik (AMT) Yöntem ölçüsü alınmıştır. Tünel kotunun yaklaşık 700-900 müzerinde alınan tüm ölçümler değerlendirilmiş ve sonuçları yorumlanarak çalışılan alanın özdirenç kesiti oluşturulmuştur. Yüzeyden yaklaşık 1200 m derinliğe kadar olan alanın jeolojik yapısı aydınlatılmaya çalışılmıştır.

2. YÖNTEM

MT yöntem, çoğunlukla güneşten kaynaklanan, belirli geniş aralıktaki (genellikle düşük frekanslı) manyetik alanları ve bu alanların oluşturduğu akım sistemlerini kaynak olarak kullanan, doğal kaynaklı bir araştırma yöntemidir. "Manyetotellürik" ve "Tellürik" terimleri, genellikle, ayrı ayrı bu manyetik alan ve akımları tanımlamak için özel olarak kullanılan sözcüklerdir. AMT yöntemin çalışma prensibi MT yöntem ile aynıdır. Kullanılan frekans bandı (10 KHz-1Hz) daha yüksek olduğundan daha sığ araştırma derinliğine sahiptir. Araştırılan sahanın ortalama özdirencine göre araştırma derinliği 30m den 2-3 km derinliğe kadar değişebilir. MT alanın kaynağı değişik olaylara bağlı olarak atmosferde, iyonosferde veya manyetosferde bulunur. Yer manyetik alanın genliğindeki en zayıf değişim 1 Hz civarındadır. İyonosfer ve manyetosferde oluşan frekansı 1 Hz' den büyük değişimler yere ulaşamadan iyonosfer içinde soğurulduğundan, bu sinyallerin kaynağı atmosferde oluşan yıldırım ve şimşeklerdir. Frekansı 1 Hz' den küçük elektromanyetik dalgalar ise güneşten gelen yükler ile manyetosfer sınırındaki girişimlerden oluşur.

MT yöntemde, dik koordinat sisteminde doğal elektrik alanın iki bileşeni (E_X, E_Y) ve manyetik alanın üç bileşeni (H_X, H_Y ve H_Z) ölçülür. AMT ölçü düzeneği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 1). Manyetik bileşenler, tellürik bileşenlere nazaran daha karmaşık bileşenlerdir. 0.00001 Hz - 1 Hz arasındaki uzun periyotları ölçmek için 50 000 veya daha fazla sarmaldan oluşmuş bobinler kullanılır. Manyetotellürik bileşenler ile her bir istasyonda manyetik alanın üç bileşeni (H_X, H_Y ve H_Z) ölçülür. Yataydaki iki bileşen (H_X, H_Y) tellürik bileşenler ile aynı doğrultulardadır. Üçüncü bileşen (H_Z) düşey konumda yerleştirilir. Bu bobinler, MT düzeneğinin en kritik parçalarıdır. (Başokur, 2008). Çoğunlukla sığ bir çukura gömülmeleri gereklidir. Çünkü; rüzgar, ağaçlık alanlar ve trafik gibi çok küçük partikül hareketlerine neden olan olaylar bile gürültüye yol açmaktadır. Diğer bozucu etmenler, aktarma hatları, elektrikli trenler, galvanize boru hatları, su pompalarıdır.

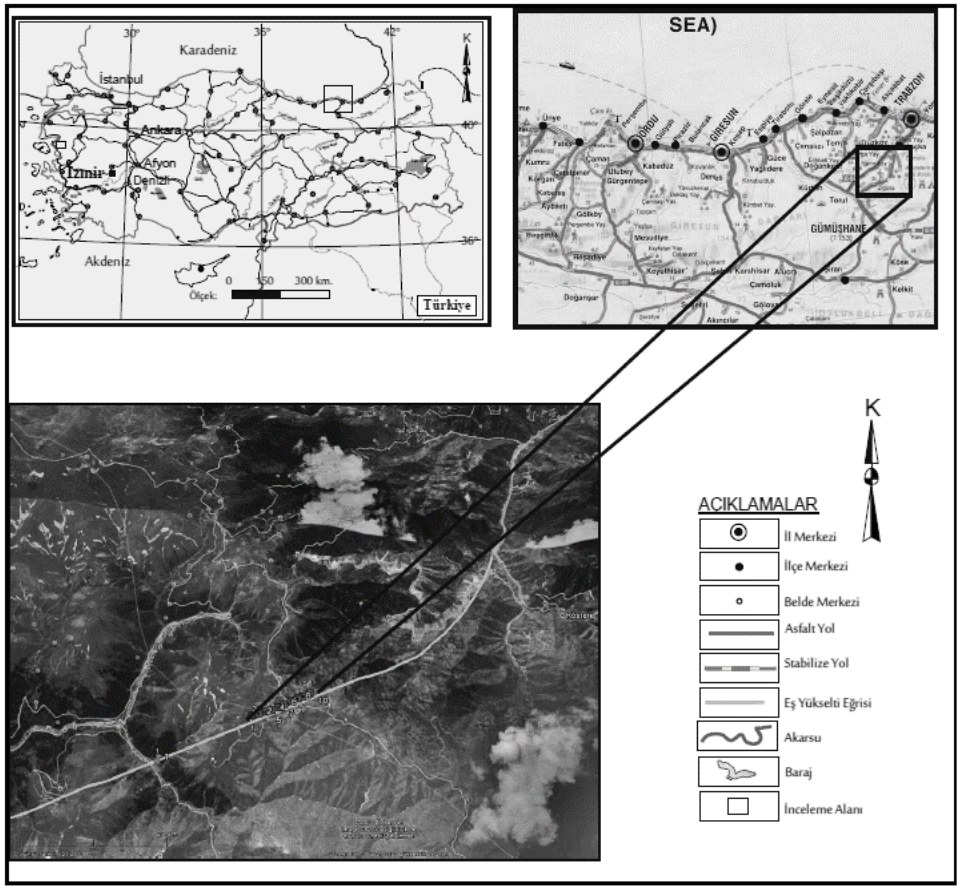


Şekil 1. AudioManyetotellürik (AMT) yöntem arazi ölçü alma düzeneği (URL 1)

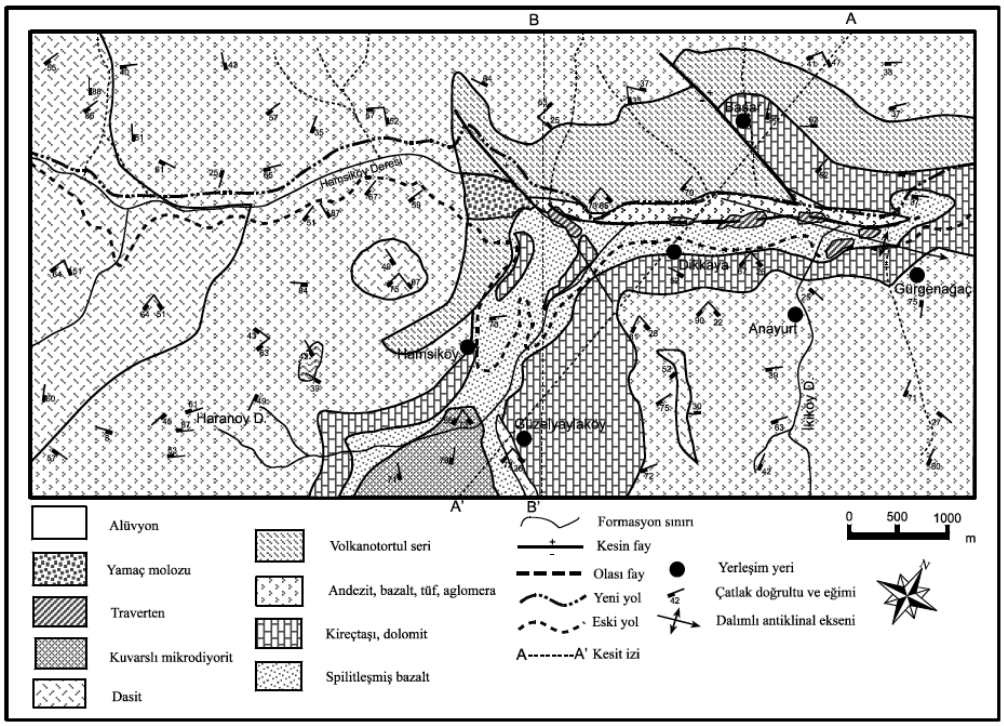
3. ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI VE GENEL JEOLOJİSİ

Çalışma alanı, Trabzon İli Maçka İlçesi ile Gümüşhane ili Torul ilçesi sınırları içerisinde olup, Zigana dağlarında yaklaşık 2200 m yükseklikte yer almaktadır (Şekil 2). Saha, Trabzon merkezinin 50 km, Maçka ilçesinin 25 km kadar güneybatısında Gümüşhane-Trabzon il sınırında yer almaktadır. Çalışma alanı yakınlarında Hamsiköy ve Kadırga yaylası bulunmaktadır. Eski Trabzon-Gümüşhane yolunun Zigana geçidi, çalışma alanının 3.5-4 km kadar doğusundadır. Sahaya, yaylaların ulaşımını da sağlayan stabilize yolla ulaşılabilmektedir. Çalışma alanı, çoğunlukla yüksek eğimli yamaçlardan oluşmaktadır. Ortalama yükselti 2250 metredir.

Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı birimlerin yüzeylendiği inceleme alanında, Liyas'tan başlayarak Eosen sonlarına kadar gelişimini sürdüren mağmatizmanın ürünlerini içeren volkano-tortul, volkanik ve intrüzif fasiyesler yaygındır. Magmatik faaliyetlerin durakladığı dönemlerde ise tortul istifler birikmiştir. Çalışma alanında kuzey zona ait, Liyas yaşlı bazalt, andezit, piroklastik, kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan Hamurkesen formasyonu, Üst Jura-Alt Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Berdiga formasyonu, Üst Kretase yaşlı bazalt, andezit, piroklastik, kumtaşı, marn vb. kaya türlerinden oluşan Çatak formasyonu, dasit, riyodasit ve piroklasiklerden oluşan Kızılkaya formasyonu, bazalt, andezit, piroklasik ve kırıntılı kayaçlardan oluşan Çağlayan formasyonu, riyolit, riyodasit ve piroklastiklerden oluşan Çayırbağ formasyonu, Maastrihtiyon-Paleosen yaşlı kireçtaşlarından oluşan Ağıllar formasyonu, aynı yaşta kumtaşı, marn ve kumlu kireçtaşlarından oluşan Bakırköy formasyonu ile Eoson yaşlı andezit, bazalt, piroklastik ve kırıntılı kayaçlardan oluşan Kabaköy formasyonu yüzeylenir. Üst Kretase dönemi boyunca Doğu Pontidler'in Kuzey zonunda gelişen aktif volkanizma sonucu bazik ve asidik karakterli lavların düzenli ardalanmasının oluşturduğu kalın bir volkano- tortul istif birikmiştir. Bu istifin ilk evredeki bazik lavları Çatak, asidik lavları Kızılkaya, ikinci evredeki bazik lavları Çağlayan, asidik lavları Çayırbağ formasyonlarını oluşturur. Çalışma alanı bu birimlerden, Berdiga formasyonu, Çatak formasyonu ve Kızılkaya formasyonunu içermektedir (Şekil 3).



Şekil 2: Çalışma alanının yer bulduru haritası



Şekil 3. Çalışma alanının jeolojik haritası (URL2)

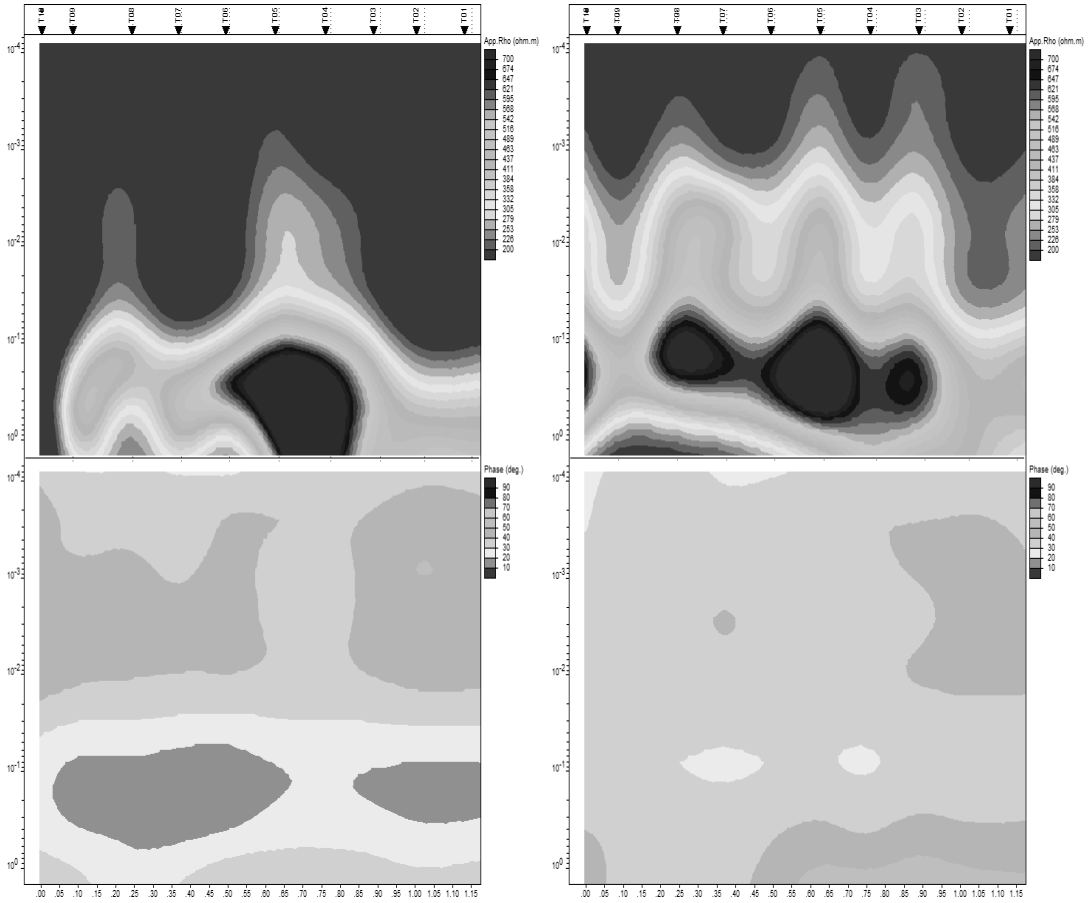
4. VERİ TOPLAMA VE DEĞERLENDİRME

Arazi çalışmaları sırasında, Kanada Phoenix firması tarafından üretilen MTU-5A cihazı kullanılmıştır.Ekipman; manyetik alan algılayıcıları (bobinler), sensör işlemciler, elektrik alan algılayıcıları, alıcı ve bilgisayar olmak üzere başlıca beş kısımdan oluşmaktadır. Alıcı olarak kullanılan MTU-5A aleti 5 kanallıdır. Bu kanallardan iki tanesi elektrik alan bileşenlerini ölçmede kullanılır. Diğer üç kanal ise manyetik alan ölçmelerinde kullanılır. Manyetik sensör olarak AMT ölçümlerinde, AMTC30 tipi bobinler kullanılmıştır. Bu bobinler 10000 Hz ve 1 Hz arasındaki frekanslarda yüksek kaliteli manyetik verileri ölçebilen yaklaşık 3 kg ağırlığında ve 82.5 cm boyutlarındadır.. Sistemin 5 kanallı olmasından dolayı, bir MT istasyonunda beş ana bileşen (E_X ,E_Y, H_X, H_Y, H_Z) olarak ölçülebilmektedir. Bir dahili işlemci yardımıyla, ölçülen parametreler, gerçek zamanda hesaplanabildiği gibi, zaman serisi verileri de alıcı ile birleştirilen bir dizüstü bilgisayar aracılığı ile kayıt edilebilmektedir.

Çalışmalara başlamadan önce manyetik sensör ve alıcı ekipmanlarına kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Daha sonra tünel profil üzerinde, toplam 10 istasyonda AMT ölçüleriyle, veri toplanmıştır (Şekil 4). Arazi yerleşimi sırasında, elektrik alan x ve y dipolleri arasındaki uzaklık 50 m alarak seçilmiştir. Her ölçü noktasında 2 saat boyunca AMT ölçüleri alınmıştır. Alınan ölçülerin sinyal gürültü seviyeleri günlük olarak incelenmiştir. Noktalar arası mesafe, ortalama 115 m olacak şekilde bir hat boyunca 1150m'lik bir profil oluşturulmuştur.

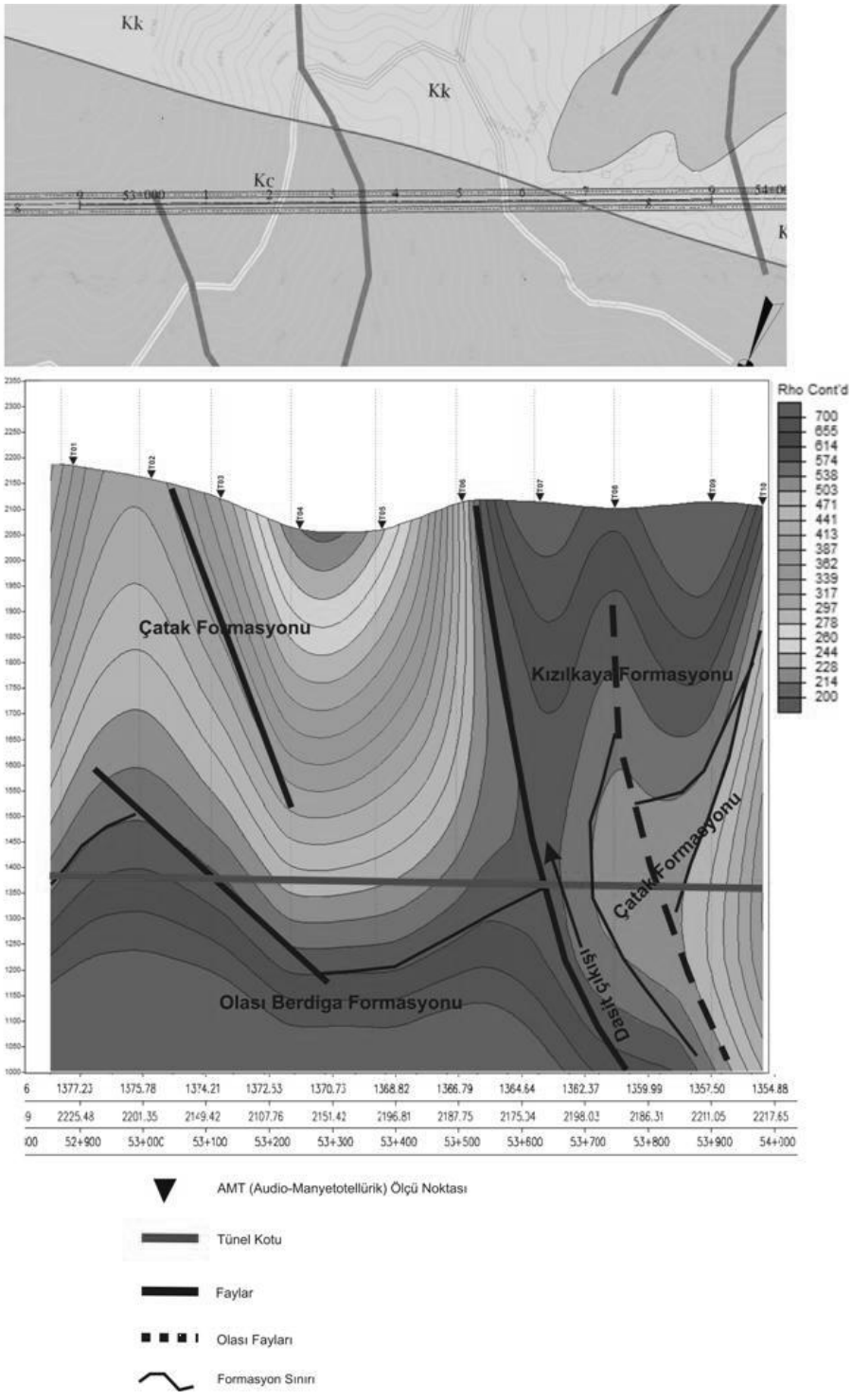
Şekil 4. AMT ölçü noktalarının konumları

Tabakalı bir ortamda ölçülen görünür özdirenç değerleri, elektrik ve manyetik alanlarının yönlerine bağımlı değildir. İki-boyutlu ve üç-boyutlu ortamlarda ise durum tabakalı ortamlara göre değişiklik gösterir **(**Ercan,1981**).** Eğer bir yatay eksen boyunca (burada x ekseni alınmıştır) ortamın özdirenci sabit ise, birbirinden ayrı iki elektromanyetik mod vardır. Bunlar TE (TE-Transverse Electric veya E-paralel) ve TM modlarıdır (TM-Transverse Magnetic veya H-paralel)**.** Yeni Zigana Tüneline ait TE ve TM modları için ölçülen ve kuramsal verilerin görünür özdirenç ve empedans fazı yapma kesitleri sırasıyla verilmektedir (Şekil 5a, b).



Şekil 5. (a) Zigana kesiti Rho- Faz TE modu (b) Zigana kesiti Rho- Faz TM modu

Çalışma alanında 10 noktada alınan ölçümler sonucu elde edilen özdirenç kesiti (Şekil 6), AMT-1 nolu ölçüden başlayarak AMT-10 ölçüsüne yaklaşık doğu-batı doğrultulu ve 1150 m'lik bir hat üzerinde 115 m'lik ölçü aralığıyla oluşturulmuştur. Ölçü noktalarının en yüksek kotu 1 no'lu noktada olmak üzere 2203 metredir. Oluşturulan özdirenç kesiti, en yüksek 2203 ile 1000 m seviyesi aralığını göstermektedir. Böylece, 1200 m kalınlığında bir kesit oluşturulmuştur. Yapımı planlanan tünel kotu ise 1350m -1400 m seviyesi arasında ve hafifçe batıya doğru eğimlidir.



Şekil 6. Zigana tünel için yorumlanmış 2B AMT özdirenç kesiti

AMT verisinin ters çözümü için Win Glink programı kullanılmış ve elde edilen 2 boyutlu özdirenç model kesitinde özdirenç aralığının 200-700 ohm arasında değiştiği belirlenmiştir. Şekil 6'da kırmızı renkler en düşük özdirenci, yeşil renk orta yüksek özdirenci ve mor renkler en yüksek özdirenci temsil etmektedir. Kesiti incelediğimizde, tünel kotunu yaklaşık 53+100, 53+650 ve 53+850 m'lerde kesen 3 fay yorumlanmıştır. Bu fayların tümü, batı-kuzeybatı eğimlidir. Bu eğimler, gerçek eğim olmayıp, kesit doğrultularındaki izdüşümleridir. Özdirenç dağılımlarına göre, kesit boyunca üç farklı formasyon ayrımlanmıştır. En düşük özdirençlerle temsil edilen Çatak formasyonu**(**Üst Kretase yaşlı bazalt,

andezit, piroklastik, kumtaşı, marn**)** ve her ikisi de yüksek özdirençle temsil edilen, üstte Kızılkaya formasyonu ve altta (olası) Berdiga formasyonu. Berdiga formasyonu (Üst Jura-Alt Kretase yaşlı kireçtaşları), kesitin tabanında ve doğu bölgesinde görülür. Yataya yakın dalgalı bir üst topografya sergiler. Bir bölümü, tünel kotuna kadar yükselmiş görünümdedir. Doğuda ve batıda bulunan iki fay ile batı blokları düşmüş ve tünel kotunun altına itilmiştir. Yüzeyde ve kesitin batı kesimi dışındaki büyük bölümünde görülen Çatak formasyonu, yüzeyden tünel kotuna kadar devam eder. Doğu bölgesinde, kendi içinde gelişmiş bir faylanma bulunan bu formasyonun batı bölümünde bulunan diğer bir fay ile kesildiği ve Kızılkaya formasyonu ile faylı bir dokanak oluşturduğu izlenir. Kızılkaya formasyonu (riyodasitik, dasitik lav ve piroklastlar) ise aynı zamanda Berdiga formasyonunu da kesen bu fay boyunca yükselip yayılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, AMT ölçü noktalarından elde edilen özdirenç kesiti boyunca, üç fay ve bir olası fay saptanmıştır. Bu fayların hepsinin doğrultuları batı veya kuzeybatıyadır (kesit doğrultusunun batısına doğrudur). Faylardan üçü, tünel kotunu kesmektedir. Tünel kazı çalışmaları sırasında bu faylara dikkat edilmelidir. Elde edilen kesitte, üç farklı formasyonun ayırımı yapılmıştır. Bunlar, olası Berdiga formasyonu, Çatak formasyonu ve Kızılkaya formasyonudur. Olası Berdiga formasyonu, kesitin kuzeydoğu bölümünde tünel kotuna kadar yükselmiştir. Tünel, kuzeydoğudan güneybatıya doğru sırasıyla, Berdiga formasyonunu, Çatak Formasyonunu, Kızılkaya formasyonunu ve olasılıkla yeniden Çatak formasyonunu kesecektir. Berdiga formasyonuna ait kireçtaşları, Güney zonda daha mikritik, orta tabakalanmalı, yersel plaketsi görünümlü ve pelajik karakterlidir.tünel açımı sırasında mühendislik problemlerine (sökülebilirlik, aşırı sökülme, aşırı su gelişi vb.) neden olabilecektir.Bu nedenle, tünel ekseni boyunca jeofizik AMT ölçüleri alınarak bu formasyonun tünel kotundaki devamlılığı ve sürekliliği araştırılmalıdır. Zigana dağları, büyük tektonik etkilerle oluşmuştur. Bu nedenle, tüneli kesebilecek çok sayıda fay bulunacağı açıktır. Tünel ekseni boyunca, bu fayların varlığı Jeofizik AMT ölçüleriyle belirlenmelidir.

5. KATKI BELİRTME

Katkılarından dolayı Petek Müh. Müşv. Ltd. Şti'ne, Cengiz İnşaat Köstere Deresi-Gümüşhane Şantiyesi teknik personeline ve Dr. Ali Erden BABACAN'a teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

Başokur, A.T.,2008. Manyetotellürik yöntemde temel kavramlar.Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ders Notları.

Ercan, A.,1981. Manyetotellürik yöntem. İTÜ, Maden Fakültesi, Ders Notları.

URL-1, 2015. http://enerjeo.com/geop/?page_id=887.

URL-2, 2015. http://web.deu.edu.tr/fmd/s20/20-04.pdf.

Yurtkal, G.E.,İçöz, E., 2013. Zigana AMT raporu. SÜMET Yerbilimleri.

Zhiguo, A.N. , Qingyun, D.I.,GuangjieG., 2008**.** Analytical study on rock property of long-deep tunnel with csamt method.Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, S1.

Zhiping, C.,Dejiu, C., Zhaoxiu, Z., Xingjun, Y., 2010**.** Application of high frequency magnetotelluric method in Chimushan tunnels. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, S2.

Sirkeci İstasyonu Pilot Tünel Kazılarına Bağlı Gelişen Yüzey Deformasyonlarının Değerlendirilmesi

Assessment of Surface Deformations Induced by the Pilot Tunnel of Sirkeci Station

C. Topal[1], Y. Mahmutoğlu[2,*], G. Şans[2]

[1] *Borddrill Sondaj Müteahhitliği, Ankara-Türkiye*
[2] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul-Türkiye*
*(*yilmazm@itu.edu.tr)*

ÖZ: Marmaray Projesi'nin bir parçası olan Sirkeci İstasyonu kazıları, projesinde ön görülen nihai kesitlerde açılmadan önce, aynı hatlar boyunca önden giden daha küçük çaplı tünel (pilot tünel) kazıları ile araştırılmıştır. İstasyonun antik bir yerleşim alanında bulunması, buradaki yapı stokunun yeterli mühendislik hizmeti almamış olması, çoğu yapının eski ve yıpranmış olması nedenleriyle, bölgede mevcut yerüstü ve yeraltı yapılarının çok aşamalı yeraltı kazılarından etkileneceği düşünülmüştür. Bu nedenle kazıların yüzeye erişebilecek olumsuz etkileri, oluşturulan ölçüm ağı ile denetlenmiştir. Pilot tünel kazı aynalarından elde edilen mühendislik jeolojisi verileri ile bu kazıların yüzeye yansıyan etkileri birlikte değerlendirilmiş ve uygulamaya aktarılabilmiştir. Kazı aynalarında yapılan ölçüm ve gözlemlerle geçilecek ortam tünel mühendisliği açısından sınıflandırılmış ve kazı destek sistemleri öngörülmüştür. Bu çalışmada, yüzey izleme verileri değerlendirilmiş ve pilot tüneller, kuyu ve giriş yapılarından oluşan aşamalı kazıların birbirleriyle etkileşimleri irdelenmiştir. Sonuçta kritik ortam koşullarında sığ kent içi yeraltı kazılarının önceden açılacak daha dar çaplı, önden giden kazılarla denetlenmesinin yararlı olacağı görülmüştür. Bu uygulamayla, özellikle birden fazla, birbirine yakın kazının olumsuz etkileşiminin doğuracağı olumsuzlukların önceden kestirilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Marmaray Projesi, Sirkeci İstasyonu, Pilot Tünel, Yüzey İzleme

ABSTRACT: *The underground openings of the Sirkeci Station belongs to Marmaray Project at the western side of Bosphorus were investigated in detail by pilot tunnels before the excavations of main railway tunnels at their project size. The aim of these pilot tunnel excavations are to determine the properties and to assess behaviors of geological environment being a basement of an antic and heavily urbanized area. Another reason is the potential problems would be result in by multiple excavations close to each others. The surface subsidence during excavations of shafts and pilot tunnels were monitored by a monitoring net which consists of various measuring techniques. In this paper, at the first step, only the data obtained from the surface monitoring points were evaluated by taking into account the ground conditions and the nature of engineering applications. Then the performance of same engineering geological model is analyzed by finite element method. As a result it was concluded that potential geotechnical problems which would be arise at excavation step can be recognized before similar applications.*

Keywords: *Marmaray Project, Sirkeci Station, Pilot Tunnel, Surface Monitoring*

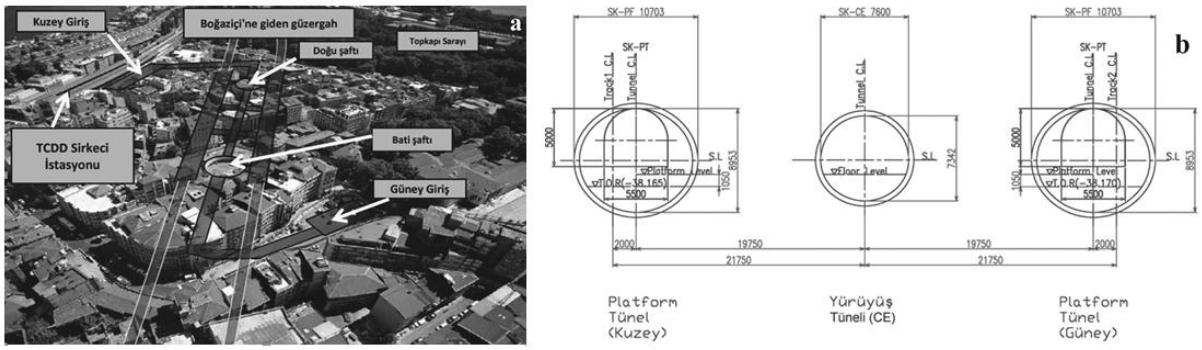
1. GİRİŞ

Marmaray Projesi, ülkemizde son yıllarda gerçekleştirilen en önemli altyapı projelerinden birisidir. Bu proje, Avrupa yakasında Halkalı ile Asya yakasında bulunan Gebze ilçelerini banliyö demiryolu sistemiyle bağlamak amacıyla İstanbul'daki banliyö demiryolu sisteminin iyileştirilmesi ve Demiryolu Boğaz Tüp Geçişi inşasına dayanmaktadır. Bildiride; Marmaray Projesi'nin bir parçası durumundaki Sirkeci İstasyonu'nun kazılarından önce ortam koşullarını daha doğru ve eksiksiz tanımlamak ve istasyon kazılarının yüzeyde bulunan yapılara olası etkilerini önceden kestirmek amacıyla açılan pilot tünel kazıları değerlendirilmiştir (Şekil 1).

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, özellikle yüzeye yakın, sığ yeraltı kazılarının etkilerinin yüzeye kadar erişebileceği bilinmektedir. Aynı ortamda birbirine yakın birden fazla kazının birbirini etkileyebileceği, önceden oluşturulan kazının ortamda örselenmeye neden olabileceği bilinmektedir (Peck, 1969; Cording ve Hansmire, 1975; Arıoğlu vd., 2002; Güven, 2008). Son yıllarda makine ile açılan birbirine paralel ikiz tünel uygulamaları geometrik özellikleri, derinlikleri ve birbirine göre konumları ile ortam koşulları birlikte değerlendirilerek kazıların birbirine ve jeolojik ortama olumsuz etkileri detaylı olarak tartışılmıştır (Suwansawat ve Einstein, 2007; Chehade ve Sharour, 2008; Mahmutoğlu, 2011).

İstasyon tünelleri açılmadan önce önden giden daha küçük kesitli tüneller açılmıştır. Nihai kesitin Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'ne göre genişletilmesi planlanmıştır. İstasyon tünelleri daha sonra Kazlıçeşme'den gelen ve makineyle açılan tüneller ile Sarayburnu'nda batırma tüpler ile birleştirilmiştir. Platform tünellerinin üst yarısında açılan at nalı geometrisine sahip pilot tünellerin tabandaki genişliği 5,5 m, yüksekliği ise 5 m'dir (Şekil 1). İki tünelin merkezi arasında 39,5 m mesafe bulunmaktadır.

Pilot tünellerin açımı; öngörülen profilin kazılması, ölçeklendirilmesi ve traşlanması, kazı aynasının haritalanması, iksa ve çelik hasırın yerleştirilmesi, püskürtme beton uygulanması ve son olarak bulon çakma işleminin gerçekleştirilmesi adımlarından oluşur. Kazı ilerlemesi 1 m olarak projelendirilmiş, ancak gerekli görüldüğü yerlerde bu mesafe kazı emniyetini sağlayacak şekilde değiştirilmiştir. Kazı sırasında ve sonrasında tünel aynasının duraylığını sağlamak için aynada geçici olarak göbek bırakılmış ve kazı boşluğu mümkün olduğunca hızlı bir şekilde desteklenmiştir. Desteklenen kesitten bir sonraki kazı adımına geçmeden önce gerekli görüldüğü yerlerde süren uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama ile tavanda kazı sırasında oluşabilecek kavlak ve düşmeleri engellemek, kazı ortamı güvenliğini sağlamaktır.



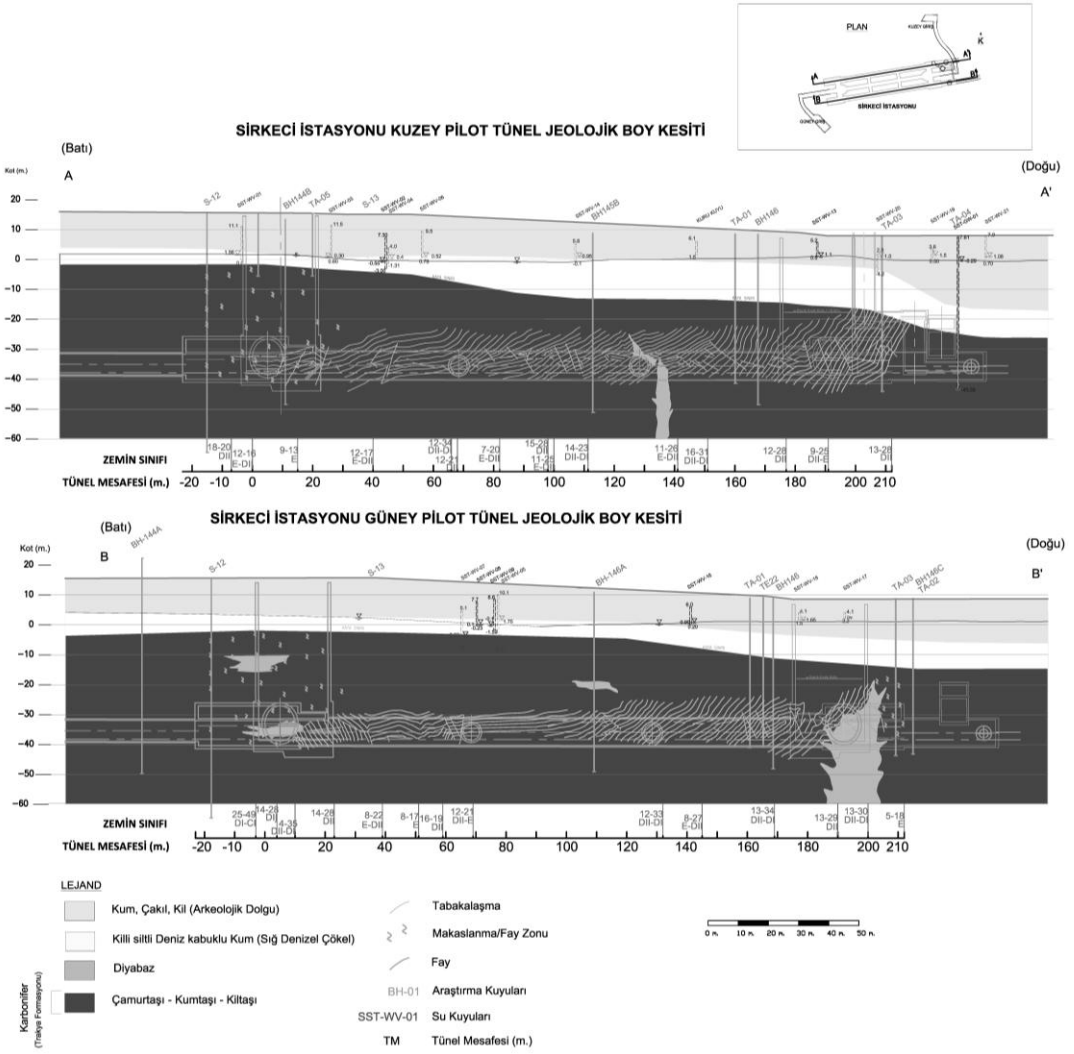
Şekil 1. Sirkeci İstasyonu'nun konumu ve istasyona ait yeraltı kazıları (a), peron ve platform tünelleri ile pilot tünellerin birbirine göre konum ve geometrileri (b).

2. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

2.1. Mühendislik Jeolojisi Modeli

İnceleme alanında, istasyon kazılarına başlamadan önce kazı ortamının mühendislik jeolojisi modelinin ortaya konması için derinlikleri 24-72 m arasında değişen 8 adet sondaj gerçekleştirilmiş ve bu sondajlara göre oluşturulan model, pilot tünel kazılarından elde edilen bilgiler kullanılarak revize edilmiştir. Yüzey ve yeraltı araştırmalarından, Sirkeci İstasyonu'nun yerleştiği bölgede birbirinden farklı üç ayrı birim belirlenmiştir. Bu birimler alttan üste doğru; Alt Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu, Kuvaterner yaşlı siltli kumlu kıyı çökelleri ve arkeolojik nitelikte antik dolgu şeklinde sıralanmaktadır. İstasyon kazılarının bulunduğu bölgede, kuzey ve güney platform tüneli eksenleri boyunca alınan jeolojik kesitler Şekil 2'de verilmiştir.

Pilot tüneller ve istasyon tünellerinin tümü Trakya Formasyonu içerisinde kalmıştır. Alt karbonifer yaşlı bu birim, kazı kotuna karşılık gelen derinliklerde genellikle orta-ileri düzeyde ayrışmıştır. Ayrışan kesimler sarımsı kahverengi, taze yüzeyleri kurşuni-gri renktedir. Genellikle az-orta ayrışmış, zayıf kaya niteliği taşıyan birimde egemen litolojiyi şeyl oluşturur. Tünel düzeyinde, Trakya Formasyonunu kesen diyabaz dayklarıyla da karşılaşılmıştır (Şekil 2). Sondajlardan ve kuyu kazılarından Trakya Formasyonunu karasal kırıntılardan oluşan plaj ve kıyı çökellerinin örttüğü görülmüştür. Kuvaterner dönemine ait bu birimi yumuşak-sert killer ile deniz kabuğu içeren orta-iyi boylanmış kumlar oluşturur. Kalınlığı doğuya doğru (Marmara Denizi yönünde) artmakta olup, deniz seviyesine göre +4 kotu ile -15 m kotu arasında görülür (Şekil 2).



Şekil 2. Kuzey (A-A') ve güney (B-B') pilot tünellerinin jeoloji boy kesitleri

İstasyonun yerleştiği denize kıyı bölgede, en üstte arkeolojik dolgu yer almaktadır. Birim; iri kaya parçaları, çakıl, kum, deniz kabuğu, ağaç parçaları, beton parçaları, tuğla ve kent kaynaklı yapay malzemeler içermektedir. Dolgunun hemen altında pek çok noktada karşılaşılan kıyı çökellerinin yüksek oranda organik madde ve deniz kabuğu içerdiği anlaşılmıştır. Kıyı çökelinin hemen hemen tamamı, arkeolojik dolgunun ise doğuda kısmen suya doygun olduğu belirlenmiştir. Sirkeci istasyonuna ait yeraltı kazılarının kotlarına göre, yeraltı suyu seviyesi pilot tünel eksen kotunun 35-40 m üzerindedir.

2.2. Pilot Tünel Kotlarındaki Ortamın Özellikleri

Sirkeci İstasyonu'nun kazı ve destek sistemleri belirlenmeden önce bölgede farklı tarihlerde, birçok araştırma sondajı açılmıştır. Kuzey ve güney istasyon tüneli eksenine yakın noktalarda açılan bu sondajların tünel boy kesiti üzerindeki yerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu sondajlardan alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Sirkeci İstasyonu inşaatı Japon Taisei firması tarafından gerçekleştirilmiştir. İstasyon kazılarının kazı ve destek sistemlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan kaya sınıflaması Japon Otoyol Kamu Şirketi'ne göre yapılmıştır. Bu sınıflandırma sisteminde dikkate alınan parametreler için sayısal değerler Çizelge 3'de, sınıflamanın RMR ve Q sistem ile karşılaştırması ise Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki boy kesitlerin altında, üstte RMR değerleri sayı ile belirtilmiş, altında ise bu sınıflamaya ait kaya sınıfı sembolleri verilmiştir (Taisei, 2005).

Çizelge 1. Kazı kotunda ana kayanın fiziksel özellikleri (STFA, 2005).

Kuyu No.	Kuyu Kotu (m.)	Pilot Tünel Taban Derinliği (m.)	Kuru Birim Ağırlık (gr/cm^3)	Porozite (%)
BH 144A	22.3	58.73	27.1	2.6
BH 144A		58.73	27.2	2.3
BH 144B	13.55	49.98	26.8	4.8
BH 144B		49.98	26.6	2.0
BH 146	8.51	44.94	27.2	2.4
BH 146		44.94	25.8	6.1
BH 146		44.94	26.6	4.4
BH 146		44.94	27.2	2.0
BH 146		44.94	27.2	2.4
BH 146A	10.54	46.97	26.9	2.6
BH 146A		46.97	27.0	2.7

Çizelge 2. Tünel kotundaki ana kayanın basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri (STFA, 2005).

Kuyu No	Kuyu Kotu (m.)	Pilot Tünel Taban Derinliği (m.)	Örneğin Alındığı Derinlik (m.)	Basınç Dayanımı (kg/cm^2)	Elastisite Modülü (kg/cm^2)
BH 144A	22.3	58.73	51.10 – 51.25	421	48495
BH 144A		58.73	52.00 – 52.10	449	52529
BH 144A		58.73	57.10 – 57.60	298	48117
BH 144A		58.73	57.10 – 57.60	446	43983
BH 146A	10.54	46.97	33.80 – 34.00	47	18440
BH 146A		46.97	43.80 – 44.00	172	25418

Çizelge 3. Japon Kaya Sınıflama Sisteminde dikkate alınan parametreler (Taisei, 2005).

Kaya Sınıflaması	Deformasyon Modülü E (N/mm^2)	Poisson Oranı	Kohezyon (N/mm^2)	İçsel Sürtünme Açısı φ (°)	Birim Ağırlık γ (kN/m^3)
B	5000	0.25	4.0	>50	25
CI	2000	0.30	2.0	45	24
CII	1000	0.30	1.0	40	23
DI	500	0.35	0.4	35	22
DII	150	0.35	0.2	30	21
E	80	0.40	0.1	< 30	20

Japonya Otoyol Kamu Şirketi (Japan Highway Public Corporation)	RMR *	Q Sistem **
A	100~81	>20
B	80~61	20~10
C I	60~41	0.1~20
C II	40~21	
DI	20 ve daha aşağı	0.1~0.04
D II		
E		>0.004

Şekil 4. Sirkeci İstasyon inşaatında kullanılan Japon Otoyol Kamu Şirketi'ne ait kaya sınıflama sisteminin RMR ve Q sistemleri ile karşılaştırılması (Taisei, 2005).

3. PİLOT TÜNEL KAZILARININ İZLENMESİ

Pilot tünel kazıları sırasında oluşabilecek deformasyonların ölçmek ve çevresel etkilerini sınırlandırmak için tünel içinde ve tünel dışında (yeryüzünde) ölçüm ve izleme ağı kurulmuştur. İzleme noktalarında ve ölçüm kesitlerinde kazı ilerlemesine bağlı olarak önceden tasarlanmış zaman aralıklarında okunmalar alınmıştır. İzleme sırasında herhangi bir noktada anomali ile karşılaşılması durumunda, bu noktalardaki ölçüm sıklığı revize edilmiştir (Topal, 2014).

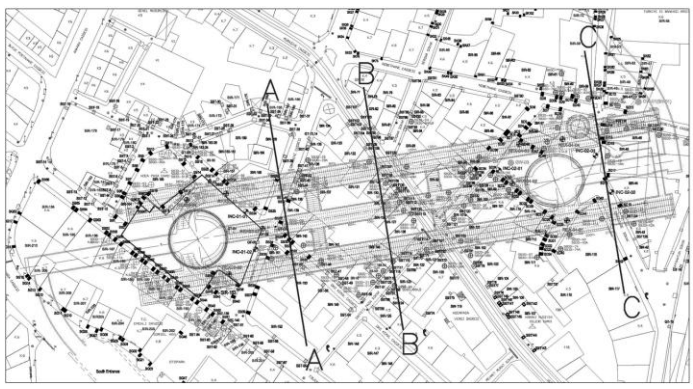
Yeryüzündeki izleme noktalarına bina oturma bulonları, bina ölçüm bulonları, ekstansometreler, inklinometreler ve çatlak ölçerler yerleştirilmiştir. Tünel içerisindeki ölçümleri ise konverjans, ekstansometre, basınçölçerler, gerilme ölçerler ve boşluk suyu basıncı ölçerler oluşturmaktadır. Bu çalışmada yüzey izleme ölçüm verileri üzerinde bir değerlendirme yapılmıştır.

3.1. İzleme Verilerinin Değerlendirilmesi

İzleme verileri Şekil 5'deki harita üzerine işaretli A-A', B-B' ve C-C' konumundaki üç kesit üzerinden irdelenmiştir. Değerlendirme aşağıda sıralanan adımlardan oluşmaktadır.

(a) Ölçüm takvimine göre önceden belirlenen bina ve yüzey oturma noktalarındaki ölçümlerinin derlenmesi ve ilişkilendirilmesi
(b) Belirli kesitler için yüzey oturma profillerinin ortaya çıkarılması
(c) Gerçekleşen ve beklenen oturma profillerinin karşılaştırılması

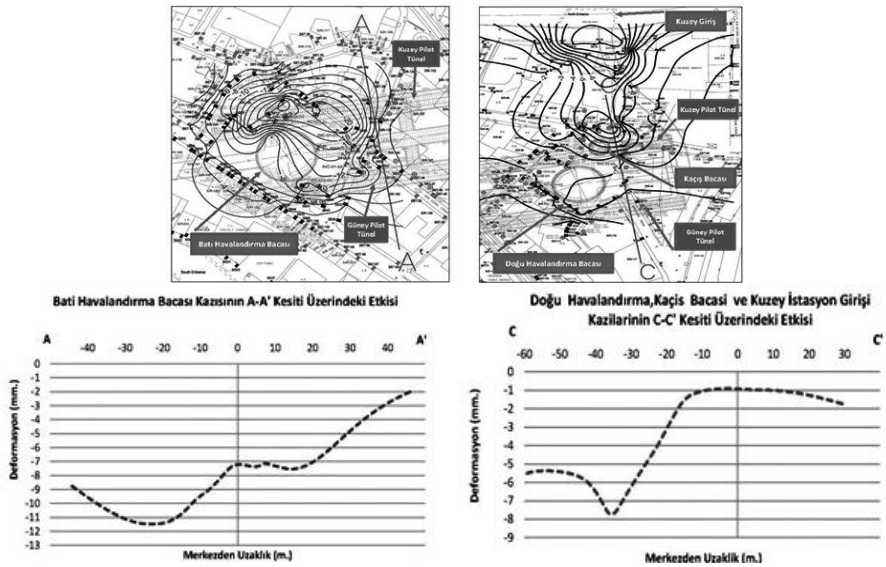
Ancak pilot tünel kazılarına başlanmadan önce kazı kotlarına ulaşımı sağlayan doğu ve batı havalandırma bacaları, istasyonun kuzey girişinin bir bölümü ve doğu havalandırma bacasına komşu olan kaçış kuyusu kazıları sonucu bazı deformasyonlar kaçınılmaz olmuştur. Bu durum, önceden oluşan bu deformasyonların pilot tünel kazılarının gerçekleşeceği ortamda bir miktar örselenmeye neden olduğu şeklinde değerlendirilmiştir. Pilot tünel kazısı öncesinde oluşan yüzey deformasyonlarının kontur haritaları Şekil 6'da verilmiştir (Topal, 2014).



Şekil 5. Yüzey izleme noktalarının ve enine oturma profili irdelenen kesit hatları.

3.2. Ölçülen Oturma Profilleri

Şekil 7'de solda jeolojik kesitler, sağda ise farklı tarihlere karşılık gelen enine oturma profilleri gösterilmiştir. Jeolojik kesitlerden de anlaşılacağı üzere her üç kesitte de benzer koşullar geçerli olup kazı sırasında kazı aynalarındaki gözlemlere göre yapılan değerlendirmelerden elde edilen kaya sınıfı aynıdır (Şekil 2). Ancak ayrık malzeme niteliğindeki kıyı çökelleri ile antik dolgunun tünel üzerindeki örtü kalınlığına oranı C-C' kesitinde diğerlerine oranla daha fazladır. Diğer bir ifadeyle, davranışı su içeriğine bağlı olarak değişebilen ve zayıf malzemeden oluşan örtü kalınlığı C-C' kesitinde daha fazladır. Pilot tünel kazıları sırasında, güneydeki tünelin kazısı kuzeydekinin ortalama 30 m önünde ilerletilmiştir. Maksimum oturmanın olduğu nokta göz önünde tutulduğunda, B-B' kesitinin oturma eğrisinin maksimum olduğu nokta iki tünelin merkezleri arasındaki noktaya yakındır. Şekil 5'teki haritadan da görüldüğü gibi, bu kesitin geçtiği hat kuyu kazılarının etki alanı dışında kalmaktadır. Bu nedenle bu noktada önceki kazılardan kaynaklanan bir örselenme olmamış, dolayısıyla tasman eğrisinde belirgin bir asimetri oluşmamıştır.



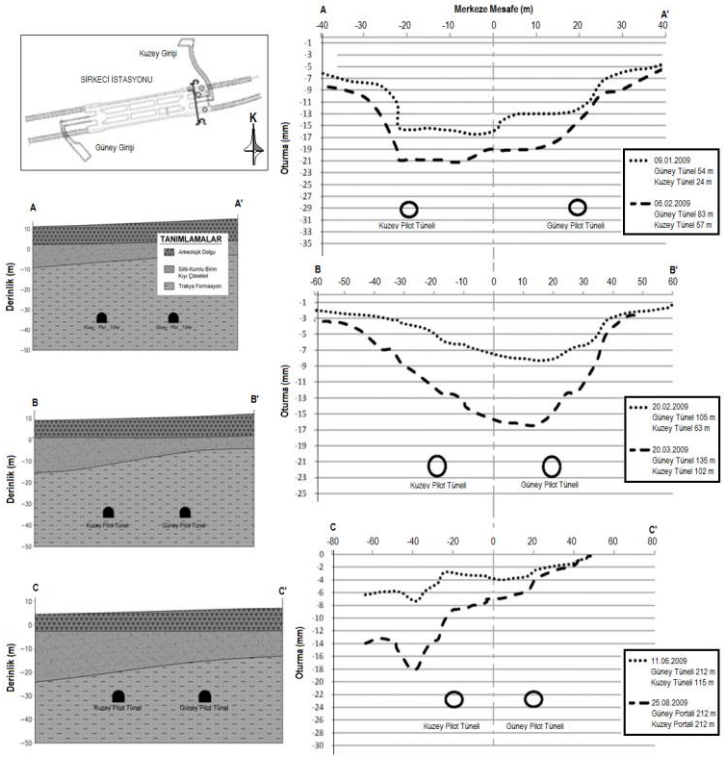
Şekil 6. Pilot tünel kazıları öncesi gerçekleştirilen şaft kazılarından kaynaklanan deformasyonlar.

A-A' ve C-C' kesitlerinde, maksimum oturmanın iki tünelin arasındaki merkezi çizginin kuzeyine kayması, beklenen bir durumdur. Birbirine yakın ve paralel konumdaki yeraltı kazılarından önceden yapılanın ortamda istenmeyen bir örselenmeye neden olduğu, dolayısıyla sonraki kazıların daha zayıf bir ortamda yapıldığı bilinmektedir (Peck, 1969; Mahmutoğlu, 2011). Pilot tüneller arasındaki mesafe (39,5m) tünel çaplarının (5,5m) 7 katından fazladır. Bu nedenle yalnızca pilot tünel kazılarının birbirini etkilemesi beklenmemiştir. Ancak A-A' ve C-C' kesitlerinin daha önce oluşturulmuş kuyu kazılarına yakın olduğu, kuzey ve güney kuyu kazılarının, pilot tünel kazılmadan önce ortamda örselenmeye neden olduğu ve oturma profillerini denetlediği anlaşılmıştır. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, A-A' ve C-C' kesitlerinde pilot tüneller kazılmadan önce, kuzey pilot tünel tarafında önemli düzeyde oturmalar oluşmuştur. Sonuçta aynı jeolojik ortamda birbirine yakın kazıların eş zamanlı veya aşamalı olmasının ortam davranışında farklılığa neden olabileceği ve yeraltı açıklıkları üzerinde gelişecek oturmaları denetleyebileceği anlaşılmaktadır.

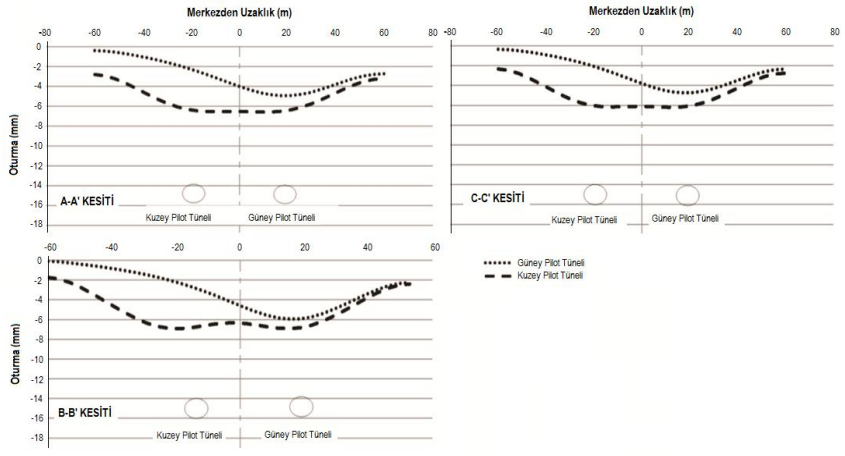
3.3. Oturma Profillerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi

Yukarıda açıklanan ve ölçülerek belirlenen gerçek oturma profilleri sonlu elemanlar yöntemi ile de irdelenmiştir (Şekil 8).Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analiz sırasında aşağıda belirtilen adımlar izlenmiştir.

(a) Her bir kesit için Rocscience Phase^2 yazılımı kullanılarak sayısal mühendislik jeolojisi modelleri oluşturulmuştur.
(b) Kesit hatları üzerine düşen geometriler (tünel kesitleri, topografya) sonlu elemanlar yazılımına işlenmiştir. Yapı yığınından kaynaklanan yayılı yük 13 t/m^2 olarak modele ilave edilmiştir.
(c) Tünellerin kazısı, önce güney tüneli, sonra kuzey tüneli şeklinde modellenmiş, kuyu kazıları modelde temsil edilememiştir. Analizde pilot tünellere destek uygulanmamıştır.



Şekil 7. İrdelenen kesitlerde oturma (tasman) profillerinin kazı adımları ve zamanla değişimi



Şekil 8. A-A', B-B' ve C-C' kesitleri için sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen oturma profilleri

Sonuçları Şekil 8'de özetlenen sonlu elemanlar çözümünden, kuyu kazıları dikkate alınmadığında birbirine paralel ve aralarında geniş bir mesafe bulunan pilot tünellerin birbirini etkilemeyecekleri, dolayısıyla maksimum oturmanın her iki tünelin merkezi çizgisi üzerinde gelişeceği görülmüştür.

Bu durum; izleme verileri ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarındaki farklılığın nedeninin pilot tüneller açılmadan, istasyonun yer aldığı bölgede yeraltına ulaşım, nakliye ve havalandırma amacıyla oluşturulmuş şaft ve yaklaşım kazılarından kaynaklanmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Sirkeci İstasyonu'nun yerleştiği ortamın davranışı istasyona ait yeraltı açıklıkları proje kesitinde kazılmadan önce pilot tünel kazıları ile araştırılmıştır. Bu uygulama kazı kaynaklı yüzey deformasyonlarının kestirimi ve denetimi açısından önemli düzeyde yarar sağlamıştır. Pilot tünel kazıları sırasında, istasyonun yerleşeceği jeolojik ortam görülmüş, detaylı olarak tanımlanabilmiş, ortamın yeraltı kazılarına karşı tepkisi belirlenmiştir. Kazılar sırasında oluşan ve yeryüzünde bulunan tarihi ve yoğun yapı yığınını olumsuz etkileyebilecek oturmalar kestirilebilmiştir. İncelenen kesitlerden henüz tünel kazıları gerçekleşmeden önce, jeolojik ortamın Batı ve Doğu Havalandırma Kuyularıı, İstasyon Kuzey Girişi'nin bir bölümü ve Doğu Havalandırma Bacasına komşu Kaçış Kuyusu kazısı tarafından örselendiği, bu boşlukların kazısı sırasında istasyonun yerleştiği bölgenin örselendiği gözlenmiştir. Pilot tünellerin kazısı sırasında, örtü tabakası üzerinde önemli kalınlığa ulaşan suya doygun arkeolojik dolgu ile kıyı çökellerinden kazı boşluklarına su geldiği belirlenmiş, bu durumun yaratacağı konsolidasyon oturmalarına karşı ilave önlemler alınmıştır.

Sonuç olarak, yüzey deformasyonlarının kritik olduğu tünel projelerinde, jeolojik ortamın tünel kazılarına nasıl tepki verdiğini incelemek ve ileride oluşabilecek deformasyonları tahmin edebilmek için önceden açılacak pilot tünel kazılarının kent içi kazılarında göz önünde tutulmasının yararlı olduğu görülmüştür.

5. KAYNAKÇA

Arioğlu, B., Yüksel, A., Arioğlu, E., 2002. Determination of the inflection point of surface settlement curves at Mevhibe Inonu tunnel of Istanbul. Sixth Regional Rock Mechanics Symposium, Konya, Turkey, pp 305–311.

Chehade, F.H., Sharour, I., 2008. Numerical analysis of interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure. Tunneling and Underground Space Technology, 23, 210–214

Cording, E.J., Hansmire, W.H., 1975. Displacements around soft ground tunnels. General report. In: Proceedings of the Fifth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Session IV, pp. 571–632

Güven, G., 2008. Otogar-Kirazlı 1 arasının mühendislik jeolojisi ve metro kazıları ile ilişkili deformasyonların değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Mahmutoğlu. Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground condition in Istanbul. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(1), 115-131.

Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In: Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-art Volume, Mexico, pp. 225–290

Suwansawat, S., Einstein, H.H., 2007. Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(4), 445–468.

Taisei Kumagai Gama Nurol Joint Venture, 2005. Geotechnical design parameters by Marmaray Project, Contract BC1, İstanbul.

Topal, C., 2014. Marmaray projesi sirkeci istasyonu pilot tünel kazılarına bağlı gelişen yüzey deformasyonlarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

STFA Temel Araştırma, 2005. Marmaray-railway bosphorus tube crossing site ınvestigation and subsurface conditions geotechnical factual report, İstanbul.

Şemsiye Kemer Yönteminin Ramdane Tünelinde Uygulanması

Implementation of the Umbrella Arch (Pipe Arch) Method in the Ramdane Tunnel

N. U. Çelik[1,*], S. Türkmen[2]

[1] *Jeoloji Mühendisi, Özgün Şirketler Grubu, Balmumcu, İstanbul*
[2] *Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Balcalı, Adana*
*(*umutcelik@ozguntr.com)*

ÖZ: Ramdane Tüneli, Cezayir'in başkenti Alger'i ülkenin en büyük şehirlerinden biri olan Oran'a bağlayarak, bu iki şehir arasındaki ulaşımı daha iyi hale getirerek, ülkenin gelişimiyle paralel olarak artan bölgenin ihtiyaçlarını karşılayacak, toplam uzunluğu 2.8 km olan bir demiryolu tünelidir. Tünel inşası süresince farklı kaya/zemin şartlarıyla karşılaşılsa da, temel hedef, kazı aşamaları boyunca işçi ve yapım güvenliğini ön planda tutmaktır. Tünelin baskılı ve zayıf kısımlarında destekleme sorunları oluşmuş, bunun üzerine sorunlu kesimlerde kazı ve destekleme yöntemlerinden olan Şemsiye Kemer (Boru Kemer) yöntemi uygulanmıştır. Şemsiye Kemer yönteminin amacı tünel çevresinde kaya/zemin kütlesinde uygulanan destekleme modeli ile güçlendirilmiş bir kabuk oluşturarak birincil destekleme aşamasında duraylılığın sağlanmasıdır. Bu bildiride tünel güzergahı boyunca geçilen zayıf kaya/zemin koşullarında kazı ortamının başlangıçtaki dengesinin korunması, tünel içi (konverjans) deformasyonların kontrol altında tutulması ve düşük kohezyonlu zeminlerde tünel aynası gerisinde oluşan deformasyonların önlenmesi için uygulanan Şemsiye Kemer Yöntemi ve uygulanışı incelenmiştir.

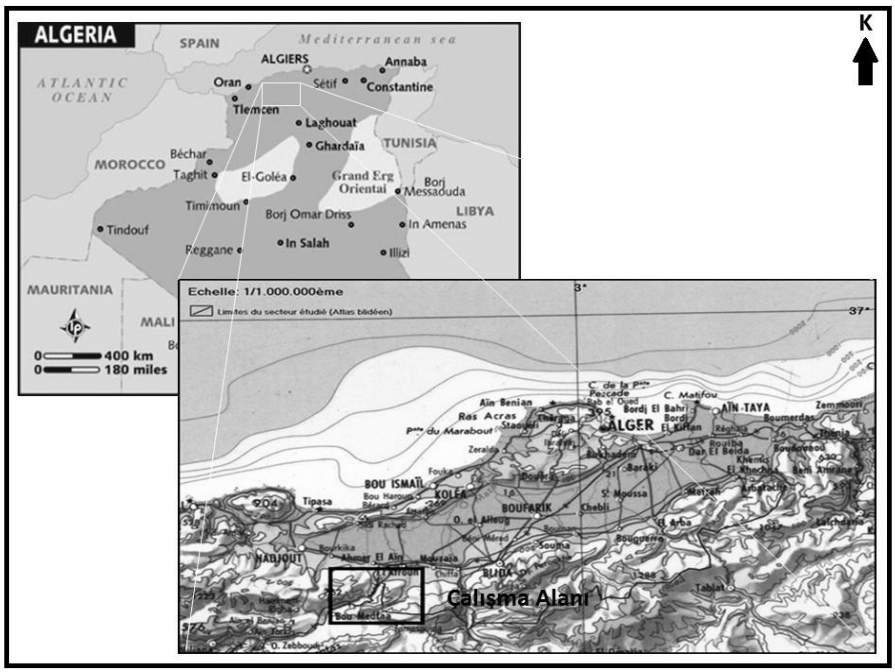
Anahtar Kelimeler: Kazı Destekleme Yöntemleri, Şemsiye Kemer Yöntemi, Deformasyonların Önlenmesi, Ramdane Tüneli

ABSTRACT: *The Ramdane Tunnel is a 2.8 km long railroad tunnel tying one of Algeria's biggest cities–Oran with its capital Algiers as an integration process of the country's effort to parallel improvement through infrastructure. Despite the various rock/soil encountered during excavation, the primary goal has been worker and construction safety. Tunnel support issues have occurred in weak zones and such excavation concerns have been solved through the implementation of the Umbrella Arch support system. The goal in the utilization of the Umbrella Arch has been to create a shell in the excavated rock/soil which will serve as a primary reinforcement for stability. In this study, the application of the Umbrella Arch system has been inspected in order to stabilize the primary balance of the rock/soil, preventing deformations behind the tunnel face in low cohesive soil conditions and also to bring under control the deformation (convergences) which occur as tunnel excavation continues.*

Keywords: *Excavation Support Systems, Umbrella Arch Method, Preventing Deformations, Ramdane Tunnel*

1. GİRİŞ

Şehirlerarası ulaşım süresini kısaltan ve en etkilli çözüm yollarından biri olan demiryolu tünelleri, günümüz dünyasında da taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Şehirlerarası ulaşım sorununa çözüm bulmak isteyen Cezayir Hükümeti Ulaştırma Bakanlığı Devlet Demir Yolları Genel Müdürlüğü (ANESRİF) tarafından 2011 yılı sonunda Alger ve Oran şehirleri arası çift hatlı demiryolu inşasına başlanmış, iki büyük şehir arasındaki ulaşım süresinin 2 saate indirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı, Cezayir'in kuzey bölümünde yer alan Blida ili sınırları içinde ve Atlas dağlarının eteğinde El Affroun vilayetinin birkaç kilometre batısında Qued Djer beldesinde yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Proje tamamlandığında başkent Alger'i ülkenin en büyük şehirlerinden biri olan Oran'a bağlayacak 220 km/saat hızda hizmet verecek çift hatlı modern bir demiryolu hattı olacaktır. Farklı amaçlara hizmet etseler de, tüneller geometrilerinin ve üstlerine gelen yüklerin karmaşıklığı, kaya ve kaplama malzemelerinin özellikleri ve karşılıklı etkileşimleri nedeniyle projelendirilmesi oldukça güç yeraltı yapılarıdır. Ramdane Tüneli'nde de birincil kazı ve destekleme aşamasında son 45 m'ye girilirken geçilen tünel geçkisi boyunca karşılaşılan farklı türde kaya/zemin şartları inşa aşamasında çeşitli güçlüklerle karşılaşılmasına neden olmuştur. Bu bildiride, tünel güzergahı boyunca geçilen zayıf kaya/zemin koşullarında kazı ortamının başlangıçtaki dengesinin korunması ve tünel içi deformasyonların (konverjans) kontrol altında tutulması amacıyla uygulanan boru kemer yöntemi ve uygulanışı incelenmiştir.

2. JEOLOJİ

Cezayir, güneyinde bulunan Atlas fayı ile genel olarak iki büyük yapısal birime ayrılır. Bunlar Alp orojenezinden etkilenen Kuzey Cezayir bölümü ve nispeten orojenez tektonizma aktivitesinin düşük olduğu Sahra platformu olarak farlılık gösterir. Kuzey Cezayir bölümünde, güneyde Alp orojenezi kökenli Atlas Dağları, merkezde ise Oran ve Meseta gibi büyük ovalar yer alırken, batıya doğru ise Regada yükseltileri görülür. Alt Miyosen döneminde Atlas Dağları bölgenin karmaşık tektonizmasından etkilenerek kuzeye doğru bindirmiş ve bu bindirme neticesinde geç Neojen döneminde Chlef ve Honda çökel havzalarını oluşturmuştur.

Kuzey Cezayir bölgesinde Alpin orojenezi esnasında meydana gelen genç dağlar kuzeyden güneye doğru bir dizi şeklinde uzanır. Bölgenin daha da kuzeyinde yer alan kıyı Cezayir kıta sahanlığı bölümü Tersiyer ve Kuvaterner çökelleriyle kaplanmıştır. Bu çökellerin tabanında ise, kalınlıkları 1000-3500 m arasında değişen Pliyosen dönemine ait metamorfik birimler bulunmaktadır. Miyosen - Jura döneminde Atlas Dağı bindirmesinin etki alanında Chlef havzası gibi sedimanter dağ havzaları oluşmuştur. Honda havzası ise, Eosen karasal çökellerinin üzerine gelen Miyosen çökellerinden oluşmuş derin bir havzadır. Liyas döneminde ise yerel yükselme mekanizmaları Telagh ve Tiaret gibi geçiş bölgesi dağ havzaları meydana gelmiştir. Bu bölgenin güneyinde kalan, yüksek yaylalar ve sahra

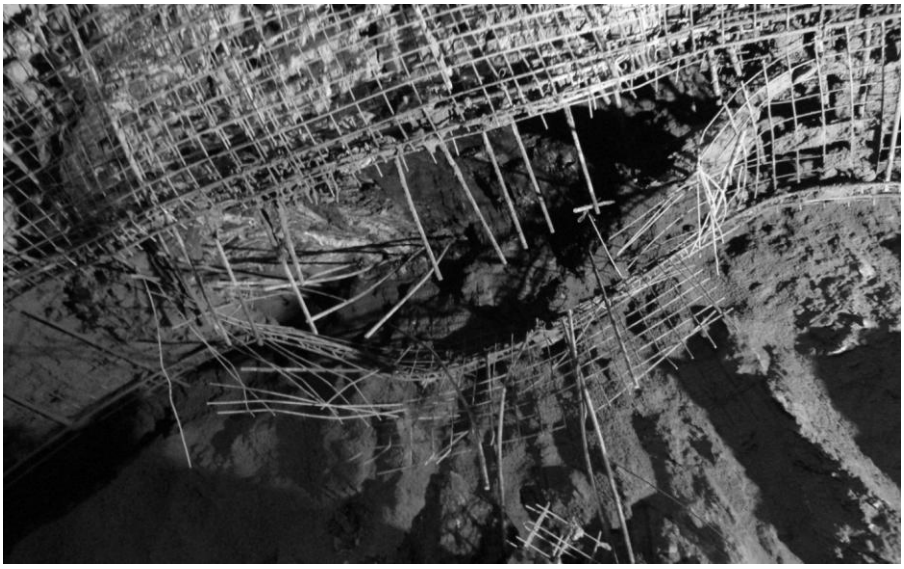
platformu arasındaki çukurluğa Mezozoik döneminde kalınlığı 700-900 m arasında değişen kalın sedimanter kayaçlar çökelmiştir. Tersiyer döneminde tektonizmaya bağlı olarak gelişen bölgesel gerilme bir dizi ters fay etkisi ile hafif yükseltili dağlar meydana getirmiştir.

Çalışma alanı Cezayir'in kuzey kesiminde Mitidja merkez grubunun sınırlarına dahil olan Atlas Dağı'nın eteklerinde yükseklikleri 250-300 m arasında değişen kalın sedimanter kayaçların oluşturduğu tepeler üzerinde yer almaktadır. Tüneller morfolojik açıdan orta engebeli, rüzgar ve su etkisi ile aşınmış tepelerden geçmektedir. Tünel güzergahı boyunca genel olarak gözlemlenen litolojik birim masif marndır. Bu birimde yer yer ince ve orta kalınlıkta ardalanmalı kireçtaşı-marn ara tabakaları da gözlenmektedir. Egemen birim olan marn, tabaka kalınlıkları ve jeomekanik karakteristikleri açısından farklı özellikler sunmaktadır. Değişen tabaka kalınlıkları ve yönelimleriyle birlikte değişen süreksizliklerin eğim ve eğim yönleri, su geliri, birimlerde gözlemlenen bozunma gibi olumsuz faktörler kazı aynası ve gerisinde duraylılık problemleri meydana getirmiştir.

3. ZAYIF KAYA/ZEMİN KOŞULLARINDA OLUŞAN DURAYSIZLIK PROBLEMLERİ

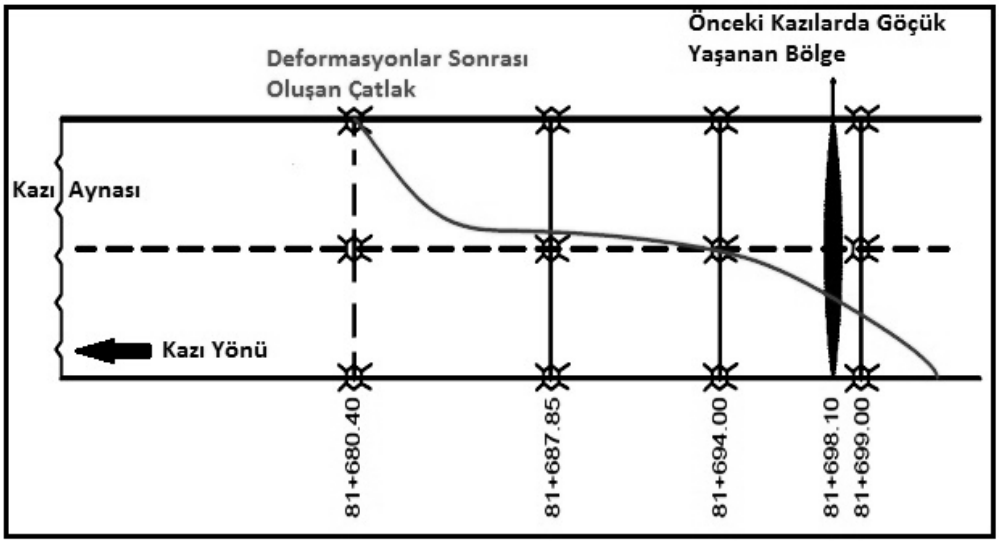
Tünel ve galeri gibi yer altı açıklıklarının açılması sırasında sıkça karşılaşılan yumuşak birimler bir çok duraysızlık problemleri ile karşı karşıya kalınmasına neden olmaktadır. Genelde kil minerali içeren bu birimler, içerdikleri kil minerali türüne bağlı olarak yer altı açıklıklarının yapımı sırasında birincil ve ikincil gerilmelere ek olarak üçüncül (tersiyer) gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve yüksek deformasyonların ve gerilme artışlarının meydana gelmesini sağlamaktadır. Desteksiz bir yer altı yapısı ancak yüksek dayanımlı kayaçların varlığı halinde duraylı olabilmektedir. Dayanımın yeterli olmadığı ve yeraltı açıklığının çeperlerine kaya/zemin tarafından uygulanan basıncın yetersiz olması durumunda gevşemiş bölge yarıçapı çok büyümektedir. Özellikle kil içeren birimlerde büyüme hızı günde 0.5 ile 5 cm'ye kadar varabilmektedir. (Onargan, 2000)

Tünel güzergahı boyunca yüzeylenen masif marnda genel olarak su içermeyen kısımlarda her hangi bir duraylılık problemiyle karşılaşılmazken, örtü kalınlığının ortalama 30 m'ye düştüğü bölgelerde formasyonun su içermesi sebebiyle duraylılık problemleri ile karşılaşılmıştır. Ülke iklimine bağlı olarak Mart ve Nisan aylarında yağışların artmasıyla birlikte birimin içerdiği süreksizlik sistemlerinden su geliri olmuş ve bunun birim üzerinde yarattığı etki şişme, kayaç yapısındaki değişimlerden ötürü gerilme dağılımlarındaki ciddi değişimler şeklinde kendisini göstermiştir. Geçmişte de yüzey sularının süreksizlik sistemlerinden geçişi ile problemli bölgede düşük makaslama dayanımına sahip bir ortam oluşmuştur (Şekil 2).

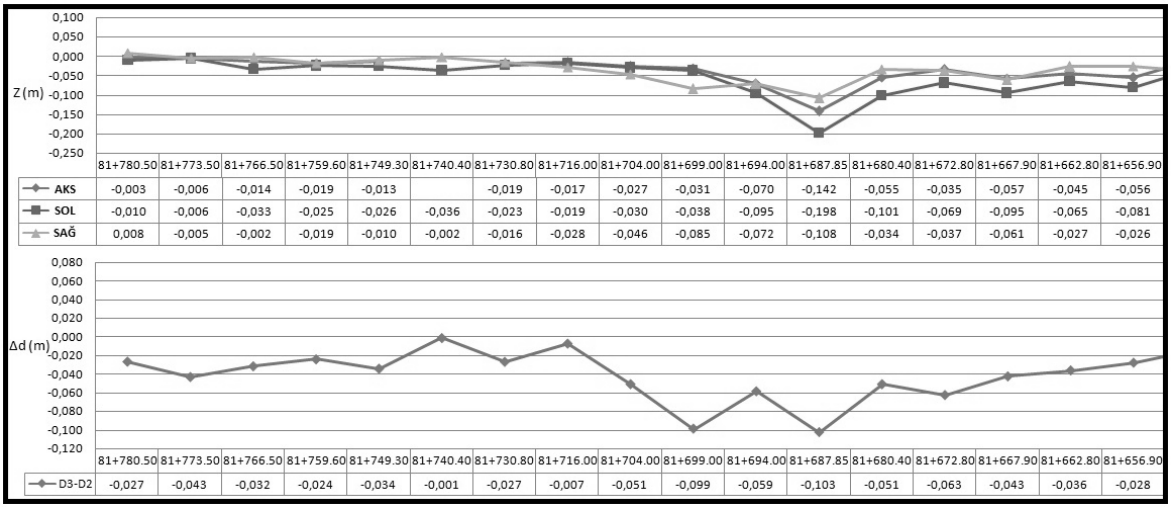


Şekil 2. Tünelin kazı aynasında yaşanan duraysızlık problemlerine bir örnek

Örtü kalınlığının en düşük değerlere ulaştığı bölgelerde (81 + 698.00) 12 m genişliğinde ve 10,5 m yüksekliğinde, kazı projesinde değişikliğe gidilmiş ve at nalı şekilli üst yarı, altyarı ve taban kazısı modelinin uygulanması planlanmıştır. Kazı ve destekleme sınıfı olarak SC2B (kazı adımı 1 m, bulon 14/15 adet, L=8 m, süren, kaplama kalınlığı=30 cm) destekleme sınıfı ile inşa çalışmaları devam ederken, oluşan duraylılık problemleri ve tünel eksenin de oluşan çatlamalar destek sınıfının değişmesi yönünde değişikliğe gidilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bölgede alterasyona uğramış marn litolojisin dayanım, kohezyon değerlerindeki düşüş beraberinde kemerlenmede problemler ve kaplama stabilizasyon basıncının aşılması neticesinde ayna gerisinde tünel ekseninde önemli deformasyonlar (Şekil 4) ve çatlamalar oluşmuştur (Şekil 3).



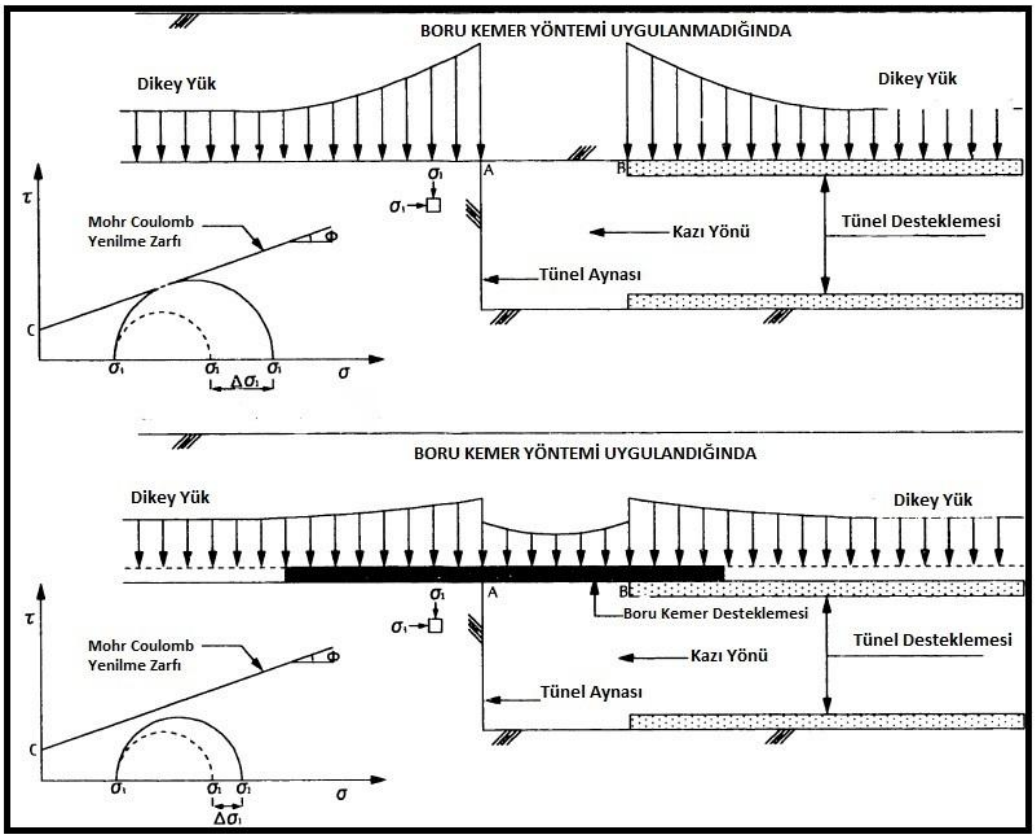
Şekil 3. Tünelde oluşan deformasyonların şematik gösterimi



Şekil 4. Deformasyon grafiği (81 + 698.00 km)

Tünel kaplamasında oluşan çatlamalar ve deformasyon artışları neticesinde SC2B kazı destek sınıfından şemsiye kemer (SC3) destekleme sınıfına geçilmiştir. Şemsiye kemer yöntemi ile tünel kazı aynası ve gerisinde oluşan deformasyonların kontrol altına alınması, kazı aşamalarında tünelin çevre kayasında oluşacak yenilmenin (Şekil 5) istenilen seviyede tutulması ve oluşan konverjan

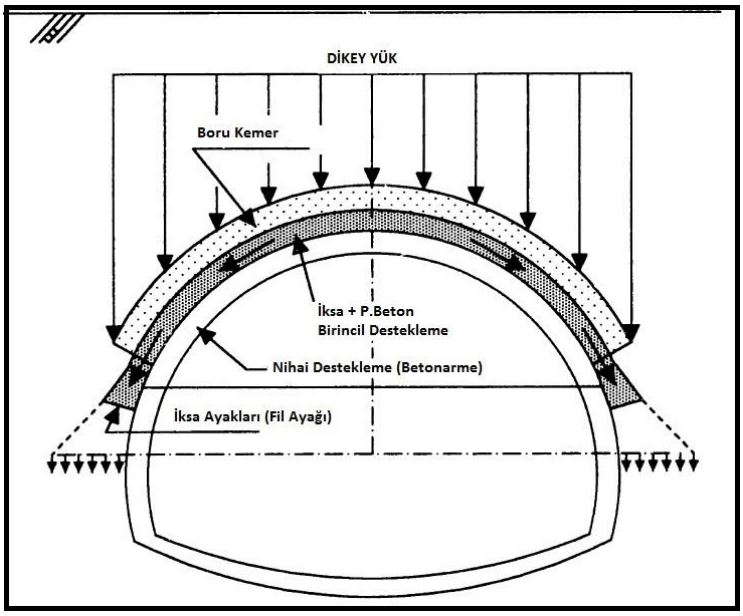
deformasyonlarının projelendirme sınırlarının aşılmaması hedeflenmiştir. Kazı aynasında kazı yapılması sırasında gerilme değişimlerinden ötürü akma ve duraylılık problemlerinin ön kemerlendirmeli bir yöntem ile kaya/zemin şartlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Üstyarı kazısını takiben devam eden altyarı ve taban (invert) kazılarıyla birincil destekleme halkası tamamlanmıştır.



Şekil 5. ŞKY ve kayacın yenilmesi arasındaki ilişki (Muraki, 1986)

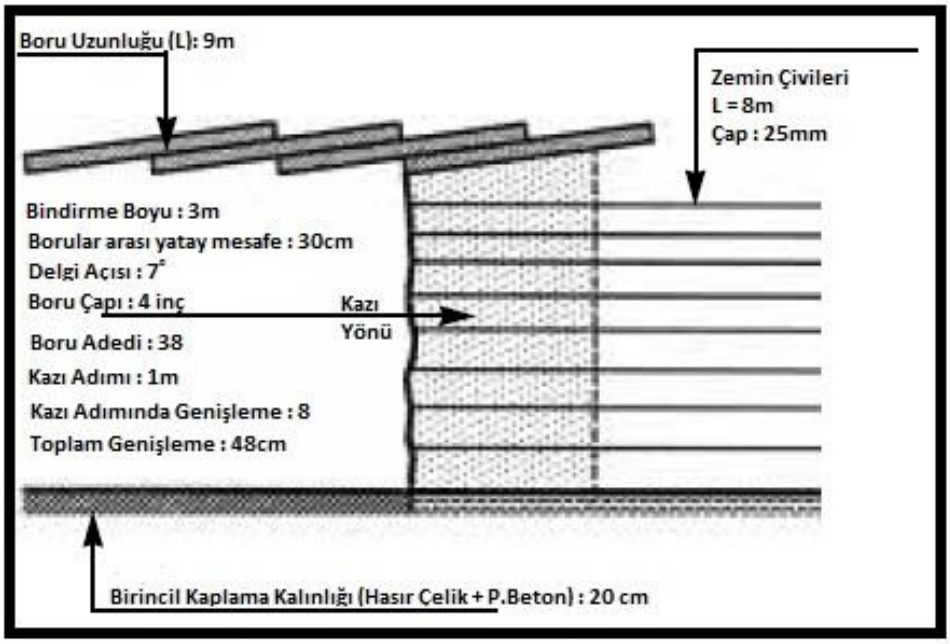
4. ŞEMSİYE KEMER YÖNTEMİ VE UYGULANMASI

Boru Kemer yönteminin amacı tünel çevresinde kaya/zemin kütlesinde oluşturulan destekleme modeli ile güçlendirilmiş bir kabuk oluşturarak birincil destekleme aşamasında duraylılığın sağlanmasıdır. Tünel cidarına eksenel olarak etki eden yüklerin kazı aşamalarını takiben yan duvarlara ve son olarak tünel kaplamasının gerilmeleri dağıtan geometrik şekli sebebiyle tünel cidarına dağıtılması mantığıyla tasarlanmış bir destekleme sistemidir (Şekil 6). Bu yöntem, yaygın olarak kullanılan ve halen gelişmekte olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nin kazı ve destekleme aşamasında duraylılık problemlerine sunduğu çözümlerin yetersiz kaldığı durumlarda tünel kazısını güvenli bir şekilde yapabilmek amacıyla tünel cidarında kesik koni inşa edilerek birincil desteklemenin ve duraylılığın sağlanması koşuluyla tünel inşasında uygulanan bir yöntemdir.



Şekil 6. Boru kemer yönteminde yüklerin dağılımı (Muraki, 1986)

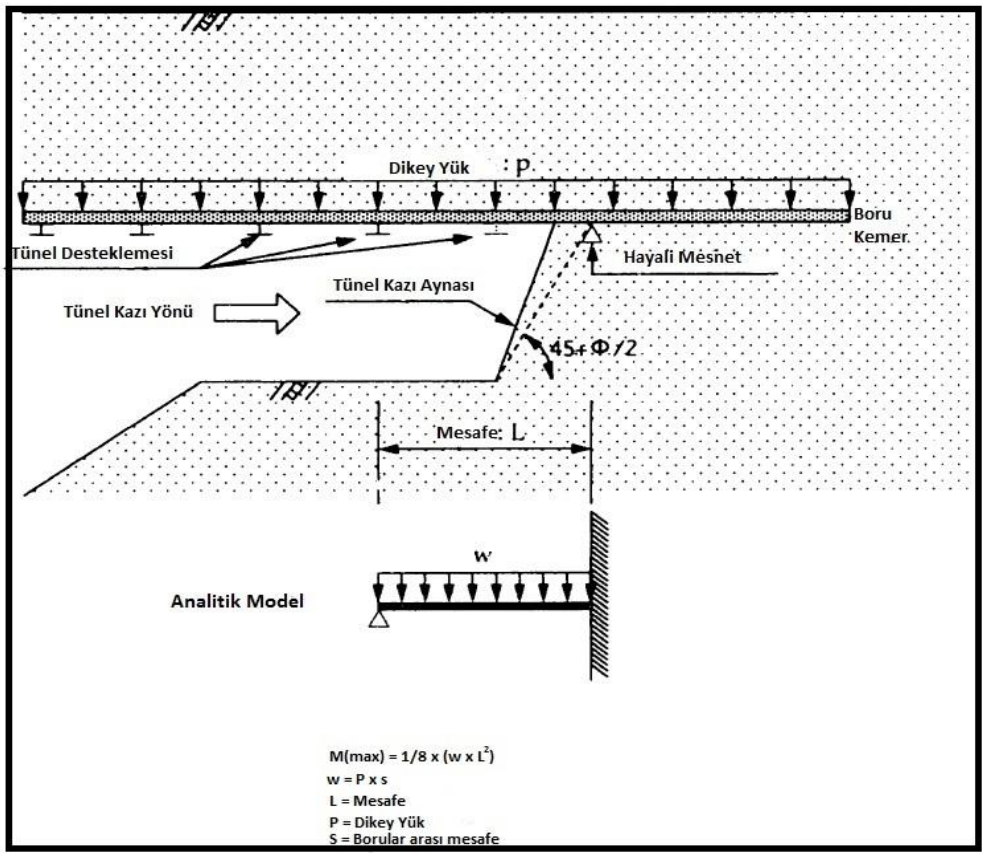
Şemsiye Kemer yönteminin uygulanmasında ilk aşama, delgi işlemini yapacak makinenin çalışabileceği yaklaşık 45° eğimli bir platformun oluşturulması için kazının tünel aynası önüne toplanarak topuk (rampa) desteği oluşturulmasıdır. Bunu takiben rampa üzerinde delgi konumu alan makine proje tasarımına göre değişen farklı parametrelerdeki delgi işlemine başlar. Projede uygulanan yöntem parametreleri aşağıda Şekil 7'de verilmiştir. Delgi işlemi; delgi açısı yaklaşık 7° derece, uzunluğu 9 m ve çapı 114 mm olacak şekilde tamamlanır. Delgi işleminin ardından yerleştirilecek boruların delik cidarına rahatça sürülebilmesi için delgi işlemi yapılan delikler başınçlı hava ile temizlenir. Temizlenen delgilere 6,3 mm et kalınlığına sahip borular sürüldükten sonra boruların içine enjeksiyon dönüş hortumları yerleştirilip ardından boruların ağzı tıpa yardımıyla kapanır ve etrafı çimento şerbeti kaçısı olmaması için alçı ile sıvanır.



Şekil 7. Destekleme modeli parametreleri (Muraki, 1986)

Delgi işlemi ve boru yerleştirme işleminde dikkat edilmesi gereken husus boruların delgi işleminin ve yerleştirme işleminin birer atllamalı şekilde (1,3,5,7,…) yerleştirmenin yapılması ve bu işlemin ardından kalan ara delgi ve boru yerleştirmeleri yapılması hususudur. Yerleştirilen borulara enjeksiyon setleri ile 1/1 (çimento/su) oranında koyu kıvamlı olarak hazırlanan çimento şerbeti aktarılarak yer yer delikli olarak imal edilen boruların ve çevresinin çimento harcı ile doldurulması sağlanır. Enjeksiyon şerbetinin ortam şartlarına göre değişen priz alma süresinin geçmesini takiben tünel ayna kazısı işlemine başlanır. Kazı aşamaları 3 m bindirmeli olarak monte edilen boru kemerin altında bindirme boyu dışında kalan 6 m'lik kısımda kazı adımı 1 m olacak şekilde 6 aşamada yapılır. İlk kazının bitiminden sonra 1 no.lu (üçgen çelik kafes iksa) iksa topoğrafik çalışma ardından zemine yerleştirilir ve bu işlemin ardından tünelin birincil kaplamasını oluşturan hasır çelik ve püskürtme beton (kaplama kalınlığı : 20 cm) uygulanır. Tünel üstyarı kaplaması destek işleminin tamamlanması için uzunluğu 8 m olan 25 mm çapındaki kaya saplamaları yerleştirilerek (kazı adımında toplam 11/12 şaşırtmalı olarak) tamamlanır. Ardından ikinci aşama kazısı yapılarak her kazı adımında 8 cm genişlemeli olarak monte edilen iksalar 6. aşama sonunda 48 cm genişleyerek tünel cidarında bir sonraki döngü için gerekli olan tünel arınının oluşmasını sağlar. Yukarıda saydığımız işlemlerin ardından döngüsel olarak 6 aşamada tekrarlanan bir destekleme modeli oluşmuş olur.

Literatürde şemsiye-kirişlerin ortamdaki davranışları incelemek üzere iki farklı yaklaşım seçenekleri dikkat çekmektedir. Analitik çözümü içeren birinci yaklaşımda şemsiye kiriş boruları çoklu mesnetler üzerine yerleşen elastik kirişler analojisi kullanılır. Burada borular için kesit seçimi, en kritik olduğu düşünülen kirişlerin son mesneti ile aynaya sabitlendiği kısımdaki momentlerin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir. (Çeçen ve İncecik, 2008.) Analitik yaklaşımda muhtemel ankastre yük olarak kabul edilip oluşacak maksimum moment hesabına gidilirken destekleme sisteminin duraylılığını sağlayacak parametreler seçilir (Şekil 8).



Şekil 8. Şemsiye kemer yöntemi analitik modeli (Muraki, 1986)

5. SONUÇLAR

Ramdane Tüneli'nin baskılı ve zayıf kısımlarında oluşan destekleme sorunlarına çözüm olarak Şemsiye Kemer Yöntemi başarı ile uygulanmıştır. Kullanılan yöntem ile ilgili sonuçlar aşağıda verilmiştir. Ramdane Tünelinde uygulaması yapılan Şemsiye Kemer Yöntemi örtü yükünün az olduğu bölgelerde, yüzey oturmalarına bağlı olarak gelişen eksenel deformasyonların önüne geçtiği gözlemlenmiştir. Ön-kemerlendirmeli bir yöntem olduğundan kazı aynasında oluşabilecek duraysızlık problerinin önüne geçerek kazı ortamının başlangıçtaki dengesinin korunmasını sağlanmış ve tünel aynasında oluşması olağan duraylılık problemlerinin önüne geçilmiştir. Şemsiye Kemer Yöntemi, konverjans deformasyonların ve düşük kohezyonlu zeminlerde tünel aynasının gerisinde oluşan deformasyonların önlenmesinde etkili olarak kullanılmıştır. Dolaylı olarak eklenebilecek bir sonuçta işçi ve yapım güvenliğinin sağlanmasındaki katkısıdır.

6. KAYNAKLAR

Çeçen, E., İncecik, M., 2008. Metro tünellerinde uygulanan şemsiye kemer yönteminin sayısal analizi. İTÜ Dergisi, 7, 72-82.

Muraki, Y, 1997. The Umbrella Method in Tunnelling. Massachusetts Institute of Technology. Boston.

Onargan, T., 2000. Sonlu elemanlar analiz yöntemlerinde kayaç şişme özelliğinin deformasyonları ve gerilmeler üzerine etkisi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(2), 55-66.

Süzen, E., 2009. 4. Levent-Ayazağa (İstanbul) metrosu tünelindeki kazı ve sağlamlaştırma uygulamaları. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana.

Yılmaz Ö., Kurt, C., Şimşek, S., 2002. İstanbul metrosu tünellerinde umbrella arch yönteminin uygulanması ve sonuçları. Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1.Sempozyumu, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, İstanbul, 331-342.

Su Yapılarında Mühendislik Jeolojisi

Bağbaşı Barajı Mavi Tünelinde (Konya-Türkiye) Kullanılan Tünel Delme Makinesinin Performans Değerlendirmesi

Assessment of The Performance of the Tunnel Boring Machine Employed in the Construction of the Mavi Tunnel (Konya, Turkey)

A. Koçbay[1,*], Y. Şentürk[1], K. Karakuş[1]

[1] *DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara (*akocbay@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Tüneller; makinesiz el ile yapılan kazı, del-patlat yöntemi ve/veya tünel delme makineleri kullanılarak açılmaktadır. Tünel delme makinelerinden özellikle tam cepheli "Tünel Delme Makineleri (TDM) (Tunnel Boring Machine-TBM) ile yapılan kazılar, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle son yıllarda ulaşım, sulama, enerji ve bunun gibi amaçlı projelerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Tünel delme makinelerinden en iyi verimin alınabilmesi için makine tipinin seçiminde ve tasarımında, arazideki jeolojik ve jeoteknik şartlara dikkat edilmelidir. Bu çalışmada, Bağbaşı Barajı ve Mavi Tüneli (Konya) inşaatı kapsamında yapılan tünel kazısı ele alınmıştır. Mavi Tüneli'nin kazı çapı 4.88 m, nihai çapı 4.20 m olup, tünel delme makinesi ile açılan toplam uzunluk 17 034 m'dir. Tünelde dolomitik, çört yumrulu, bitümlü killi kireçtaşından oluşan Belkuyu formasyonu, kumtaşı, kiltaşı ve killi kireçtaşından oluşan Avdan formasyonu, kireçtaşı, killi kireçtaşı, şeyl ve kumtaşından oluşan Ekinlik formasyonu, karstik kireçtaşından oluşan Sinatdağı formasyonu, dolomit ve dolomitik kireçtaşından oluşan Polat formasyonu geçilmiştir. Bu birimlerin jeolojik ve jeomekanik özellikleri yapılan jeoteknik çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. TDM'in kazı öncesi hesaplanan teorik ve kazı sırasındaki gerçek verimliliği güzergah boyunca değişen zemin koşullarında incelenmiştir. Buna göre günlük ortalama kazı miktarı, Q_{tbm} yöntemiyle 19,03 m/gün olarak hesaplanmıştır. Tünel tamamlandığında ise, gerçekleşen ortalama hızın 16,89 m/gün olduğu tespit edilmiş olup, bu değerler arasındaki farkın nedenleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tünel Delme Makinesi, Bağbaşı Barajı, Mavi Tüneli, Q_{TDM}

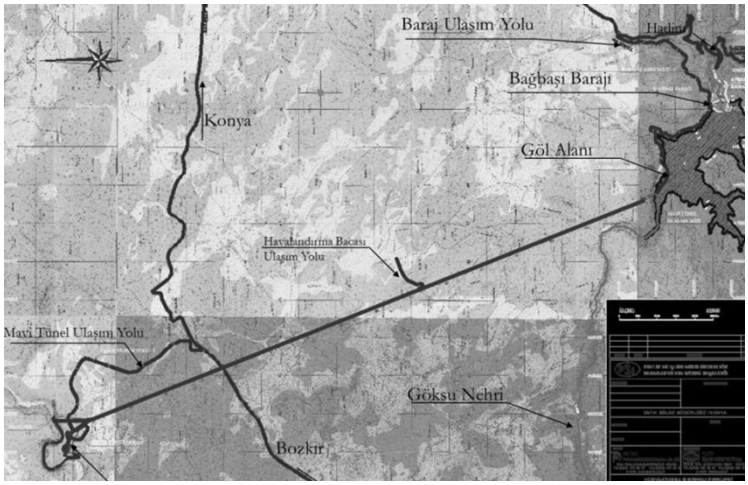
ABSTRACT: *The tunnel excavations are performed without the use of excavation machine, and using drill and blast method and/or tunnel boring machines. Due to the fact that the excavations carried out using the "Tunnel Boring Machines (TBM)" are rapid and economic, they are intensively used in transportation, irrigation and energy projects in most recent years. The geological and geotechnical conditions of the tunnel routes should be considered in design and selection of the machine type in order to obtain the best performance from the tunnel boring machines. The tunnel excavation carried out within the scope of the construction of Bağbaşı Dam and Mavi Tunnel (Konya) is examined in this study. The excavation tunnel of Mavi Tunnel is 4.88 m, final diameter is 4.20 m, total length with the approach tunnel excavation by the tunnel boring machine is 17034 m.The tunnel penetrates throughout the following geological units: the Belkuyu formation consisting of dolomithic, bituminous and argillaceous limestone with chert nodules, the Avdan formation consisting of sandstone, claystone and argillaceous limestone, the Ekinlik formation consisting of limestone, argillaceous limestone, shale and sandstone, the Sinatdağı formation represented by carstic limestone and the Polat formation mainly composed of dolomite and dolomithic limestone. The geological and geotechnical characteristics of these units were specified with the aid of the geotechnical studies. Theoretical performance of the TDM, calculated before the excavation and its real efficiency during the excavation were examined in the different ground conditions observed along the tunnel route. The evaluations indicate that the average daily amount of excavation is 19,03 m via the Q_{TBM} method. The average rate of advance was detected as 16,89 m when the tunnel has been completed. Finally, the possible reasons of the difference between these two values are discussed.*

Keywords: *Tunnel Boring Machine (TBM), Bağbaşı Dam, Mavi Tunnel, Q_{TBM}*

1. GİRİŞ

Tünel delme makineleri, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle son yıllarda ulaşım, sulama, enerji ve bunun gibi amaçlı projelerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Tünel delme makinelerinden en iyi verimin alınabilmesi için makine tipinin ve özelliklerinin seçimi çok önemlidir. Bu nedenle tünellerin projelendirmesi aşamasında; proje güzergahının jeolojisine, geçilecek formasyonların jeoteknik özelliklerine, bölgenin tektonizmasına, yeraltısuyu durumuna ve topoğrafik şartlara özel önem verilmelidir. Bu kapsamda yeterli sayıda ve derinlikte sondaj ile arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmalıdır.

Bağbaşı barajında depolanacak suların yaklaşık 414, hm^3'ü, Mavi Tüneli vasıtasıyla Konya kapalı havzasına aktarılacaktır. Mavi Tüneli'nin kazı çapı 4.88 m, nihai çapı 4.20 m, tünel uzunluğu 17034 m'dir (Şekil 1). Tünel kazısı çift kalkanlı TDM ile yapılmıştır. Tünelde kazı işlemine 05.01.2009 tarihinde başlanmış ve 01.03.2012 tarihinde tamamlanmıştır. Tünelde geçilen birimlerin özellikleri kesin proje ve uygulama aşamasında yapılan jeoteknik çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Bu çalışmada, TDM'in kazı öncesi hesaplanan teorik ve kazı sırasındaki gerçek verimliliği (performansı ve ilerleme hızı) güzergah boyunca değişen zemin koşullarında incelenmiştir.



Şekil 1.Bağbaşı Barajı ve Mavi Tüneli genel vaziyet planı

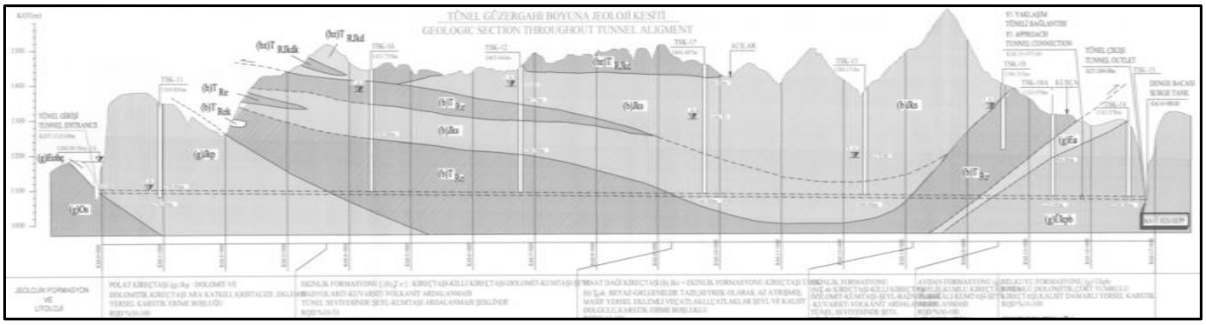
2. JEOLOJİ

İnceleme alanında; Orta Torosların göreceli olarak otokton kabul edilen Geyik Dağı Birliği'nin Kambriyen yaşlı Çaltepe Formasyonu, Ordovisiyen yaşlı Seydişehir Formasyonu ve Jura yaşlı Polat Kireçtaşları yüzeylenmektedir. Temeli oluşturan Kambriyen ve Alt Ordovisiyen yaşlı kaya birimlerinin üzerine transgresif olarak Jura-Kretase yaşlı platform tipi kireçtaşı istifi gelmektedir. Mavi Tüneli2ningüzergahında Orta Torosların jeolojik özelliklerini taşıyan Geyik Dağı Birliğinin Seydişehir Formasyonu, Polat Kireçtaşı, Belkuyu Formasyonu, Avdan Formasyonu ile allokton konumdaki Ekinlik Formasyonu ve Sinat Dağı Kireçtaşı yüzeylenmektedir (Blumenthal, 1947, Dean ve Monod, 1970).

Polat Kireçtaşı (JKp) : Dolomit ve dolomitik kireçtaşı ara katkılı neritik karbonatlardan oluşur. Birim açıklı koyulu kül renkli, orta-kalın ve düzgün katmanlıdır. Birimin kalınlığı 430 m'dir. Polat Kireçtaşı Seydişehir Formasyonunun üzerinde açısal uyumsuzlukla bulunur.

Belkuyu Formasyonu (Ükpb) : Üst Kretase yaşlı ve tabanı görülemeyen bu birim, siyahımsı-koyu gri renkli, bitümlü, yer yer dolomitik düzeyli, kalsit damarlı, sert, orta-kalın katmanlı sığ denizel karbonatlar ile başlar. Birim, üste doğru siyahımsı renkli ince-orta katmanlı, bitümlü, killi mikritlere

geçer. Daha üstte koyu gri renkli, orta-kalın katmanlı, sert, bitümlü, düzenli bir şekilde tekrarlanan çört yumru ve bantlı mikritik kireçtaşları ile devam eder.



Avdan Formasyonu (Ea) : Üst Paleosen-Alt Eosen yaşlı Avdan Formasyonu; altta Belkuyu Formasyonu ile geçişli olup, üstte Bozkır ve Bolkar Birliğine ait formasyonlar tarafından tektonik olarak örtülür. Formasyonun kalınlığı 120 m'dir. Birim genelde filiş özelliğindedir. Sarımsı boz renkli, ince katmanlı kumtaşı-şeyl ardalanması ile kırıntılı kireçtaşı ara düzeylerinden oluşur ve Belkuyu Formasyonunun üst düzeylerinde görülen bordo-kırmızı renkli çamurtaşlarının üzerine uyumlu olarak gelir. Kumtaşları; derecelenmeli, ince orta taneli ve kötü boylanmalı olup, bileşenleri çört, radyolarit, volkanit, kuvars ve karbonat tan oluşmaktadır. Şeyller gri renkli, ince katmanlı olup, yer yer iri çört yumruları içerir. Üste doğru kumtaşları istifte egemen olur.

Ekinlik Formasyonu (Tre) : Üst Triyas yaşlı formasyon kireçtaşı, killi kireçtaşı, dolomit, kuvarsit ve şeyl gibi karbonat ve kırıntılı kayaların ardalanmasından oluşur. Kil, mil, kum boyu kırıntılı kayalarla sığ denizel kireçtaşlarının düzensiz ardalanmasından oluşan formasyon, aralarında belirgin fasiyes değişikliği bulunan ve birbirleriyle yanal ve düşey geçişli farklı istifleri kapsar. İstifin üst kesimlerinde kireçtaşı resifleri gelişmiştir.

Sinat Dağı Kireçtaşı (Jks) : Alt-Orta Liyas'tan Alt Kretase'ye kadar çökelim aralığı olan birim, tamamen neritik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Birim, Ekinlik Formasyonunu uyumsuz olarak örter. Bentik foraminiferli ve algli stiftaşı-vaketaşı türünden kireçtaşları egemen kaya türünü oluşturur. Formasyon;oolitli tanetaşı, pelletli, biyoklastlı tane taşı ve makro fosilli vaketaşı düzeylerini de kapsar.

3. TDM ÇALIŞMALARI VE PERFORMANS ANALİZİ

Tünel delme makineleri; günümüzde başta şehir içi raylı sistemler (metro) ve hidroelektrik santral (HES) projeleri olmak üzere sulama, içmesuyu gibi uzun bir güzergah boyunca sürekli ve yüksek performans gerektiren tünel açma işlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Açılacak olan tünelin çapına, deleceği zeminin jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre tasarlanan TDM'ler, her proje için özel olarak üretilir (Fruguglietti vd., 2000). Derivasyon, sulama, içme suyu ve enerji tünelleri, genellikle baraj gövdesinin yanal olarak dayandığı sağlam kayalar içinde açılır. Dolayısıyla tünel açma işleminde kayanın, kazı sırasında oluşan ikincil gerilmelerden en az derecede etkilenmesi ve bu sayede minimum tahkimat gereksinimleri ile donatılması istenmektedir.TDM ile tünel açma yöntemi ise, sahip olduğu kazı performansı ve eşzamanlı tahkimat desteği sayesinde klasik del-patlat ve küçük çaplı mekanik kazıcıların kullanıldığı konvansiyonel tünel açma yöntemlerine nazaran daha ekonomik ve verimlidir. Günümüzde proje için uygun TDM seçimi, toplam proje maliyetleri üzerinde doğrudan belirleyici bir durum almıştır (Alber vd., 2000). Bu projede geçilecek jeolojik birimlerin jeoteknik özelliklerine ve açılacak tünelin boyutlarına bağlı olarak Çizelge 1'de özellikleri belirtilen TDM seçilmiş ve kullanılmıştır. Tünelin 17034m'lik bölümü TDM ile, girişteki yaklaşık 995m'lik bölümü ise klasik yöntemlerden del-patlat yönetmiyle açılmıştır. TDM ile açılan bölüm için yapılan işler ve zaman kayıpları tek tek hesaplanmıştır. Buna göre her ay için 28 gün (672 saat) çalışma üzerinden toplam 369 saat kayıp, dolayısıyla makinenin gerçek çalışma süresinin ortalama 11 saat olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 1.MaviTünelinde kullanılan TDM'in genel teknik özellikleri

Model	Çift Kalkanlı 0488 120
Çap	4880 mm
Kesici adedi	32
En yüksek kesici çapı	17"
Güç	6 x 315 KW
Devir	0 – 10,9 rpm
Dönme momenti (%95)	0'dan 7,5 rpm'eTork: 2367 KNM 10,9 rpm'deTork: 1620 KNM
İtki gücü	25538 KN
Silindir sayısı	10
Silindir çapı	350 mm
Çalışma basıncı	350 bar
Taşıma bandı uzunluğu	19 + 64 + 45,5= 128,5 m

TDM'nin aylık ilerleme değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler dikkate alındığında, günlük ortalama ilerleme 16,89 m olarak hesaplanmaktadır.

Son yıllarda tünel kazısı için seçilen TDM'in projenin bütünü üzerindeki ekonomik etkileri uluslararası çalışmalarda da ön plana çıktıkça, fizibilite çalışmaları sırasında TDM performansının "öngörülebilirliği" üzerine de çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Temel olarak TDM'in verimi zeminin jeoteknik özelliklerinden etkilenmekle birlikte, makine tasarımının da bu konuda önemli rol oynadığı bilinmektedir (Nielsen vd., 1993). Bu noktadan hareketle geliştirilen çalışmalar genelde daha çok kaya kütle değerlendirme kriterleri üzerine yoğunlaşmış ve sonuçta mühendislik jeolojisi özellikleri dikkate alınarak yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu yaklaşımların en çok kullanılanlardan biri,Barton (1999) tarafından 145 adet TDM kazısı esas alınarak geliştirilen Q_{TDM} yöntemidir. Bu yöntemde; zeminin jeomekanik özellikleri ile makine parametreleri bir arada kullanılarak, TDM'in tünel güzergahı boyunca tek seferdeki (vardiyada) kazı verimliliği (teorik ilerleme hızı) m/saat cinsiden tahmin edilebilmektedir. Yöntemde kullanılan temel formüller aşağıda, Mavi tüneli için yapılan hesaplamalar Çizelge 3'te verilmiştir.

$$Q_{TBM} = Q*(SIGMA / F^{10}/20^{9})*(20/CLI)*(q/20)*(\sigma\theta/5) \quad (1)$$

$$SIGMA = 5 * \gamma * Q * \sigma_C /100 \quad (2)$$

$$PR = 5 (Q_{TBM})^{1/3} \quad (Q_{TBM} > 1 \text{için bu formül, } Q_{TDM} < 1 \text{ için abaklar kullanılır.}) \quad (3)$$

$$AR = PRxT \quad (4)$$

Q : Kaya kütle değeri
SIGMA: Kaya dayanım değeri
F : Kesici disklere binen ortalama yük
CLI : Disklerin sanayi ömür indeksi
q : Kayanın kuvars içeriği (%)
σ_C : Kayanın tek eksenli basınç dayanımı
$\sigma\theta$: Tünel aynasındaki kayanın dayanım değeri
PR : Penetrasyon oranı
T : Zaman
AR : Teorik ilerleme hızı (m/sa)

Çizelge 2. TDM ilerleme sonuçları

Tarih	Ring Sayısı (adet)	Segment Kümülatif Uzunluk (m)	Formasyon Adı	Jeoloji	Uzunluk (m)
OCAK-2009	160	208	Belkuyu	Dolomitik Kireçtaşı	2337
ŞUBAT-2009	270	559		Dolomitik Kireçtaşı	
MART-2009	460	1157		Dolomitik Kireçtaşı	
NİSAN-2009	459	1754		Dolomitik Kireçtaşı	
MAYIS-2009	449	2337		Dolomitik Kireçtaşı	
HAZİRAN-2009	434	2802	Avdan	Fliş,Kumlu Kireçtaşı	465
TEMMUZ-2009	385	3302	Ekinlik	Kalsit dolgulu Kçt	500
AĞUSTOS-2009	245	3621	Sinat Dağı	Kireçtaşı	5343
EYLÜL-2009	439	4191		Kireçtaşı	
EKİM-2009	541	4895		Kireçtaşı	
KASIM-2009	471	5507		Kireçtaşı	
ARALIK-2009	633	6330		Kireçtaşı	
OCAK-2010	518	7003		Kireçtaşı	
ŞUBAT-2010	403	7527		Kireçtaşı	
MART-2010	518	8200		Kireçtaşı	
NİSAN-2010	159	8407		Kireçtaşı	
MAYIS-2010	18	8431		Kireçtaşı	
HAZIRAN-2010	165	8645		Kireçtaşı	
TEMMUZ-2010	190	8892	Ekinlik	Kalsit dolgulu Kçt	4514
AĞUSTOS-2010	393	9403		Kalsit dolgulu Kçt	
EYLÜL-2010	252	9731		Kalsit dolgulu Kçt	
EKİM-2010	514	10399		Kalsit dolgulu Kçt	
KASIM-2010	261	10738		Kalsit dolgulu Kçt	
ARALIK-2010	575	11486		Kalsit dolgulu Kçt	
OCAK-2011	479	12108		Kalsit dolgulu Kçt	
ŞUBAT-2011	507	12767		Kalsit dolgulu Kçt	
MART-2011	23	12797		Kalsit dolgulu Kçt	
NİSAN-2011	28	12834		Kalsit dolgulu Kçt	
MAYIS-2011	250	13159		Kalsit dolgulu Kçt	
HAZİRAN-2011	220	13445	Polat	Dolomitik Kireçtaşı	3875
TEMMUZ-2011	300	13835		Dolomitik Kireçtaşı	
AĞUSTOS-2011	390	14342		Dolomitik Kireçtaşı	
EYLÜL-2011	398	14859		Dolomitik Kireçtaşı	
EKİM-2011	390	15366		Dolomitik Kireçtaşı	
KASIM-2011	412	15901		Dolomitik Kireçtaşı	
ARALIK-2011	315	16311		Dolomitik Kireçtaşı	
OCAK-2012	255	16642		Dolomitik Kireçtaşı	
ŞUBAT 2012	301	17034		Dolomitik Kireçtaşı	

Çizelge 3.Tünelde ki birimler için hesaplanan Q_{TDM} değerleri

Formasyon Adı	Uzunluk (m)	Çap (m)	Q	Q_{TBM}	AR (m/sa)
Belkuyu	2337	4,88	0,1	0,0079	1,62
Avdan	465	4,88	0,25	0,0029	1,82
Ekinlik	500	4,88	0,4	0,0027	1,72
Sinat	5343	4,88	0,25	0,0342	1,84
Ekinlik	4514	4,88	0,25	0,0167	1,65
Polat	3875	4,88	0,1	0,0087	1,78

Q_{TBM} yöntemi kullanılarak her bir birim için hesaplanan teorik ilerleme hızlarının ortalaması 1,73 m/sa'dir. Buna göre günlük ortalama 11 saat çalışma için yapılması gereken ilerleme 19,03 m çıkmaktadır. Uygulamada gerçekleşen ilerleme hızı ise, ortalama 16,89 m/gün'dür.

Kazının ilk aşamalarında, TDM'in kurulumu ve tam performansla işletmeye alınması için geçen zamandan ötürü meydana gelen teknik gecikmelerin bu farkta payı vardır. Gerek jeolojik, gerekse mekanik nedenlerden ötürü meydana gelen söz konusu teorik ve fiili performans farkları TDM kazılarında % 70 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Buradaki fark ise % 12 civarında olup, oldukça iyi bir performans elde edildiğini göstermektedir.

Jeolojik kesit ve aylık ilerleme performansları karşılaştırıldığında; TDM in kurulum, tamir ve yapılan mekanik değişiklikler sırasında kaybettiği zaman dışında performansını doğrudan etkileyen özelliğin litoloji ve jeolojik yapı (karstik boşluk, fay, yeraltısuyu vb.) olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü aylık ilerleme performansında bazı aylarda kireçtaşında geçilen boşluklara yada yumuşak dolgulu bölümlere karşılık gelmektedir. Diğer tarihlerde ise, sert ve orta sert kireçtaşında ilerlenmiştir. Bu da birimlerin jeoteknik özelliklerinin önemini ortaya koymaktadır.

Tünelde başlıca iki problemle karşılaşılmıştır. Bunlardan birincisi sıkışma, ikincisi ise karstik boşluk kesilmesi sonucu oluşan su ve malzeme gelişleridir. Bu problemlerle ilgili yapılan çalışmalar aşağıda kısaca verilmiştir.

Tünelde TDM zemin baskısı nedeniyle iki bölgede sıkışma meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak km: 13+800'de 20 gün ve km:8+800'de 75 gün beklenmek zorunda kalınmıştır.

Bu bölgelerde; arka kalkan bölgesindeki sağ ve sol yan duvarlardan galeriler açılarak tamamen insan gücüyle havalı el tabancaları, kazma vb. el aletleri kullanılarak zemin malzemesi temizlenmiş, dışarıda hazır bükülüp getirilen iksalar yan duvar kısımlarına mesnetlenip ve omuz kısımlarından tavana doğru iksa parçaları birbirine eklenip tavanda birleştirilerek zemine destek sağlanıp altında güvenli çalışma yapılarak makinenin üst kısmına ulaşılmıştır.Daha sonra makine üstünde baskı yapan zemin ön kafa bölgesine doğru temizlenip, yine iksalar atılarak makine üstünde hem boşluk oluşturulmuş hem de güvenli çalışma ortamı sağlanmıştır. En son olarak ise,ön kafa bölgesine ulaşıldıktan sonra makinenin tüp kısmı ile zemin arasındaki bu boşluk ince çakıl (pea-gravel) enjekte edilerek doldurulmuş ve makinenin ilerlemesi sağlanmıştır. Bu sıkıntılar genelde zemin türü birimlerin geçişlerindeki ezik zonlarda olmuştur.

Mavi Tünel'de TDM ile yapılan kazı çalışmaları sırasında 26.02.2011'de km:12+820'de Üst Triyas yaşlı kireçtaşı, killi kireçtaşı, dolomit, kuvarsit ve şeyl gibi karbonat ve kırıntılı kayaların ardalanmasından oluşan Ekinlik Formasyonu içerisindeki kireçtaşında rastlanan süreksizlikten su gelişi olmuştur. TDM kazı çalışmalarına yaklaşık 5-6 m daha ilerledikten sonra ise mağaraya rastlanmış ve tünele yaklaşık 360 l/s debi ile basınçlı su ile silt ve kumdan oluşan 20000 m^3malzeme

boşalımı meydana gelmiştir. Yapılan ilave çalışmalarla mağaranın bu kesimde km:12+820-12+872 arasında devam ettiği belirlenmiştir.

Gelen malzeme makine üzerinde hasara neden olmuş buna bağlı olarak tünel kazı ve enjeksiyon çalışmalarına 75 gün süreyle devam edilememiştir. Suyun debisinde zamana bağlı herhangi bir değişiklik olmaz iken, malzeme gelişi azalmıştır. Daha sonra tünel içerisinde ve makine üzerinde temizlik ve onarım çalışmaları yapılmıştır.

Bu bölgede birçok noktadan basınçlı su gelmesi nedeniyle yapılan çimento enjeksiyonu priz almadan yıkanmış ve başarı sağlanamamıştır. Bu nedenle basınçlı su gelişi ve malzeme gelişi olan bölgede iki bileşenli hızlı priz alan kimyasal malzeme ile enjeksiyon yapılması uygun bulunmuştur. Burada km:12+820, km:12+836 ve km:12+872'de 4,8 m derinliğindeki kuyulardan poliüretan esaslı hızlı kürlenen Meyco MP 355 A/3 adlı kimyasal madde enjeksiyonu yapılmıştır. Bu çalışmalardan sonra tünele boşalan su miktarı 150 l/s kadar düşürülmüştür. Daha sonra belirtilen kilometrelerdeki kuyuların aralarına girilerek kimyasal enjeksiyona devam edilmiş ve su tamamen kesilmiştir. Kimyasal enjeksiyon tamamlandıktan sonra ise klasik çimento enjeksiyonu ile sağlamlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu bölgede daha sonra yapılan gözlemlerde herhangi bir su gelişi olmamıştır. Ancak yoğun malzeme ve su gelişi düşünüldüğünde, tünelde basınçlı çalışacağı dikkate alınarak bu bölgenin tekrar tehlike oluşturmaması için çelik kaplama yapılmasına karar verilmiştir. Verilen karar doğrultusunda 3 cm kalınlığında çelik kaplama montajı yapılmış olup, çelik kaplama ile kaya içerisine bulonlar yerleştirilerek kontak enjeksiyonu tamamlanmıştır.Kimyasal enjeksiyon çalışması kapsamında 827 m delgi yapılmış ve toplam 144540 kg malzeme kullanılmıştır.

Mavi Tünel'in TDM ile açılan bölümünün tamamında yapılan çimento enjeksiyonunda ise 71799 m delgi yapılarak toplam 75805 m^3 katı madde (57992 ton çimento ve 1740 ton bentonit)basılmıştır.
Ayrıca bu problemlerin dışında; bazı zeminlerde (Seydişehir formasyonu siyah renkli şist),az da olsa, gelen suyla birlikte oluşan nem, kafa bölgesine ve disklere yapışarak ağırlık oluşturmuş ve kafa dönüşünü engelleyerek ilerlemede sorun yaratmıştır. Bu sorunlar kafa temizliği yapılarak (insan gücü ile el tabancaları kullanılarak) giderilmiş ve ilerleme sağlanmıştır.Bu bölgelerde zaman zaman yapışmayı engelleyici kimyasal malzemeler de kullanılmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada,Bağbaşı Barajı ve Mavi Tüneli (Konya) inşaatı kapsamında yapılan tünel kazısı ele alınmıştır. Mavi Tünelinin kazı çapı 4.88 m, nihai çapı 4.20 m olup tünel delme makinesi ile açılan toplam uzunluk 17034 m'dir.

Tünelde dolomitik, çört yumrulu, bitümlü, killi kireçtaşından oluşan Belkuyu formasyonu, kumtaşı, kiltaşı ve killi kireçtaşından oluşan Avdan formasyonu, kireçtaşı, killi kireçtaşı, şeyl ve kumtaşından oluşan Ekinlik formasyonu, karstik kireçtaşından oluşan Sinatdağı formasyonu, dolomit ve dolomitik kireçtaşından oluşan Polat formasyonu geçilmiştir.

Tünelde TDM zemin baskısı nedeniyle iki bölgede sıkışma meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak, km: 13+800'de 20 gün ve km:8+800'de 75 gün beklenmek zorunda kalınmıştır.Bu bölgelerde; arka kalkan bölgesindeki sağ ve sol yan duvarlardan galeriler açılarak iksalar ile duraylılık sağlanmış ve baskı yapan malzeme temizlenmiştir.

Kazı çalışmaları sırasında km:12+820'de kireçtaşında rastlanan mağaradan tünele yaklaşık 360 l/s debiyle basınçlı su ile silt ve kumdan oluşan 20000 m^3 malzeme boşalımı meydana gelmiştir. Gelen malzeme makine üzerinde hasara neden olmuş ve buna bağlı olarak tünel kazı ve enjeksiyon çalışmalarına 75 gün süreyle devam edilememiştir. Bu bölgede birçok noktadan basınçlı su gelmesi nedeniyle yapılan çimento enjeksiyonu priz almadan yıkanmış ve başarı sağlanamamıştır.

Bu nedenle basınçlı su gelişi ve malzeme gelişi olan bölgede iki bileşenli hızlı priz alan kimyasal malzeme ile enjeksiyon yapılmış ve suyun kesilmesi sağlanmıştır.

Bazı bölgelerde yeraltısuyu nedeniyle oluşan nem, kafa bölgesine ve disklere yapışarak ağırlık oluşturmuş ve kafa dönüşünü engelleyerek ilerlemede sıkıntı yaratmıştır. Bu sorunlar kafa kısmında yapılan temizlik ve gerekmesi durumunda yapışmayı engelleyici kimyasal malzemeler kullanılarak giderilmiş ve ilerleme sağlanmıştır.
Mavi Tünel'in TDM ile açılan bölümünün tamamında 71799 m delgi yapılarak 75805 m^3çimento enjeksiyonun yapılmıştır. Kimyasal enjeksiyon çalışması kapsamında ise 827 m delgi yapılmış ve toplam 144540 kg malzeme kullanılmıştır.

Günlük ortalama hız Q_{TBM} yöntemi ile 19,03 m/gün olarak hesaplanmış, tünel tamamlandığında ise gerçekleşen ortalama hızın 16,89 m/gün olduğu tespit edilmiştir. Kazının ilk aşamalarında, TDM'in kurulumu ve tam performansla işletmeye alınması için geçen zamandan ötürü meydana gelen teknik gecikmelerin bu farkta payı vardır. Gerek jeolojik, gerekse mekanik nedenlerden ötürü meydana gelen söz konusu teorik ve fiili performans farkları TDM kazılarında % 70 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Buradaki fark ise % 12 civarında olup, oldukça iyi bir performans elde edildiğini göstermektedir.

Jeolojik kesit ve aylık ilerleme performansları karşılaştırıldığında; TDM'nin kurulum, tamir ve yapılan mekanik değişiklikler sırasında kaybettiği zaman dışında, performansını doğrudan etkileyen özelliğin litoloji ve jeolojik yapı (karstik boşluk, fay, yeraltısuyu vb.) olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü aylık ilerleme performansında bazı aylarda kireçtaşında geçilen boşluklara ya da yumuşak dolgulu bölümlere karşılık gelmektedir. Diğer tarihlerde ise, sert ve orta sert kireçtaşında ilerlenmiştir.
Tünel delme makinelerinden en iyi verimin alınabilmesi için makine tipinin ve özelliklerinin seçimi çok önemlidir. Bu nedenle tünellerin projelendirmesi aşamasında; proje güzergahının jeolojisine, geçilecek formasyonların jeoteknik özelliklerine, bölgenin tektonizmasına, yeraltısuyu durumuna ve topoğrafik şartlara özel önem verilmelidir. Bu kapsamda yeterli sayıda ve derinlikte sondajla arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

Alber, M., 2000. Advance rates of hard rock TDM sand their effects on Project economics. Tunnelin gand Underground Space Technology, 15, 1.

Blumenthal, M.M, 1947.Seydişehir-Beyşehir hinterlandındaki Toros dağlarının jeolojisi. M.T.A. Yayını.,Seri D, No. 2, Ankara.

Dean,W.T.,Monod, O., 1970. The Lower Paleozoic stratigraphy and faunas of the Taurus Mountains near Beyşehir, Turkey: I. Stratigraphy. Bull. British. Museum(Nat. History). Geology, 19(8), 413-426.

Barton, N.,1999. TDM performance estimation in rockusing Q_{TDM}, TunnelingInt., Milan.

Fruguglietti, A.,Guglielmetti, V., Grasso, P., Grasso, G., Carrieri, G., S. Xu, 2000. Selection of the right TDM to excavate weathere drock sand soils. Technical Note.

Nielsen, B., Özdemir, L.,1993. Hard rock tunnel boring prediction and field performance. Procceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conferance.

Bitlis Regülatörü ve HES Proje Alanının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi

Engineering Geological Investigation of the Bitlis Regulator and HEPP Project Area

A. E. Göksu[1], Y. Leventeli[2,*]

[1] *Bitlis Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Bitlis*
[2] *Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Antalya*
*(*leventeli@akdeniz.edu.tr)*

ÖZ: Fosil yakıtlarının sınırlı olması ve olumsuz çevre etkileri nedeniyle "yenilenebilir enerji kaynaklarına" yönelim artmıştır ve bu tip enerji kaynaklarının başında "hidro-enerji" gelmektedir. Bununla birlikte, büyük ölçekli barajların yerini nehir tipi hidroelektrik santraller almaya başlamıştır. Bu tip mühendislik projeleri için yer seçiminde maliyet–emniyet/güvenlik–zaman–estetik/çevre parametreleri göz önünde tutulur. Ancak, uygulamada bu parametrelerin bir ya da birkaç tanesi dikkate alınmaktadır. Oysa ki; birimlerin jeolojik ve jeoteknik özellikleri göz önünde tutularak yapılacak bir proje tasarımı kısa sürede tamamlanacak ve uzun ömürlü, ekonomik ve çevre dostu olacaktır. Bitlis çayı üzerinde yapılması planlanan "Bitlis Regülatörü ve HES Projesi" önemli mühendislik projelerinden biridir. Proje, Bitlis-Diyarbakır karayoluna paralel, uzunluğu yaklaşık 15 km olan bir koridorda planlanmıştır. Bu araştırmada regülatör, iletim tüneli, yükleme havuzu, cebri boru ve santral binası gibi sanat yapılarının yer aldığı yaklaşık 85 km^2'lik bir alanda mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle olası sanat yapılarının yer alacağı birimlerde jeolojik, mühendislik jeolojisi ve hidrojeolojik tanımlamalar yapılmıştır. Jeoteknik çalışmalar sırasında 9 adet araştırma sondajına ve laboratuvar deney verileri kullanılmıştır. Ayrıca süreksizlik araştırmaları, özellikle tünel giriş ve çıkışlarında olmak üzere şev duraylılık analizleri, tüneller boyunca kaya kütle sınıflamaları ve kazı/destek önerileri yapılarak jeoteknik çalışmalar tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bitlis, Hidroelektrik Santrali, Mühendislik Jeolojisi, Jeoteknik

ABSTRACT: *Due to the limited availability and the adverse environmental impact of fossil fuels, the usage of the "renewable energy source" has been increased and the "hydro-energy" is one of the important source among them. Besides; the river type hydro-electric power plants have began to be more preferred than the large-scale dams. The cost–safety/security–time–aesthetic/environmental parameters should be taken into consideration during the site investigation for this type of engineering projects. However, some of these parameters are taken into account in practice. Whereas; a project which is designed according to geological, engineering and geotechnical properties of units, will be completed in a short time, will be long-lasting, economical and environmentally friendly. "Bitlis regulator and HEPP Project" is one of the major engineering projects scheduled on the Bitlis Creek. The project is scheduled with 15 km length in a parallel corridor to Bitlis-Diyarbakır Highway. In this research, engineering geological studies have been performed in an area about 85 km^2 which engineering structures like regulator, tunnel are located in. First of all; the geological, engineering geological and hydrogeological definitions of units under the potential engineering structures have been made. 9 research wells and laboratory data are used during the geotechnical studies. After that; discontinuity analysis was conducted, slope stability analyzes were performed especially in tunnel portals, rock mass classification and excavation/support recommendations were made for tunnels.*

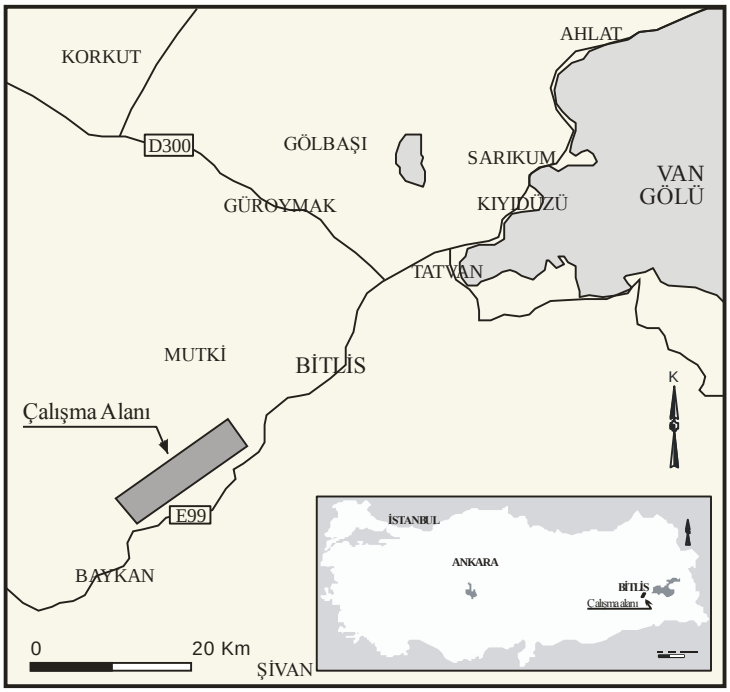
Keywords: *Bitlis, Hydro-Electric Power Plant, Engineering Geology, Geotechnics*

1. GİRİŞ

Ülkemizin topoğrafik ve hidrojeolojik özellikleri ve bazı yörelerdeki yağış yoğunluğu büyük su gücü potansiyelinin yanında, küçük hidroelektrik güç potansiyelinin de yaygın olarak bulunmasına olanak

sağlamıştır. Türkiye'de küçük hidroelektrik santrallerin gelişimi 1902 yılında başlamıştır. Bu tarihten itibaren, ülkenin pek çok bölgesinde hükümet birimleri, özel sektör ve yerel yönetimler tarafından çok sayıda küçük HES'ler inşa edilmiştir. Ancak, günümüze kadar enerji tüketimindeki alanındaki hızlı artışın bir sonucu olarak, Türkiye ekonomisine maksimum enerji temin etmek ve artan enerji talebini karşılamak amacıyla, büyük ölçekli HES projelerinin gelişimine öncelik verilmiştir. Son 30 yıl süresince küçük HES kapasitesindeki ortalama yıllık artış %5-%10 civarındadır (Gökdemir vd., 2012). Bitlis il merkezinin 20 km kadar güneybatısında merkez ilçesi sınırları içerisinde, Bitlis-Diyarbakır karayolu güzergahında, uzunluğu yaklaşık 15 km olan bir koridorda "Bitlis Regülatörü ve HES Projesi" planlanmıştır (Şekil 1). Bitlis deresi üzerinde 1238.00 m talveg kotunda inşa edilecek regülatör yapısı ve sağ sahilde çökeltim havuzu ile elde edilecek suyun yaklaşık 12 km uzunluğundaki iletim tüneli aracılığıyla önce 1242.00 kotundaki yükleme havuzuna, buradan da cebri borular ile yaklaşık 880.00 m kotunda bulunan santral binasına iletilmesi ile enerji üretimi amaçlanmaktadır. Proje alanının imar durumu ve yerleşime uygunluğunun belirlenmesi amacıyla 2010 yılında özel bir firma tarafından proje sahasının imara esas jeolojik ve jeoteknik etüdü yapılmıştır. Sanat yapılarının planlandığı alanlarda toplam 209 m uzunluğunda 9 adet araştırma sondajı açılmış ve alınan karot örnekleri üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmada; yapımı planlama aşamasında bulunan Bitlis regülatörü ve HES projesinin regülatör, yükleme havuzu, santral yeri gibi sanat yapılarının inşa edileceği alanların temel zemin özelliklerinin belirlenmesi ve suyun iletiminde kullanılacak kuvvet tünelinin geçeceği güzergahtaki birimlerin mühendislik özelliklerinin tayini amaçlanmıştır. Bu amaçla; planlanan Bitlis regülatörü ve HES proje sahasının sanat yapıları ve kuvvet tüneli geçkisini de içine alan yaklaşık 85 km^2'lik bir alanın mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmıştır. Olası kuvvet tüneli geçkisinde yer alan birimlerde süreksizlik ölçümleri yapılmış, kaya kütleleri farklı sistemler kullanılarak sınıflandırılmışlardır. Ayrıca, kuvvet tünelinin giriş ve çıkış portallarında şev duraylılığı araştırılmıştır.

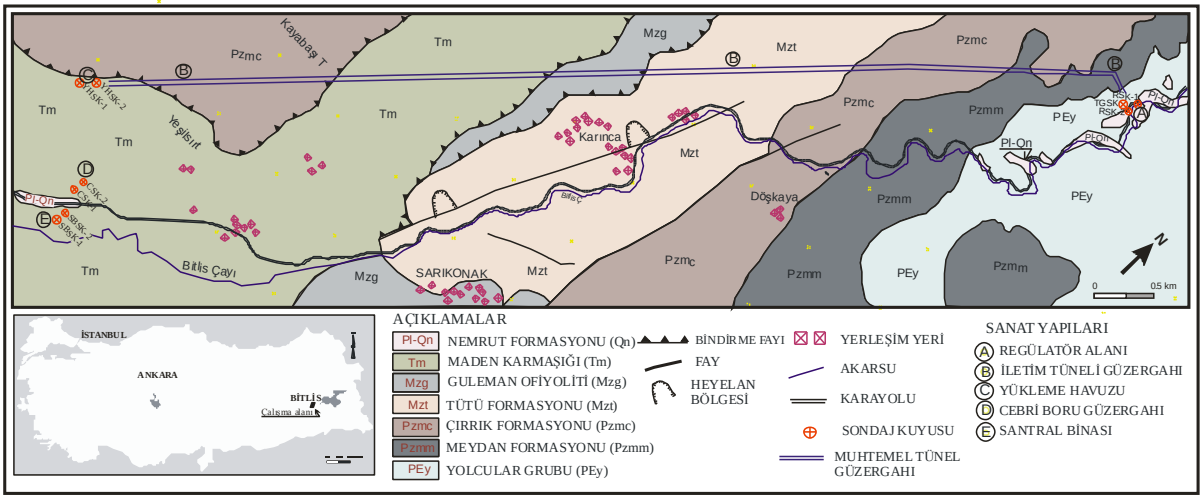


Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

İnceleme alanı, Türkiye tektonik birlikler sınıflamasında Ketin (1966) tarafından Toridler olarak adlandırılan birliğin güneyinde yer almaktadır. Bölgede, birbiri üzerinde tektonik dokanakla yer alan üç ana tektonostratigrafik birim görülmektedir (Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Bu birimlerden en üstte yer alanı "Bitlis Metamorfik Kuşağı"dır. Sayısız tektonik dilimlerden oluşan Bitlis Metamorfik Kuşağı'nın altında, Baykan ve Ziyaret karmaşıklarını içeren "Dilimli Kuşak" yüzeylenir. Dilimli Kuşak, bindirme dokanağı ile Arap Platformu çökellerini içeren, "Otokton Kuşağı" üzerinde yer alır.Temelde bulunan ve Prekambriyen yaşlı Yolcular Grubu, doğu-batı uzanımlı, her iki yöne dalımlı orta/yüksek dereceli açıyla kuzeye devrik, Gevaş-Bitlis antiklinalinin çekirdeğinde yüzeylenir (Çağlayan vd., 1983). Amfibolit, biyotit, gnays, muskovit gnays, mikaşistler ile bunları kesen ve metamorfizmaya uğramış granitik kökenli gözlü gnays, biyotitli metagranit kuvarsofeldspatik gnays ve metapegmatitten oluşan Pan-Afrikan temel kayaları, Yolcular grubu olarak isimlendirilir. Rengi mineral bileşimine göre, kirli beyazdan kızıl kahve ve yeşilimsi siyaha kadar değişir. Mutki Grubu, Bitlis Metamorfik kuşağının Paleozoyik-Alt Mesozoyik yaşlı birimleri ile temsil edilen metamorfik örtüsünü oluşturur. Meydan, Çırrık, ve Tütü formasyonlarını içermektedir. Meydan formasyonu kırıntılı karbonatlar ile volkanoklastiklerden oluşmaktadır. Çırrık formasyonu gri-siyah renkli, bitümlü orta- kalın tabakalı rekristalize kireçtaşları ve yer yer bunlar ile ara tabakalı sarı-gri renkli kalkşistler, grafitşist ve kuvarsitleri kapsamaktadır. Bitlis metamorfik biriminin ofiyolitik yerleşimi öncesi çökelmiş en genç birimini oluşturan Tütü formasyonu ise karbonatlardan ve volkanosedimanter kayaçlardan oluşmaktadır (Göncüoğlu ve Turhan, 1985).

Guleman ofiyolitleri, Bitlis metamorfik kuşağı üstünde tektonik dokanakla yer alan ileri derecede serpantinleşmiş ultramafik ile bunlarla ilişkili volkanosedimanter kayaçlardan oluşan karışık Guleman ofiyoliti olarak tanımlanmıştır (Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Paleosen – Eosen yaşlı Maden karmaşığı kaya türü olarak olistostromal kumtaşı ve çakıltaşı, çamurtaşı, yastık lavlar ve volkaklastikler düzensiz konumlu pembe-gri kireçtaşı birimlerinden oluşur. Kireçtaşları yer yer erime boşluklu bol çatlaklı ve düzensiz tabakalıdır. Bitlis Metamorfikleri üzerinde yer alan volkanoklastikler ile Bitlis çayı boyunca yüzeyleyen volkanitler Nemrut formasyonu adı ile tanımlanmıştır. Genellikle andezit-bazalt bileşiminde lav, kaynamış tüf ve pomzadan oluşur ve Pliyo-Kuvaterner olarak yaşlandırılmıştır. Dik yamaçların ve sırtların eteklerinde bulunan yamaç molozları vadide yaygın görülen güncel birimlerdir. Ayrıca Bitlis deresinde gözlenen alüvyonlar çevredeki kayaların tutturulmamış ince-kaba boyuttaki yuvarlak-küresel parçalarından oluşmaktadır.



Şekil 2. Bitlis regülatörü ve HES proje sahası mühendislik jeolojisi haritası (Göncüoğlu ve Turhan, 1981'de değiştirilerek)

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÇALIŞMALARI

Mühendislik jeolojisi çalışmaları; sondaj verileri, arazi gözlemleri ve pratik saha deneylerine dayanılarak yapılmıştır. Birimin mostra verdiği ve arazi yapısının çalışmaya uygun olduğu alanlarda ISRM (1981)'e göre süreksizlik etütleri yapılmıştır. Schmidt çekici yardımıyla kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımları dolaylı yoldan belirlenmiştir. Önerilen kuvvet tüneli güzergahındaki birimler için Kaya Kalite Göstergesi Sınıflaması (RQD) (Deere, 1963), Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi (RMR) (Bieniawski, 1989) ve Q Sistemi (Barton vd., 1974) sistemlerine göre kaya kütle sınıflamaları yapılmış; elde edilen değerlere göre kazı ve destek sistemleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonrasında söz konusu kaya kütle sınıflama sistemlerinden yararlanarak Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'de (Hoek ve Brown, 1997) belirlenmiştir. Yapımı planlanan su tünelinin kazı çapı projede 4.00 m olarak öngörülmüştür.

3.1. Birimlerin mühendislik özellikleri

Çalışma alanında yer alan birimlerin alansal yayılımı , sanat yapıları ve sondaj kuyu yerleri Şekil 2'de görülebilmektedir. Olası regülatör ve kuvvet tüneli giriş kısmında Yolcular Grubu yayılım göstermektedir. Genellikle metagranit, amfibolit, paragnays, gnays, pegmatit ve resifal karbonatlardan oluşan birimde kayaçların rengi kirli beyazdan kızıl kahve ve siyaha doğru değişmektedir. Birim içerisindeki mikaşistlerde bol miktarda foliasyon gözlenmektedir. Mikaşistler açık gri yeşilimsi renkte olup, el içerisinde foliasyon düzlemleri boyunca dağılıp parçalanmaktadır. Birimdeki gnays, pegmatitler ve rekristalize kireçtaşları orta-yüksek dayanımlıdırlar. Regülatör alanında kuvvet tüneli giriş kısmında yapılan süreksizlik ölçümlerinde süreksizliklerin pürüzlü-dalgalı, yakın-orta aralıklı, kuru, sıkı-kısmen açıklığa ve düşük-orta devamlılığa sahip olduğu görülmüştür. Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli sıkışma dayanımını arazide tahmin etmek amacıyla Schmidt çekici kullanılmıştır. Birimin Schmidt geri sıçrama değeri 55'dir. Çalışma bölgesinde olası regülatör alanından sonra Bitlis vadisinin sağ ve sol yamacında dar bir aralıkta gözlenen Meydan formasyonu; kırıntılı karbonatlar ve volkanoklastiklerden oluşmaktadır. Beyazımsı-gri renkli, masif dolomitik kireçtaşlarında süreksizlikler yakın-orta derecede aralıklı, genellikle düşük devamlılıktadır. Orta derecede açıklıklı, kuru, dalgalı-pürüzlü, dolgu malzemesi çoğunlukla kil ve kalsittir. Schmidt geri sıçrama değeri 40 olarak belirlenmiştir.

Tünelin her iki tarafında gözlenen Çırrık formasyonu; taze ve sarı-kirli beyaz bozunmuş yüzeyleri siyahımsı-gri olan kalkşişt, kuvarsit bantları içeren kristalize kireçtaşları ve mermerlerden oluşmaktadır. Kireçtaşları orta-kalın tabakalıdır. Birimde yapılan süreksizlik ölçümlerinde süreksizlikler "yakın-orta aralıklı", genellikle yüksek devamlılığa sahiptir. Süreksizlik açıklığı aşırı geniş, dalgalı-pürüzlü, dolgu malzemesi çoğunlukla kildir. Schmidt geri sıçrama değeri olarak 52'dir.
Tütü formasyonu; kuvvet tünelinin orta kesimlerinde yer almaktadır ve gri-sarı renkli, şeyl, kalkşist ara bantları içeren kristalize kireçtaşlarından oluşmaktadır. Yer yer serpantinleşme ve demir oksitlenmenin gözlendiği birimde volkanik bant geçişlerinin olduğu kısımlarda foliasyon oldukça iyi gelişmiştir. Süreksizlikler "orta aralıklı", genellikle düşük devamlılıklıdır. Çok geniş açıklıklı, dalgalı-pürüzlü, yer yer kil dolguludur. Schmidt geri sıçrama değeri 53 olarak tespit edilmiştir. Tünel geçkisi boyunca çok dar bir alanda gözlenen Guleman ofiyolitinin en yaygın kayaç türünü serpantinitler oluşturmaktadır ve inceleme alanında Tütü formasyonu ve Maden karmaşığı arasında bindirmeli olarak yer almaktadır. Ayrışmış serpantinitler zayıf ve düşük dayanımlıdır. Morfolojik engellerden dolayı süreksizlikler incelenememiştir.

Çalışma alanında geniş yer kaplayan Maden karmaşığı; bazaltik yastık lavlar, kırmızı-gri renkli çamurtaşları, kumtaşları, şeyler ve kireçtaşı bloklarından oluşmaktadır. Yeşilsırt köyü ve dolaylarında bazaltik yastık lavlar geniş bir yayılım sunarken, Cumhuriyet köyü yakınlarında ise kireçtaşları ve yer yer kumtaşları gözlenmektedir. Yastık lavlar kahverengi-gri renkte değişik boyutlarda olup dış kabuğu kırılgan özellik göstermektedir. Kireçtaşları ise gri-sarı renkli masif- kalın tabakalı ve yer yer erime boşluklu olarak gözlenmektedir. Kireçtaşlarında yapılan süreksizlik incelemelerinde süreksizliklerin

yakın-orta derece aralıklı, çok geniş açıklıklı, genellikle düşük devamlılığa sahip, dalgalı-pürüzlüdür. Schmidt geri sıçrama değeri 50'dir. Çizelge 1'de birimlerin, yapı alanlarındaki sondaj verilerinden ve laboratuvar çalışmalarından elde edilebilen, bazı temel mühendislik değiştirgeleri verilmiştir. Karot örneklerinin düzgün kesilememesi durumunda, tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yerine nokta yükü dayanım deneyi yapılmıştır.

Çizelge 1. Jeolojik birimlerin bazı temel mühendislik değiştirgeleri.

Sondaj No	Derinlik (m)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (kg/cm^2)	Nokta Yükü Dayanım İndeksi (kg/cm^2)	Elastisite Modulü (GPa)	Poisson Oranı (ν)
RSK-1	6	25.89		32.8		
RSK-1	8	25.40	246.03		5.703	0.182
RSK-1	15	25.33		30.1		
RSK-2	9.7	24.78		18.9		
RSK-2	11.5	29.52		16.4		
TGSK-1	10	25.73	532.32		9.336	0.262
TGSK-1	20	24.29	63.68		2.221	0.273
YHSK-1	9	25.91	273.70		6.39	0.197
YHSK-1	15	26.67	320.76		6.563	0.27
YHSK-1	20	25.82	451.56		8.883	0.311
YHSK-2	5	27.44	607.81		10.142	0.284
YHSK-2	8	27.48	715.81		11.29	0.203
CSK-1	8.5	26.11	458.06		8.82	0.212
CSK-1	15	25.74	340.63		6.974	0.282
CSK-1	25	25.87	386.39		7.585	0.307
CSK-2	17.5	23.56		16.1		
CSK-2	19	23.44		7.7		
CSK-2	30	26.28	324.55		6.565	0.029
SBSK1	23	26.96	444.71		7.374	0.287
SBSK1	30	26.11	383.43		7.027	0.256
SBSK2	10	26.16	360.00		7.665	0.219
SBSK2	20	26.16	305.76		5.587	0.193

Açıklamalar:
RSK: Regülatör alanındaki sondaj kuyusu, TGSK: Tünel giriş portalındaki sondaj kuyusu, CSK: Cebri boru alanındaki sondaj kuyusu, YHSK: Yükleme havuzu alanındaki sondaj kuyusu, SBSK: Santral binası alanındaki sondaj kuyusu

3.2. Kaya Kütle Sınıflaması

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, mühendislik tasarımının doğrudan yapılmasını sağlayabilecek bir araç olmamasına rağmen; nihai tasarımın yapılabilmesi için, tasarım hedefleri ve sahanın jeolojisi de dikkate alınarak, gözleme dayanan, analitik ve nümerik çözümleme teknikleriyle birlikte doğru kullanıldıkları zaman, ön tasarımda yararlı birer araç olabilmektedir (Ulusay, 2010).Bu nedenle projedeki sanat yapılarının tasarımında kullanılmak üzere sayısal veri sağlamak amacıyla litolojik birimler farklı kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılarak farklı koşullarda (en iyi, en kötü, normal) sınıflandırılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Birimlerin farklı kaya kütle sınıflama sistemlerine göre sınıflandırılması GSI değerleri.

	YOLCULAR GRUBU			MEYDAN FORMASYONU			ÇIRRIK FORMASYONU			TÜTÜ FORMASYONU			MADEN KARMAŞIĞI		
RQD	25			65			70			55			50		
RMR	62	46	52	69	50	57	69	57	62	75	59	68	65	49	58
Q	0.16	0.03	0.1	0.5	0.26	0.5	0.28	0.28	0.28	1.2	0.9	1.2	0.44	0.33	0.44
GSI	68	36	62	65	45	52	40	26	30	65	30	60	55	35	45
	En iyi	En kötü	Normal	En iyi	En kötü	Normal	En iyi	En kötü	Normal	En iyi	En kötü	Normal	En iyi	En kötü	Normal

Kuvvet tüneli giriş portalının bulunduğu Yolcular Grubu'nda yapılan kaya kütle sınıflamasına göre sırasıyla en iyi, en kötü ve normal koşullarda RMR değerleri 62 (II, iyi kaya), 46 (III, orta kaya), 52 (III, orta kaya); Q değerleri 0.16 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.03 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.1 (aşırı derecede zayıf kaya); GSI değerleri ise 68, 36, 62 olarak belirlenmiştir. Yapımı planlanan su tünelinin kazı çapı 4.00 m olarak öngörülmüştür. RQD ise 25'tir.Destek sistemleri "en kötü koşullar" göz önünde tutularak belirlenmeye çalışılmıştır. Buna göre, bu bölümde uygulanacak destek sistemi tavanda 5-10 cm, yan duvarlarda 10 cm çelik hasır takviyeli püskürtme betonu olarak belirlenmiştir.
Meydan Formasyonu'nda elde edilen değerler ise şöyledir: RQD değeri 65; RMR değerleri; 69 (II iyi kaya), 50 (III orta kaya), 57 (III orta kaya). Q değerleri; 0.5 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.26 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.5 (aşırı derecede zayıf kaya). GSI değerleri; 61, 45, 52'dir. 0.5-1 metre aralıklı sistematik bulonlamanın yanısıra tavanda 5-10 cm, yan duvarlarda 10 cm çelik hasır takviyeli püskürtme betonundan oluşacak bir destek sistemi uygun olacaktır.

Çırrık Formasyonu'nda yapılan kaya kütle sınıflamaları sonucunda RQD değeri 70; RMR değerleri 69 (II iyi kaya), 57 (III orta kaya), 62 (II iyi kaya); Q değerleri 0.28 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.28 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.28 (aşırı derecede zayıf kaya); GSI değerleri 40, 25, 30 olarak bulunmuştur. Bu birimde yapılacak kazıda 1 metre aralıklı sistematik bulonlama ile tavanda 5-10 cm yan, duvarlarda 10 cm çelik hasır takviyeli püskürtme betonu öngörülmüştür.

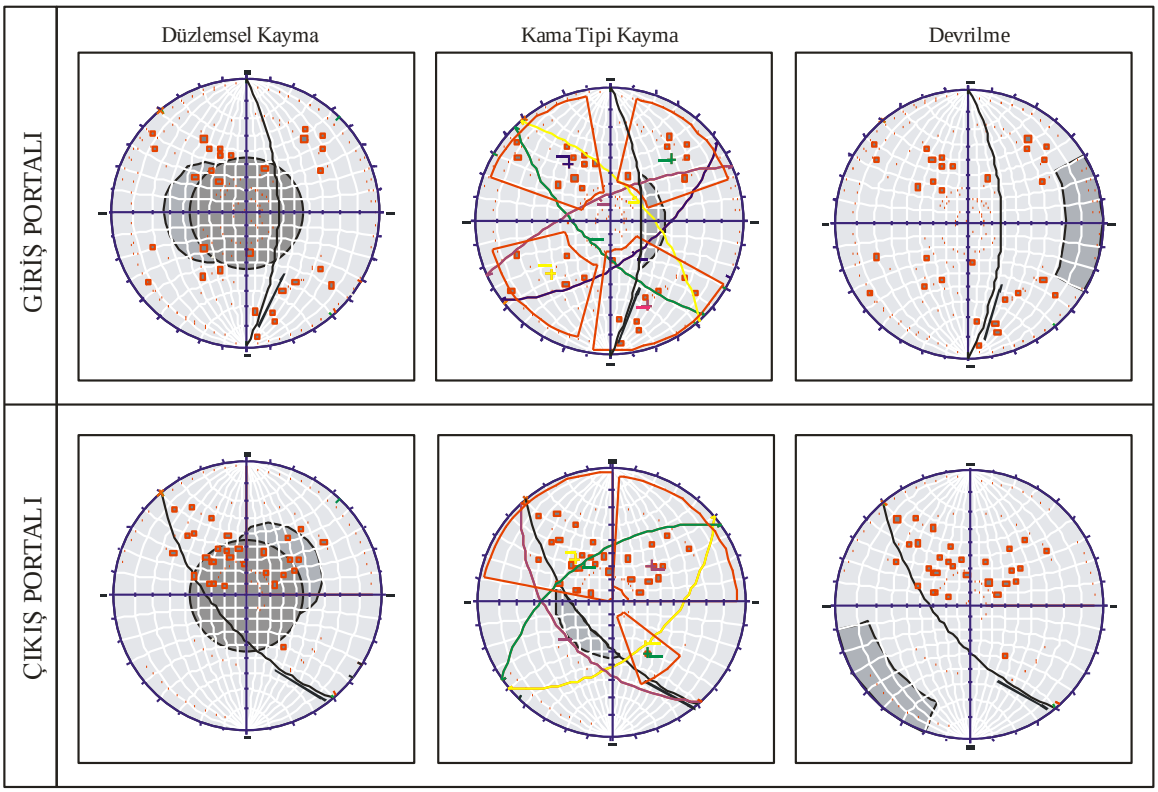
Tütü Formasyonu'nda yapılan kaya kütlesi sınıflamasına göre sırasıyla RMR değerleri 75 (II iyi kaya), 59 (III orta kaya), 68 (II iyi kaya); Q değerleri 1.2 (çok zayıf kaya), 0.9 (aşırı derecede zayıf kaya), 1.2 (çok zayıf kaya); GSI değerleri 65, 30, 65 olarak bulunmuştur. RQD ise 55'dir. Bu kısımda uygulanacak destek sistemi 1 metre aralıklı sistematik bulonlamanın yanısıra tavanda 2.5-5 cm, yan duvarlarda 10 cm çelik hasır takviyeli püskürtme betonu olarak belirlenmiştir.

Kuvvet tüneli çıkış portalı Maden Karmaşığı'nda yer almaktadır. Bu birimin RQD değeri 50'dir. RMR değerleri 65 (II iyi kaya), 49 (III orta kaya), 58 (III orta kaya); Q değerleri 0.44 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.33 (aşırı derecede zayıf kaya), 0.44 (aşırı derecede zayıf kaya); GSI değerleri 55, 35, 45 olarak bulunmuştur. 1 metre aralıklı sistematik bulonlama ve tavanda 5-10 cm, yan duvarlarda 10 cm çelik hasır takviyeli püskürtme betonu uygun görülmüştür.

3.3. Tünel portallarının duraylılığı

Proje alanında topoğrafik eğim oldukça yüksektir. Bu nedenle, burada yapılacak kazıların mümkün olduğu kadar dik yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde, kazı miktarı ile kazı maliyeti artacak ve doğaya geri dönüşü olmayan zararlar verilecektir. Bu gerekçelerle; iletim tüneli portallarında yapılan tüm kinematik analiz çalışmalarında, şevin eğimi 63° (2:1) olarak belirlenmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısının belirlenmesi sırasında Agliardi vd. (2013) temel alınmıştır. Buna göre süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısı ($\phi°$) "normal koşullar" için 45° alınmıştır. İletim tünelinin giriş portalı Yolcular Grubu'nda yer alırken, çıkış portalı Maden Karmaşığı'nda bulunmaktadır. Şekil 3'de her iki portal için yapılan deterministik kinematik analiz (Tuncay ve Ulusay, 2000) sonuçları verilmiştir.

Bunun için DIPS (Diedrichs ve Hoek, 1989) adlı program kullanılmıştır. Buna göre; giriş portalında yapılan kinematik analizlerin sonucunda düzlemsel ve kama tipi yenilme olası olup, devrilme riski ön görülmemiştir. Çıkış portalında ise, kama ve devrilme tipi duraysızlıklar beklenmezken, düzlemsel kayma riski bulunmaktadır. Proje aşamasında, bu verilerin geliştirilerek, limit denge analiz yöntemleri ile duraysızlık analizlerinin yeniden yapılması gerekmektedir.



Şekil 3. İletim tünelinin giriş ve çıkış portallarında yapılan kinematik analizler.

4. SONUÇLAR

Bitlis-Diyarbakır karayolu güzergahında, Bitlis il merkezinin 20 km kadar güneybatısında, uzunluğu yaklaşık 15 km olan bir koridorda "Bitlis Regülatörü ve HES Projesi" planlanmıştır. Bitlis Çayı üzerinde inşası planlanan bu projenin mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmıştır.

Sanat yapılarının yer aldığı birimler Yolcular Grubu, Meydan Formasyonu, Çırrık Formasyonu, Tütü Formasyonu ve Maden Karmaşığı'dır. Kuvvet tüneli giriş portalı Yolcular Grubu'nda yer alırken, çıkış portalı Maden Karmaşığı'ndadır. Kazı çapı 4.00 m olarak öngörülmüştür. Destek sistemleri "en kötü koşullar" göz önünde tutularak belirlenmiştir. Farklı kaya kütle sınıflama sistemlerinde yeralan birimlerin varlığı nedeniyle, delme-patlatma yöntemiyle açılması öngörülmüştür. Önerilen destek sistemlerinin başında, tavanda ve yan duvarlarda farklı kalınlıklarda olmak üzere püskürtmeli beton, çelik hasır ve yer yer bulonlama gelmektedir.

Projede kuvvet tünelinin yer seçiminde temel olarak santral yapısına olan düşü miktarı temel alınmıştır. Proje alanında arazi eğimi oldukça yüksektir. Bu nedenle, burada yapılacak kazıların mümkün olduğu kadar dik yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde, kazı miktarı ile kazı maliyeti artar; doğaya geri dönüşü olmayan zararlar verilir ve şev duraylılığı daha da önem kazanır. Bu nedenle; tünelin giriş portalındaki Yolcular grubundan ve çıkış portalındaki Maden karmaşığından alınan süreksizlik ölçümlerine dayanarak, eğimi 63° (2:1) olan şev için kinematik analiz yapılmıştır.

Buna göre giriş portalında düzlemsel ve kama tipi yenilme beklenirken çıkış portalında ise düzlemsel yenilme riski bulunmaktadır. Her ne kadar iyileştirme yöntemleri yaygın olarak kullanılsa da, maliyeti arttırması nedeniyle, başka seçenekler araştırılmalıdır. Bunların başında jeolojik ve jeoteknik parametreler göz önünde tutularak yapılan doğru yer seçimidir.

5. KATKI BELİRTME

Proje alanında yer alan sondajlar "Yersu Mühendislik Son. İnş Ltd.Şti." tarafından açılmıştır. Laboratuvar çalışmaları "Akademi Jeolojik Jeoteknik İnşaat Ltd. Şti. Zemin Mekaniği Laboratuvarı" tarafındanyapılmıştır. Yazarlar, her iki kuruluşa teşekkürü bir borç bilir.

6. KAYNAKLAR

Agliardi, F., Crosta, G.B., Mrloni, G., Valle, C., Rivolta, C., 2013. Structurally-controlled ınstability, damage and slope failure in a porphyry rock mass. Tectonophysic, 605, 34-47.

Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974.Engineering classification of rock masses for the design of rock support. Rock Mechanics, 6(4), 189-236.

Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering Rock Mass Classification. John Wiley and Sons.

Çağlayan, M., İnal, R.N., Şengün, M., Yurtsever, A., 1983. Structural setting of Bitlis massive. geology of the taurus belt. TJUS Proceeding.

Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mechanics and Engineering Geolology ,1(1), 16-22.

Diedrisch, M.S., Hoek, E., 1989. Dips: a computer program for stereographic net (ver. 2.2, advanced version). Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada.

Gökdemir, M., Kömürcü, M.İ., Evcimen, T.U., 2012. Türkiye Mühendislik Haberleri, 1, 18-26.

Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., 1981. 1/25000 ölçekli sayısal jeoloji haritaları, Muş L47 c2 Paftası. Türkiye Jeoloji Veri Tabanı, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, MTA, Ankara.

Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., 1985. Bitlis metamorfik kuşağı orta bölümünün temel jeolojisi. MTA. Raporu, No:7707.

Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. 34(8), 1165-1186.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock Characterisation, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford.

Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun tektonik birlikleri. MTA Dergisi, 66, 20-34.

Tuncay, E., Ulusay, R., 2000. Süreksizlik denetimli şev duraysızlıklarının değerlendirilmesinde olasılığa dayalı kinematik analiz yaklaşımı ve bir uygulama. Yerbilimleri, 22, 205-222.

Ulusay, R., 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:38, Genişletilmiş 5. Baskı.

Şev Duraylılığı ve Heyelanlar

Gündoğdu (Rize) Heyelanları ve Çevresel Etkileri

Gündoğdu (Rize) Landslides and Their Environmental Effects

S. Reis[1], A. Yalçın[1,*]

[1] *Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Aksaray*
*(*ayalcin@aksaray.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, Gündoğdu (Rize) bölgesinde bundan sonra gelişebilecek muhtemel heyelan alanlarının tespit edilmesi ve farklı koşullara göre bu yamaçların stabilitelerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bölgenin 1/10.000 ölçekli genel jeoloji haritası çıkarılmış, yaşlıdan gence doğru Melyat Formasyonu (Orta Eosen) ve alüvyon (Kuvarterner) şeklinde birimler sıralanmıştır. Daha sonra mühendislik jeolojisi kapsamında yapılan çalışmalarla, heyelanların yoğun görüldüğü ve hala aktif gerilme çatlaklarının izlendiği 5 farklı yamaç için 1/500 ölçekli yamaç kesitleri çıkarılmış ve stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Stabilite analizi yapılan yamaçların deformasyona uğramamış ve örselenmemiş kısımlarından alınan örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyonu (c), doygun, doğal ve kuru birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, porozite, doygunluk derecesi, boşluk oranı ve tane boyu dağılımı gibi zeminlerin indeks ve jeomekanik özellikleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek duraysızlık tehlikesi olan bölgeler belirlenmiş ve bu alanlarla ilgili olarak hareketi önlemeye yönelik çözüm önerileri sunulmuştur. Heyelanlar sonucunda 12 kişi ölmüş, onlarca bina hasar görmüş ve kullanılamaz hale gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gündoğdu, Heyelan, Stabilite Analizi, Çevresel Etki

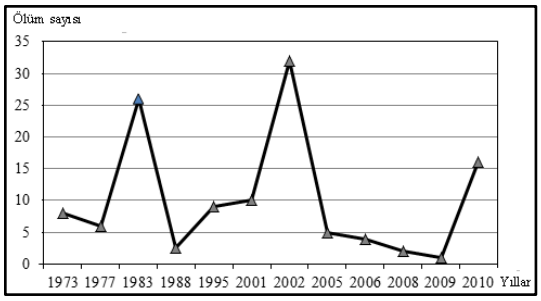
ABSTRACT: *The aim of the study is to determine the probable landslide territories and investigating their stabilities in different conditions around Gündoğdu (Rize) region. The 1/10000 scaled general geological map of the region which includes Melyat (Middle Eosen) and Alluvion (Quaternerian) was created. 1/500 scaled slope sections were produced and stability analysis was carried out for 5 different slopes those include active stress joints in the locations landslides frequently occur. The friction angle, cohesion, saturated weight per unit of volume, natural weight per unit of volume, dry weight per unit of volume, specific weight, porosity, saturation degree, void ratio, granulation and etc. features of then on-deformed and undisturbed parts of the samples of the slopes whose stabilities already found were determined by the laboratory tests. The obtained results were evaluated, the sliding hazard territories were determined and some suggestions are given to prevent the sliding and to create solutions for the current condition of the hazardous region.*

Keywords: *Gündoğdu, Landslide, Stability Analysis, Environmental Impact*

1. GİRİŞ

Eski çağlardan günümüze Dünya'da birçok değişiklik meydana gelmiştir. Teknolojik gelişmeler ve nüfus artışıyla birlikte insanların yaşam alanı ihtiyacı da artmış, bu artışı karşılamak için bilinçsizce yapılan yerleşim yerleri insanoğluna sorun çıkarmıştır. Bu sorunların bir kısmı doğal afetler olarak adlandırılabilir. Bir başka deyişle Dünya'da, büyük oranda veya tamamen insanların kontrolü dışında meydana gelen, büyük çaplı, tehlikeli olaylar doğal afetler olarak adlandırılmaktadır.Depremler, heyelan, volkanik olaylar, çığ ve sel başlıca doğal afetlerdendir(Ergünay, 2008).

Ülkemizde 1950-2005 yılları arasındaki dönem için afet türlerinin etkili nakil sayısına göre dağılımı konusunda yapılan değerlendirmeden (Gökçeoğlu vd., 2006), doğal afetler arasında depremlerden sonra heyelanların ikinci sırada yer aldığı anlaşılmaktadır.Özellikle Doğu Karadeniz bölgesine bakıldığında, doğal afetlerin büyük çoğunluğunu heyelanlar oluşturur. Karadeniz bölgesi deprem açısından aktif olmadığı için heyelanlar ön plana çıkıyor. Yine Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Rize ili heyelanlar nedeniyle can ve mal kaybının en çok yaşandığı yerdir (Şekil 1).



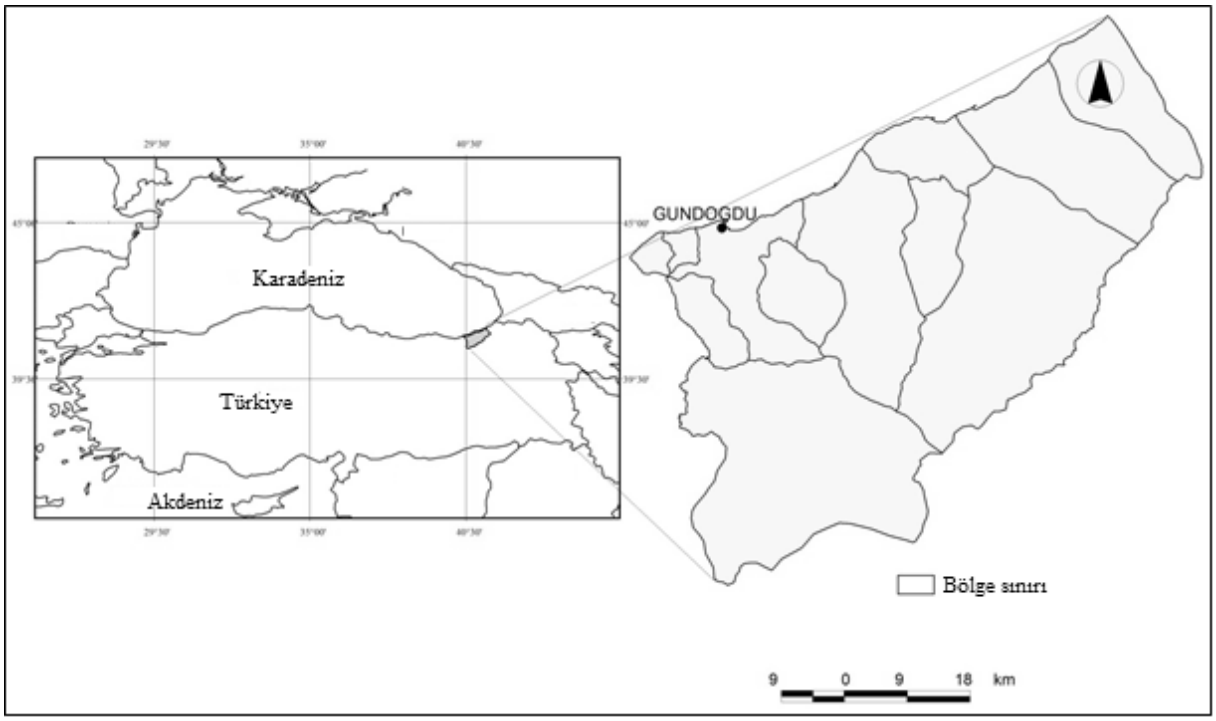
Şekil 1. Rize'de heyelan nedeniyle meydana gelen ölümlerin yıllara göre dağılımı (Yılmaz, 2011)

Çok çatlaklı kaya kütleleri, yamaç molozu ya da zemin kütlelerinin yamaç aşağı doğru hareketi olarak tanımlanan heyelanlara yoğun yağış, deprem dalgaları, su seviyesindeki değişiklikler, ya da hızlı dere yatağı erozyonları gibi doğal faktörler sebep olmaktadır. Bu çalışmada, Rize ili Gündoğdu beldesinde bundan sonra gelişebilecek muhtemel heyelan alanlarının tespit edilmesi ve bu yamaçlara yönelik farklı koşullara göre stabilitelerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2.GÜNDOĞDU HEYELANI VE İNCELENMESİ

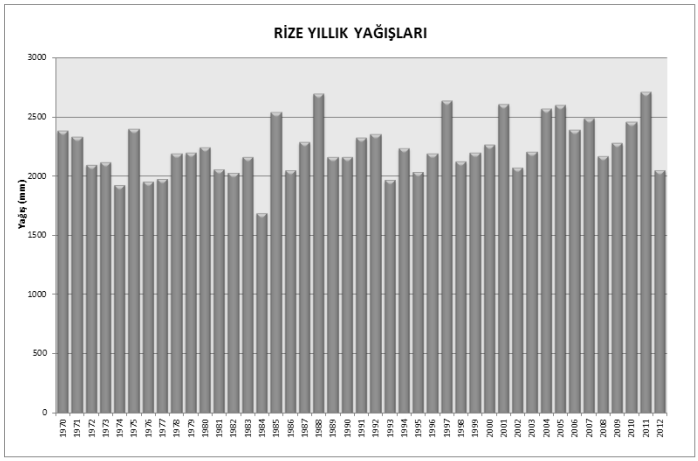
2.1. Araştırma Sahasının Litolojik, İklim ve Bitki Örtüsü Özellikleri

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde, Rize iline bağlı Gündoğdu beldesi ve çevresinde yer alır ve1/25 000 ölçekli F45-d4 ve F45-d3 paftasının sınırları içerisinde yaklaşık 7 km²'lik alanı kapsamaktadır (Şekil 2).



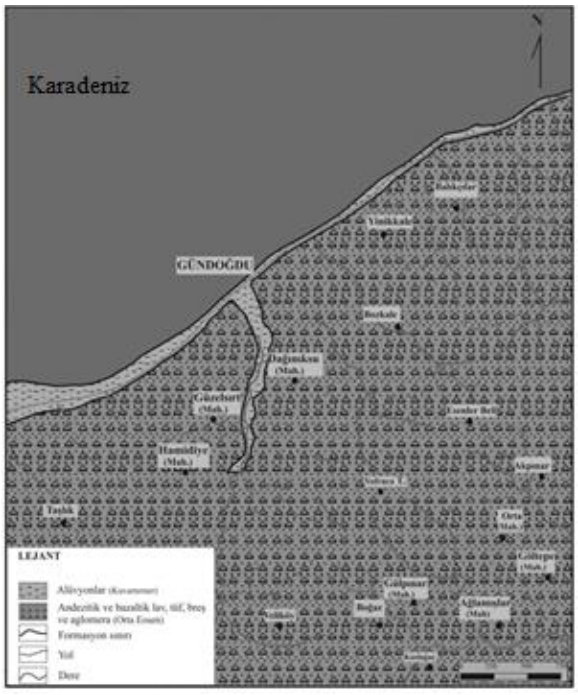
Şekil 2. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Gündoğdu beldesi, sahilden itibaren iç kesimlere doğru ani yükselen yamaçlara sahiptir. Gündoğdu'nun topoğrafyası, dar bir kıyı şeridiyle bunun hemen ardından denize paralel bir şekilde yükselen dağlardan oluşur. İnceleme alanı ve çevresinde Karadeniz iklimi ve bitki örtüsü hakimdir. Bol yağış alan ve dengeli bir sıcaklık rejimine sahip olan Rize sık ve gür bir tabii bitki örtüsüyle kaplıdır. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde bol yağışlı, ılıman bir iklim hakimdir. Rize ve çevresinde yazlar sıcak, kışlar ılık ve yağışlıdır. Son 40 yıllık veriler incelendiğinde, toplam yağış miktarı 2244,9 mm'dir(Şekil 3).



Şekil 3. Rize yıllık yağışları (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2014)

Çalışma alanını da içine alan bölgede, Korkmaz ve Gedik, (1988) ve Gedik vd.(1992) tarafından ayrıntılı jeolojik çalışmalar yapılmış ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Rize- Fındıklı- Çamlıhemşin arasında kalan bölgenin jeolojisi incelenmiştir. Bu çalışmada; bölgedeki formasyonlar yaşlıdan gence doğru; Hemşin dere Formasyonu, Rize Formasyonu, Kaplıca Formasyonu, Melyat Formasyonu, Pazar Formasyonu ve Hamidiye Formasyonu ayırtlanmıştır. Hamidiye Formasyonunun üstüne de alüvyonlar gelmektedir. Çalışma alanına ait genel jeoloji haritası Şekil 4'te verilmiştir (Demirel vd., 2010)

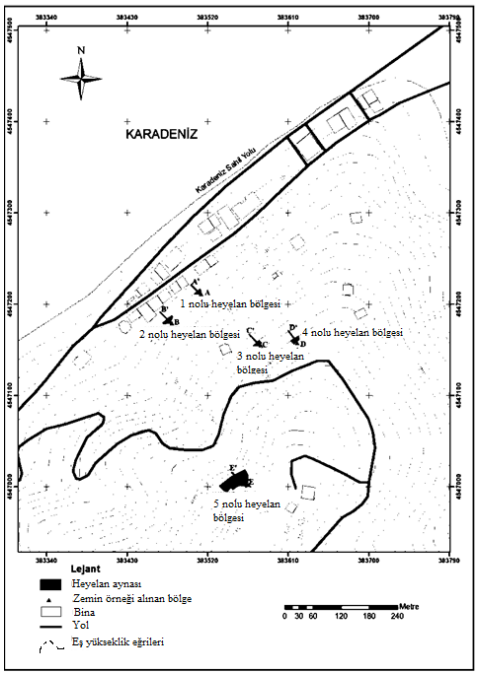


Şekil 4. Gündoğdu ve çevresinin 1/25000 ölçekli jeoloji haritası

2.2. Arazi Çalışmaları ve Heyelan Sahaları

Arazi çalışması; yamacın haritalanması, yamaçtaki aktif ve potansiyel heyelan alanlarının belirlenmesi, laboratuvar çalışmaları için örselenmiş ve örselenmemiş zemin örneklerinden yapılan deneyleri içermektedir. Alınan örneklere, Gündoğdu beldesinde meydana gelen heyelanlar için 1, 2, 3, 4 ve 5 numaraları verilmiştir (Şekil 5).Arazi çalışmalarının ilk aşamasında genel jeolojik özellikleri belirlemek için yörenin 1/25000 ölçekli genel jeoloji haritası hazırlanmış ve bölgede yüzeyleyen kayaçların stratigrafik dizilimleri ortaya konmuştur. İnceleme alanında 5 ayrı heyelan bölgesi tespit edilmiştir. Bu heyelanların karakteristik özellikleri yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları ile ortaya konulmuştur. Heyelanın meydana geldiği malzeme türü, heyelanın kayma yüzeyi, derinliği ve uzunluğuna ait veriler belirlenmiştir. Heyelan bölgelerinde daha iyi veri sağlayabilmek için 1/500 ölçekli topoğrafik harita hazırlanmış ve arazide gözlenen jeolojik unsurlar, yerleşim yerleri ve yolların konumları bu harita üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6).

Şekil 5. 1, 2, 3, 4 ve 5 nolu heyelanların genel görünümü



Şekil 6. İnceleme alanının haritası ve heyelan alanları

26-27 Ağustos 2010 tarihlerinde Rize ve çevresinde meydana gelen heyelan ve sel baskınları sonucunda 14 kişi hayatını kaybetmiştir. Gündoğdu Beldesi, can ve mal kaybının yaşandığı en yoğun bölgedir. 12 kişi hayatını kaybetmiş ve heyelanların meydana geldiği bölgelerde tarım alanları ve yerleşim büyük zarara uğramıştır.

Bölgede tarımsal faaliyet olarak daha çok çay tarımının yapılması ve çayın sık dokusundan dolayı yağış sularının yüzeysel akışını engelleyerek suyun zemine girişini artırmaktadır. Ayrıca eğimli yamaçlar boyunca yapıların gelişigüzel yapılması da yamaç stabilitesiyle ilgili olumsuzlukları daha da artırmaktadır. Sonuç olarak, iklim özellikleri itibariyle zaten heyelanların oluşumuna yatkın olan bölgede bu olumsuz etkiler de heyelanların oluşumuna katkı sağlamaktadır.

Topoğrafik olarak eğimin yüksek olduğu yamaçlar ile vadi kenarlarında yer alan yerleşmelerin heyelandan daha fazla etkilendikleri tespit edilmiştir. Ayrıca, deniz kıyısı boyunca inşa edilen Karadeniz otoyolunun doğal drenaj hatlarını daraltmasına ve taşkın suyunun drenajının sağlanamaması ile belde ortasından geçen caddenin altında kalan bölümlerin ve dere yataklarına yapılan konutların taşkınlara bağlı olarak meydana gelen heyelanlardan daha fazla etkilendiği görülmüştür.

Bölgede görülen litolojik birimler atmosferik koşulların etkisiyle ayrışarak toprak zemin kadar kolay bir ayrışma profili sergilemektedir. Aşırı yağışların etkisiyle suya doygun hale gelmiş, üst kısımdaki ayrışmış birim ile alt kısımdaki daha az ayrışmış birim arasındaki geçirimlilik farklılığına bağlı olarak kayma yüzeyleri oluşmuş ve topoğrafik eğimin dik veya fazla olduğu bölgelerde ayrışmış zemin kendi ağırlığı altında akarak heyelanlara neden olmuştur.

2.3. Laboratuvar Çalışmaları

Heyelan sahasındaki jeolojik malzemenin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesine yönelik bir dizi çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda zeminlerin tane boyu dağılımlarını, kıvam limitlerini, özgül ağırlığını, birim hacim ağırlıklarını, porozitesini, doygunluk derecesini, su içeriğini, boşluk oranını belirlemek için araziden örselenmiş ve her bir örnekten 3'er adet örselenmemiş numuneler alınarak ortalama değerleri verilmiştir. Örnek alınan malzeme genelde iri taneli kum veya çakıldır. Malzemenin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi stabilite analizleri için en önemli verilerdir. Bu verilerin elde edilmesi için örselenmemiş örnekler üzerinde makaslama kutusu deneyi (CD deneyi)yapılarak malzemelerin efektif kohezyon (c) ve efektif içsel sürtünme açısı (ϕ) bulunmuştur (Çizelge 1-2).

Çizelge 1. Heyelan alanlarından alınan örneklerin laboratuvar deney sonuçları

Örnek No	1	2	3	4	5
w (%)	38.85	38.57	65.53	40.12	59.02
γ_k (gr/cm^3)	1.16	1.12	0.77	1.21	0.97
γ_n (gr/cm^3)	1.58	1.62	1.36	1.57	1.53
n (%)	49.43	57.72	67.60	50.31	54.47
e (%)	97.74	136.53	208.61	101.28	119.64
γ' (gr/cm^3)	0.65	0.69	0.44	0.71	0.51
γ_d (gr/cm^3)	1.65	1.69	1.44	1.71	1.51
Sr (%)	91.43	74.87	74.46	96.66	105.55
c′ (kg/cm^2)	0.09	0.11	0.12	0.39	0.14
ϕ' (^{o})	17.91	24.91	29.36	16.16	24.49
LL (%)	53	51	60	48	60
PL (%)	41.98	39.64	47.96	38.11	47.05

Çizelge 2.Elek analizi deney sonuçları

Elek No	Elek Açıklığı (mm)	TOPLAM GEÇEN MALZEME YÜZDESİ (%P)				
		1	2	3	4	5
4	4.76	94.17	87.62	88.24	77.76	84.73
10	2	87.76	81.07	76.71	63.24	82.02
20	0.84	74.85	69.85	59.81	47.83	74.98
40	0.42	58.02	53.85	39.87	31.52	61.69
60	0.25	40.22	35.90	20.13	13.80	42.15
100	0.15	9.38	6.19	4.08	1.50	8.88
200	0.074	0.13	0.08	0.07	0.02	0.16

2.4. Stabilite Analizleri

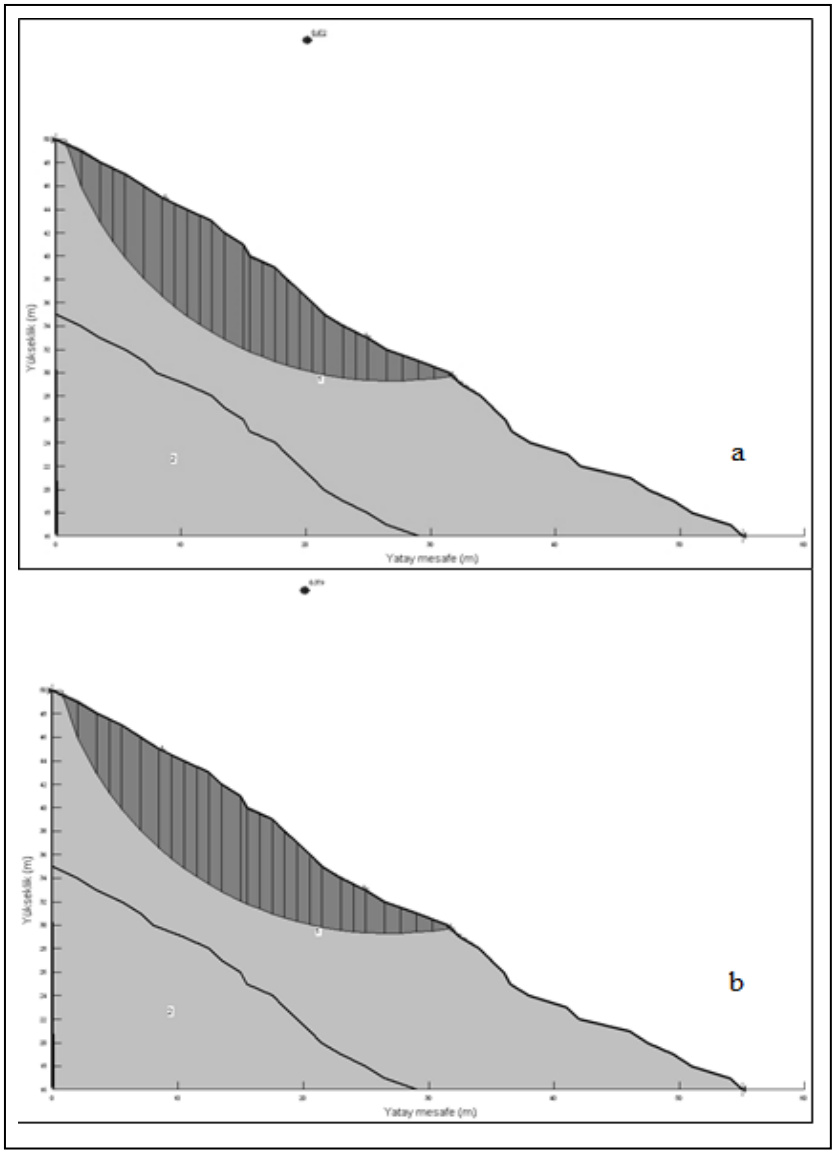
Stabilite analizi için 4 farklı limit denge analiz yöntemi kullanılmıştır. Limit denge yöntemleri, kayma olasılığı olan bir yüzey varsaymak ve bu yüzey boyunca kaymaya yol açacak güvenlik katsayılarını bulmaya dayanmaktadır.

Stabilite analizleri; İsveç dilim yöntemi, basitleştirilmiş Bishop yöntemi, sadeleştirilmiş Janbu ve Morgenstern-Price yöntemlerine (Bishop, 1955,Chowdhury, 1978, Fredlundve Krahn, 1977, Morgenstern ve Price, 1965)göre yapılmıştır. İsveç dilim yönteminde güvenlik katsayısı en düşük çıkmakta ve bundan dolayı bu değer bize güvenirlik açısından daha sağlam bilgi vermektedir. Hesaplamalar, yamaç kesiti boyunca kayma dairesinin başlangıç ve bitiş bölgeleri belirlenerek üretilen 125 kayma dairesinde gerçekleştirilmiştir. 5 farklı heyelan bölgesi için kesitler alınmış, bu kesitlere jeolojik birimler işlenmiş ve stabilite analizi yapılacak 1/500 ölçekli yamaç kesitleri hazırlanmıştır.

Her bir hesaplama yönteminin doygun birim hacim ağırlık ve kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre güvenlik katsayıları bulunmuştur. Buradaki amaç malzemenin suya doygun ve kuru olduğu durumlarda hareketini incelemek ve karşılaştırmaktır. Bu şekilde en zayıf kayma yüzeyleri belirlenmiştir.Topoğrafyası ve jeolojik özellikleri tanımlanan yamaçlar GEO-SLOPE (SLOPE/W, 2007) stabilite programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Yapılan hesaplamalardan sadece 1 nolu yamaca ait farklı iki hesap yönteminin çıktıları Şekil 8'de verilmiştir. Çizelge 3'te ise 1 nolu heyelan bölgesine ait 4 farklı yöntemle bulunmuş güvenlik katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3. Heyelan 1 için kayma yüzeylerine göre hesaplanan minimum güvenlik sayıları

Yöntem	Kuru birim hacim ağırlığına göre	Doygun birim hacim ağırlığına göre
Fellenius	1.075	0.379
Bishop	1.137	0.435
Janbu	1.060	0.412
Morgenster-Price	1.133	0.484



Şekil 7. nolu heyelan bölgesinde (a) Bishop ve (b) Fellenius(İsveç) yöntemleri kullanılarak stabilitesi incelenen kesit ve en kritik kayma yüzeyi

Hareketin oluştuğu alanda iri taneli kum ve çakıllardan oluşan jeolojik birimler bulunmaktadır. Heyelanın oluştuğu alandan akan dere ve tam yamaç bitimine yapılan evlerden dolayı topukta meydana gelen kazılar yamacın stabilitesini bozmuş ve heyelan meydana gelmiştir. 1 nolu heyelan bölgesi için alınan kesitler yardımıyla muhtemel kayma yüzeylerinin başlangıç ve bitiş noktaları belirlenmiş ve farklı limit denge yöntemleriyle stabilite hesabı yapılmıştır. Bunun sonucunda 4 yöntem için güvenlik kat sayıları Çizelge 3'te karşılaştırılmıştır. Bu değerler bize yamacın duraylı olmadığını gösterir. Yani yağışlarla malzemenin doygunluğunun sağlanması, kohezyon ve içsel sürtünme değerlerinin düşmesi yamacın kaymasına sebep olacaktır. Güvenlik kat sayıları 1 ve 1'e cok yakın olması şu anda yamacın kayması gerektiğini gösteriyor. Fakat örnek alınan bölge devamlı yağışa maruz kaldığı için alınan örnekler doygun örneklerdir ve kuru ve doygun birim hacim ağırlığının hesaplanması bu sebeptendir. Bu yamaç için öncelikle drenaj koşullarının sağlanması çok çok önemli bir konudur. Çünkü zeminin doygunluğunun artması yamaçta hareketi kaçınılmaz kılacaktır.

Rize'ye, 24-25 Ağustos günleri m^2 ye 24 saatte 218 kg yağış düşmüştür. Felaketin meydana geldiği gün suya doymuş olan zemin, 26 Ağustos Perşembe günü kısa bir süredeki aşırı yağışlarla birlikte doygunluğu daha da artmış, zemin mukavemetini kaybetmiş ve bunun sonucunda da heyelanlar

meydana gelmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek kayma tehlikesi olan bölgeler tespit edilmiştir. Bölgenin en büyük geçim kaynağı çay bitkisidir. Orman alanlarının tahrip edilip yerine çay bitkisinin ekilmesi yine heyelanı etkileyen sebeplerdendir. Çay ekilen alanların hemen yanına konut yapılması heyelanların binalara ve insanlara zarar vermesine sebep olmaktadır. Önlemler alınmadığı sürece heyelan bölgesi olan Doğu Karadeniz Bölgesi'nde can ve mal kayıpları devam edecektir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Rize ili Gündoğdu Beldesinde 2010 yılında meydana gelen ve 12 kişinin ölümüne, 3 bina çökmesine, 50 evin boşaltılmasına, 400' e yakın aracın sel suları altında kalmasına yol açan heyelanlarla ilgili jeolojik – jeoteknik araştırma yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda, 1 nolu heyelan bölgesinde ortalama güvenlik katsayısı 0.62; 2 nolu heyelan bölgesinde ortalama 1.18; 3 nolu heyelan bölgesinde ortalama 1.17; 4 nolu heyelan bölgesinde ortalama 0.77; 5 nolu heyelan bölgesinde ortalama 1.12 bulunmuştur. Bu hesaplamalarda 5 farklı heyelan bölgesi için riskli durum söz konusudur.

Sonuç olarak bakıldığında stabilitesi hesaplanan yamaçlar ya güvenli değil ya da sınır değere yakın katsayı değerleri vermiştir. Dolayısıyla bu yamaçlarda her an heyelanların oluşması muhtemeldir. Heyelanların zararlarının en aza indirilmesi için başta drenaj koşullarının çok iyi sağlanması gerekir. Heyelan tehlikesi olan bölgelerde yamaç eteklerine konut yapılmamalıdır. Bilinçsiz yapılan kazı ve yapılar tehlikenin boyutunu artıracaktır. Bölgenin geçim kaynağı olan çay bitkisinin gelişigüzel ekilmesi, ormanlık alanların tahrip edilmesi ve bilinçsizce yapılan kazılar bu bölgenin kaderi haline gelmiş heyelanların sebep olduğu can ve mal kayıplarını artıracaktır.

4. KAYNAKLAR

Bishop, A.W., 1955.Theuse of the slip circlein the stability analysis of the slopes.Geotechnique,5(1), 7-17.

Chowdhury, R.N., 1978.Slope Analysis,Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, New York.

Demirel, G., Gürkan, H., Alan, H., Özcan, Ü., Erkan, H., 2010. 26 Ağustos 2010 tarihinde Rize İli Gündoğdu Beldesinde meydana gelen afet olayıyla ilgili TMMOB raporu. TMMOB.

Ergünay, O., 2008. Gazi Üniversitesi deprem araştırma ve uygulama merkezi.

Fredlund, D.G. Krahn, J., 1977. Comparison of slope stability methods of analysis.Canadian Geotechical Journal, 14(3), 429–439.

Gedik, A., Ercan, T., Korkmaz, S., Karataş, S., 1992. Rize-Fındıklı-Çamlıhemşin arasında (Doğu Karadeniz) yer alan mağmatik kayaçların petrolojisi ve doğu pontidlerdeki bölgesel dağılımları, Türkiye Jeoloji Bülteni, 35, 15-38.

Gökçeoğlu, C., Aksoy, H., 1996. Land slide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and ımage processing techniques.Engineering Geology, 44, 147-161.

Korkmaz, S.,Gedik, A. 1988. Rize-Fındıklı-Çamlıhemşin arasında kalan bölgenin jeolojisi ve petrol oluşumları. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, 32(33), 5-15.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2010. 1970-2010 yağış verileri, Ankara.

Morgenstern, N.R.,Price, V.E., 1965.The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15, 70-93.

SLOPE/W.,2007. An engineering methodology, Geo-Slope International, Calgary, Canada.

Yalçın, A., 2000. Kanlıca (Giresun-Yağlıdere) heyelanı ve çevresindeki yamaçların mühendislik jeolojisi acısından incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yılmaz, S., 2011. Doğu Karadeniz Bölgesi Taşkınları ve Heyelan Sempozyumu, Trabzon.

İstanbul Heyelanlarından Seçilmiş Örnekler

Selected Examples from Landslides in Istanbul

E.Yüzer[1,*], S.Aydoğan[2]

[1] *İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü*
[2] *EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş.*
*(*erdoganyuzer@gmail.com)*

ÖZ: Bu makalede, İstanbul dolayında gelişen mühendislik girişimlerinin tetiklediği heyelanların yanı sıra çeşitli kütle hareketlerinin etkili olduğu mühendislik uygulamalarından örnekler verilmiştir. İstanbul'un Avrupa yakasında, Göller arasında Bakırköy, Avcılar, Ambarlı, Gürpınar, Kıraç, Çantaköy, Değirmenköy, Silivri ve Odayeri dolaylarında, denetimsiz yerleşmelerin ve seçilen zorunlu karayolu güzergahının tetiklediği bazı kütle hareketleri gelişmiştir. 1964-2015 yılları arasında yapılan çeşitli gözlem ve ölçümlerle bu hareketlerin oluşum mekanizmalarının belirlenmesine çalışılmıştır. İstanbul batısındaki ilk gözlemlerimiz Avrupa yakasında Bakırköy-Florya tren yolu güzergahındaki (1964) heyelanlar ile başlamış, daha sonra Silivri-Çantaköy (1995), Avcılar (2005), Ambarlı ve Kuzey Marmara Otoyolu-Odayeri-Ağaçlı bölgelerinde (2013-) sürdürülmüştür. İlk yıllardaki çalışmalarda sadece ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritaları ve karotlu sondaj sonuçlarının değerlendirilmesi ile yetinilirken, daha sonraki çalışmalarda hareket mekanizmalarının belirlenmesi için bunlara jeofizik ve diğer aletsel (inklinometre ve piyezometre) ölçümler de eklenmiştir. Yapılan bu çalışmalarla, heyelanların geometrisi ve kinematiğinin aydınlatılması amaçlanmıştır. Bu çoklu incelemeler sonucunda örneğin, Avcılar bölgesindeki heyelanın yarı spiral kesitli bir kayma yüzeyine sahip olduğu; kayma yüzeyinin 40 m kadar derinden geçtiği; heyelanın deniz tabanında da sürecek şekilde geliştiği; taç çizgisi gerisinde Gürpınar killeri içerisinde yeni bir kayma kamasının oluşmaya başladığı belirlenmiştir. Odayeri-Ağaçlı dolayındaki kütle hareketlerinin ise, eski maden ocağı pasa yığınları ile kil-kum'dan oluşan taban birimleri sınırlarında gelişen, 30 metre derinlikte düzlemsele yakın yarı spiral bir kayma yüzeyine sahip olduğu gözlemlenmiş ve ölçülmüştür. Bu bilgilenmeler sonucunda, Avcılar dolayında çalışılan heyelan alanı Bakanlar Kurulu kararı ile afet bölgesi ilan edilmiş, var olan konutların bazılarının yıkımına karar verilmiş, Odayeri-Ağaçlı bölgesinde ise yol güzergahının önemli ölçüde değiştirilmesi gerekmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul Avrupa Yakası Kütle Hareketleri, Avcılar-Balaban, Odayeri-Ağaçlı

ABSTRACT: *In this paper examples are presented from landslides caused by engineering activities around Istanbul and landslides that affected such engineering works. On the European side of Istanbul, near Bakırköy, Avcılar, Ambarlı, Gürpınar, Kıraç, Çantaköy, Değirmenköy, Silivri and Odayeri unchecked settlement activity and the selected itineraries of compulsory road construction have led to some mass movements. We have tried to discover the mechanisms of such movements on the basis of the various observations and measurements undertaken in the interval 1964-2015. Our initial observations were those made on the landslides along the course of the Bakırköy-Florya railroad in 1964 and continued through those in regions of Silivri-Çantaköy (1995), Avcılar (2005), Ambarlı and along the course of the northern Marmara motorway and the Odayeri-Ağaçlı regions (2013-). During the early studies detailed engineering geological maps and the analysis of drill cores obtained from borings were considered sufficient bases of hazard evaluation, whereas in the later studies these were supported by geophysical observations and inclinometer and piezometer measurements with a view to establishing the mechanisms of movement. These studies aimed at establishing the geometry and the kinematics of the landslides. As a result of these multifarious studies it was seen, for example, that the landslide in Avcılar had a half-spiral-shaped slip surface, that this surface has a depth of 30 metres, that the landslide developed in such a manner as to continue under the sea and behind the breakaway line a new sliding wedge had begun forming within the Gürpınar clay. The mass movements around Odayeri-Ağaçlı were seen, on the basis of observations and measuremens, to have developed on an almost flat semi spiral-shaped slip surface at the boundary between the tailings of the mines and the basal units formed from clay and sands. As a consequence of these results the study area around Avcılar was declared an area of high hazard, it was decided to*

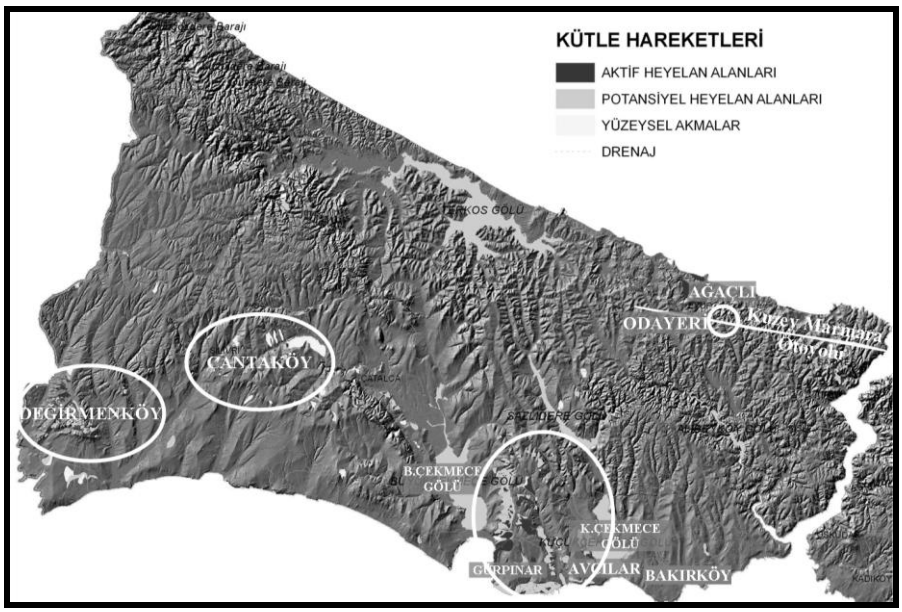
pull down some of the existing landslide region and the course of the motorway in the Odayeri-Ağaçlı region was moved to a safer area.

Keywords: *Mass Movements of Europen Side of İstanbul, Avcılar-Balaban, Odayeri-Ağaçlı*

1. GİRİŞ

Bu makaledeki ilk örnek, İstanbul İli, Avcılar İlçesi, Ambarlı Mahallesi Güneyinde oluşan zemin hareketlerinin niteliğini jeolojik, jeofizik, jeomekanik açıdan inceleyerek ortaya çıkarmak ve jeomekanik irdelemelerle çözüm önerileri üretmeye yönelik olarak hazırlanmıştır.

İstanbul ilindeki kütle hareketleri ile Avrupa yakasında ve özellikle Marmara Denizi kıyı kuşağında, Anadolu Yakasına göre daha sık karşılaşılır (Şekil 1). Bu kuşakta yaygın olarak krip türü yamaç hareketleri ve dönel kayma türü heyelanlar oluşmuştur. Bunların bazılarının geçmişte oluştuğu ve daha sonra dengeye kavuştuğu (pasif), bazılarının ise halen etkinliğini sürdürdüğü ve yayılmakta olduğu (aktif) gözlemlenmektedir. Avrupa yakasının hemen bütünü yakın zamanda başka yerbilim konularının yanında heyelan ve öteki kütle hareketleri açısından da Duman vd., (2004) tarafından incelenmiştir. Bu tarihten önce, özellikle yerleşime yeni açılan iki göl arasında karşılaşılan heyelanlı bölgelerde yerel yönetimler, üniversiteler ve özel mühendislik büroları tarafından çok sayıda inceleme çalışması yapılmıştır (Sayar, 1977, Yüzer, Öztaş, Vardar, Eyidoğan, Eyüboğlu, Eriş, Yalçın, vd, 1997, Yüzer, 2007, İÜ, MTA, GEOSAN, ELC, Dalgıç, 2003, , Gözübol, 1994). Bu arada 2005–2008 yılları arasında IMP (İstanbul Metropoliten Planlama ve Kentsel Tasarım Merkezi) bünyesinde içinde bulunduğumuz yerbilimleri çalışma grubu tarafından da bu paralelde çalışmalar sürdürülmüştür. İkinci örnek de ise, Kuzey Marmara Otoyolu güzergâhının Odayeri-Çiftalan köyleri arasında yer alan (Km 66+500-Km 67+680) kesimindeki kütle hareketleri açıklanmaktadır.



Şekil 1. İstanbul Avrupa yakasındaki başlıca heyelan bölgeleri (Duman vd., 2004; IMP–2006)

2.İSTANBUL AVRUPA YAKASI KÜTLE HAREKETLERİNİN GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ

İstanbul'un bu güneybatı kıyı kuşağında, Marmara Denizi'ne boşalan büyük vadilerin yamaçları ile Büyükçekmece ve Küçükçekmece göllerine bakan yamaçlarında, zemin ya da zemin benzeri olarak adlandırılabilecek birimler yüzeylemektedir ve yamaç duraysızlaşmaları buralardan gelişmiş ve gelişmektedir (Arpat, 1999).

Son yıllardaki yoğun karayolu gibi mühendislik uygulamaları sırasında düzenlenerek geçilen yapay dolgu malzemesi içindeki güncel kütle hareketleri ile ilgilidir (Şekil 1). İstanbul Avrupa yakasındaki yamaç duraysızlaşmaları yalnızca heyelanlarla sınırlı değildir. Bunların dışında şişme-büzülme süreçleri, krip türü yamaç hareketleri, ender olarak kaya düşmesi türü duraysızlaşmalarla da karşılaşılmaktadır.

Bölgede karşılaşılan heyelan türündeki kütle hareketleri iki grup altında toplanabilir. Şekil 2'de bu hareketlerin görüldüğü jeolojik birimlerin yayılımları ve jeolojik istifi görülmektedir. Bunların bir bölümü yaygın olarak Büyükçekmece Gölü'nün doğusundaki Gürpınar killerindeki yamaçlarda yer almaktadır. Bu heyelanların buradaki yamaçların üst yarısında yaygınlaşması dikkati çekmektedir. Yamacın en üst düzeylerindeki Kıraç ve Bakırköy kireçtaşı birimleri, aşınmaya daha dirençli oluşları nedeni ile yamaç eğiminin daha yüksek olmasını sağlamakta; bir yandan da, hidrolik geçirimlilikleri sayesinde içlerine yerleşmiş asılı yeraltısuyu akiferinden sızan sularla yamacın üst kesiminin kayma dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Diğer yandan son buzul döneminde bugünküne oranla 100m kadar alçalan deniz düzeyinin etkisi ile bugünkü Büyükçekmece Gölü ve çevresindeki vadilerin derince oyulması sonucunda yamaçların duraylılığı korunamayarak dikleşmeler oluşmuştur. Bu nedenlerle, anılan yamaçlarda son birkaç bin yıldır süregelen heyelanlar etkili olmuştur. Bu heyelanlar, koşullar değişse de, bugün de etkinliğini sürdürmektedir (Geosan, 1993). Aynı birimde karşılaşılan ikinci grup hareketler ise bölgenin KD, KB ve B'sındaki Gürpınar Kili içerisinde gelişmektedir. Buralarda, kilin şişme yüzdesinin yüksekliği ve şişme-büzülme eğiliminin yüksekliği nedeni ile yüksek eğimli yamaçlarda önce krip hareketleri, daha sonra kabarma sırtları gelişmekte, daha sonra da sığ yüzeyler boyunca gelişen dilim kaymaları ve toprak akmaları oluşmaktadır. Bunların pasif örnekleri olduğu gibi güncel ve aktif örnekleri de bulunmaktadır. Bölgedeki jeolojik birimler heyelandan etkilenmeyen kesimlerde yataya yakın tabakalanmalı, hareket geçirmiş kesimlerde ise kıvrımlı, kırıklı, genellikle kuzeye eğimlidir. Bu durum, eski heyelan alanlarının dolaylı belirtecidir (ELC, 2005).

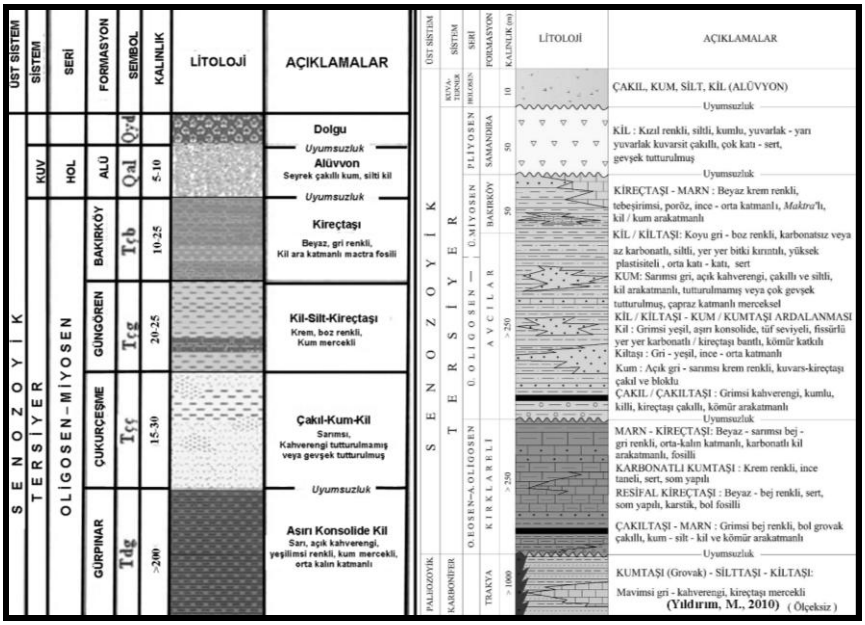
Gürpınar Killeri'nin kendine özgü jeoteknik özellikleri bu heyelanların yeniden duraysızlaşmasına neden olmaktadır. Bu malzeme, aşırı konsolide, fisürlü, sert ve çok plastiktir. Kayma dayanımı ilksel olarak çok yüksektir. Ancak, uzun süre makaslama gerilmeleri altında kalması durumunda fisürlerin birleşmesi, daha önceki yenilme yüzeyleri boyunca sadece kalık (residual) dayanımla direnebilmelerini sonuçlamaktadır. Önceleri bu şekilde makaslanma geçiren yerlerde içlerindeki kil katmanlarının etkisi, gözenek suyu basıncının artması ile drenaj koşullarının bozulması ile yamaç aşağısına kaymalar başlamaktadır. Bu durum yamaç yukarısında denetimsiz yerleşme, dolgu gibi yük dağılımını bozan girişimlerle daha sık görülmektedir. İstanbul'un Avrupa yakasının doğu kesiminde bu tür eski heyelanlı alanlar yoğunlaşmıştır. Yamaç yukarısındaki denetimsiz biçimde yapılanma nedeni ile yük dağılımının ve drenaj koşullarının kötülemesi, artan dinamik yükler, v.b olumsuz etkiler kaymaların başlıca nedenleridir. Avcılar-Balaban heyelanı bu tür heyelanlara örnek oluşturmaktadır.

2.1 Avcılar-Balaban Heyelanı

Avcılar ilçesinin batısında yer alan eski Balaban Çiftliği olarak bilinen alandaki pasif heyelan bölgesinde 2005 yılı yaz aylarından itibaren yol ve binalardaki deformasyon belirtileri ile bazı hareketler gözlenmiştir (Şekil 3). Bu gelişme üzerine heyelan bölgesinde IBB, İTÜ, BÜ, GEOSAN, ELC, ZEMAR ve BELİRTİ firmalarının elemanları görev alarak, arazide gözlem ve ölçümlerde bulunmuş, sondajların açılmasını, bunların içerisindeki kayıtların alınmasını yönlendirmiş, sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

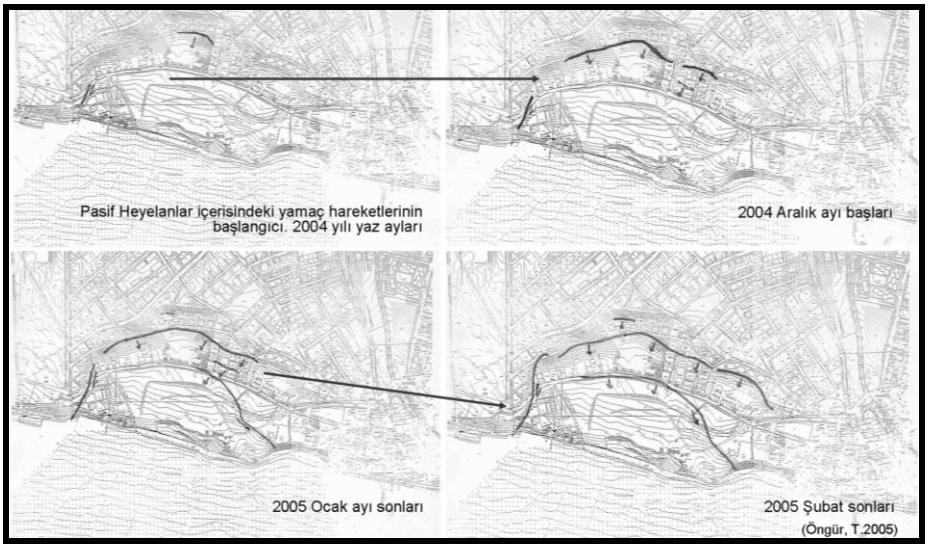
Şekil 4 üzerinde bu hareketlerin zaman içindeki yayılımları görülmektedir. Bu arada bazı binalar, oturulmayacak ölçüde zarar görmüştür (Şekil 3). Çalışmalar süresince 20 adet karotlu sondaj açılmış, bunlardan yararlanarak SPT, yeraltısuyu seviye ölçümleri yapılmış, deformasyonlar kuyu içi inklinometre okumaları ile belirlenmiştir (Şekil 5). Zemin hareketlerinin kinematiğinin ortaya çıkarılmasından en güvenilir veriler inklinometre ölçülerinden elde edilmiştir. Bu ölçümlerde en fazla deformasyon gelişimi inceleme alanının güneybatı ucunda 30 m derinlikte 5mm/gün olarak

saptanmıştır. Diğer ölçümler 2-2,5mm/gün olarak değişmektedir. Sonuç olarak Avcılar-Balaban heyelanındaki hareketlenmenin yarı spiral kesitli bir kayma yüzeyine ulaşan çok sayıda dilimlerden oluştuğu, heyelan tabanının deniz düzeyinin altına inecek derinliklere ulaştığı (40m), taç bölgesinde de yeni kayma kamalarının gelişmekte olduğu belirlenmiştir. Bu bilgilenmelerden hareketle, heyelan alanı Bakanlar Kurulu kararı ile yerleşime kapatılmıştır.

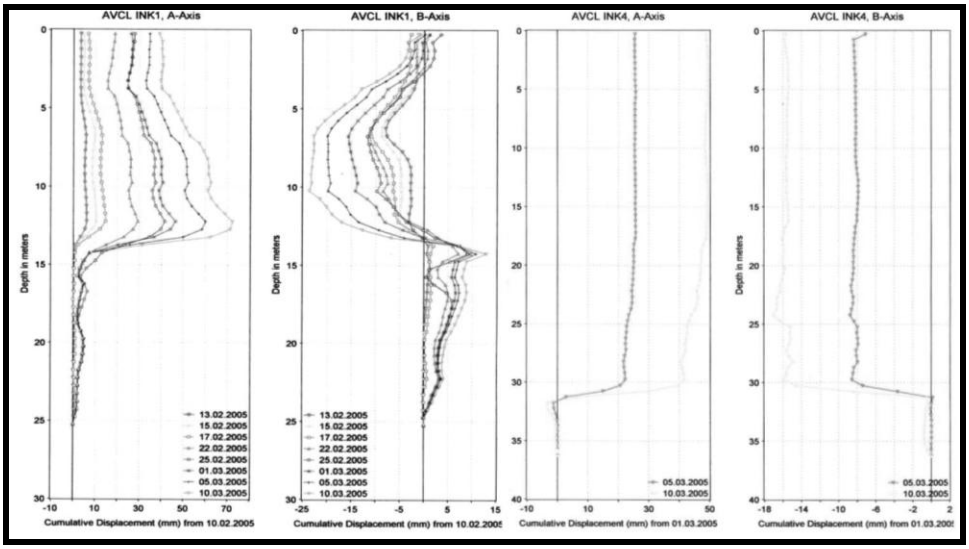


Şekil 2. Avcılar-Balaban ve Odayeri-Ağaçlı heyelan bölgelerinin genelleştirilmiş stratigrafik dikme kesitleri

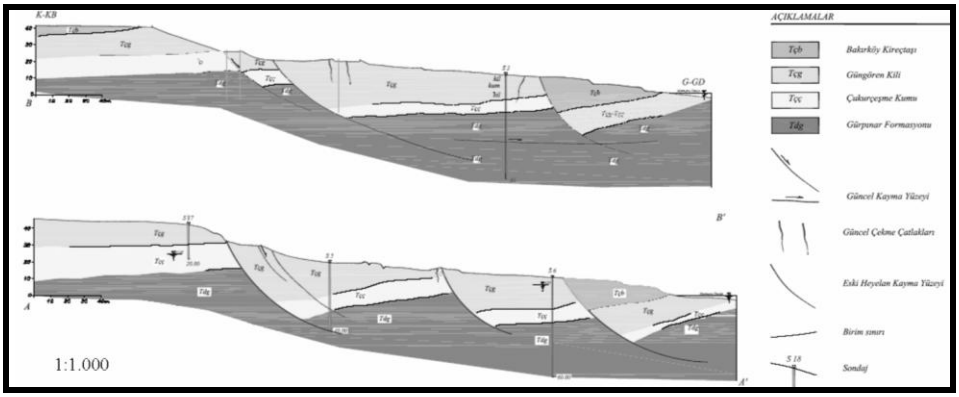
Şekil 3. Avcılar-Balaban bölgesinde 2004 yazı ile 2005 Şubatı arasındaki hareketler bağlı olarak yollarda ve binalarda görülen hasarlar.



Şekil 4. Avcılar-Balaban heyelanının gelişim süreci (2004-2005).



Şekil 5. Avcılar-Balaban heyelanının inklinometre ölçümleri ile kayma yüzeylerinin belirlenmesi.



Şekil 6. Avcılar-Balaban heyelanının kayma yüzeylerinin jeolojik kesitler üzerindeki gösterimi.

2.2. Odayeri-Ağaçlı Heyelanları

Bu örnekteki inceleme alanı, Kuzey Marmara Otoyol Projesi olarak bilinen güzergahda yer almaktadır. Odayeri-Paşaköy otoyol hattı, halen kullanılmakta olan 1. Boğaz Köprüsü ile 2. Boğaz Köprüsü'nün trafik yükünü rahatlatmak ve İstanbul'un ulaşım sorununu giderebilmek için Yap, İşlet, Devret modeli ile yapılmaktadır.

Kuzey Marmara Otoyolu güzergâhının Odayeri-Çiftalan köyleri arasında yer alan (Km 66+500-Km 67+680) kesimindeki kütle hareketlerine odaklanılmıştır. Bölgede yer alan daha önce işletilmiş maden ocakları şevlerinde ve çıkarılan pasalardan oluşan yığınlardaki hareketlerin belirlenmesine ve önleyici yöntemlerin geliştirilmesine çalışılmaktadır. Anılan alan ve dolayının temelini Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu oluşturmaktadır. Trakya Formasyonu üzerinde Orta Oligosen-Alt Miyosen yaşlı Danişment Formasyonunun Ağaçlı Üyesi (Tda) (Özgül, 2012) yer almakta ve bunun üzerinde maden ocaklarının güncel pasalarının birikiminden oluşan yapay dolgu bulunmaktadır (Şekil 2 ve Şekil 7).

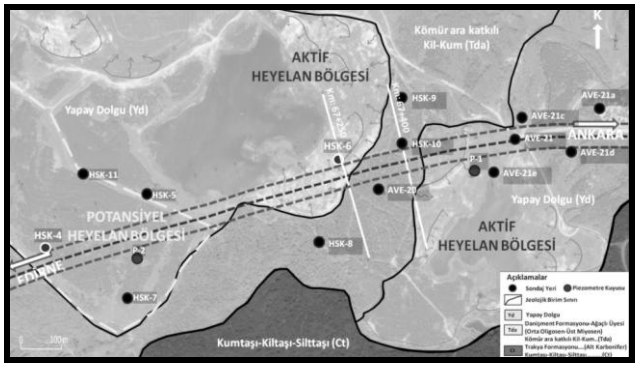
Alt Karbonifer yaşındaki Trakya Formasyonu (Ct) (Akyüz, 2010), kirli sarı, sarımsı gri, gri renkli; silisli şeyl, mikalı kumtaşı ve kireçtaşı mercekli silttaşı-kumtaşından oluşmaktadır. Kiltaşı seviyeleri yer yer tabakalanmaya paralel yapraklanmayla şeyl özelliği gösterir. Orta Oligosen-Alt Miyosen yaşlı Danişment Formasyonunun Ağaçlı Üyesi (Tda) (Özgül, 2012) kil-kum-çakıl karmaşığından oluşur. Killi düzeyler içinde, kalınlığı birkaç mm'den onlarca cm'ye değin değişen "Ağaçlı kömürü" adları ile bilinen kömürlü düzeyleri kapsamasıyla karakteristiktir (Özgül, 2012). Karaburun, Kilyos, Odayeri ve Ağaçlı köyleri arasında kalan kıyı şeridinde yaygın olarak görülmektedir.

Ağaçlı Üyesi, birbirleriyle giriklik gösteren, kömür ara katkılı yeşilimsi-külrengi kil düzeyleri ile sarımsı-boz, kirli beyaz-açık külrengi, orta zayıf boylanmalı, yuvarlanmış-yarı yuvarlanmış kum-çakıl düzeylerini kapsar. Formasyonun inceleme alanındaki kalınlığı 10-40m arasında değişmektedir. Ağaçlı üyesi kil ağırlıklı olup geçirimsiz özelliğe sahip olması nedeni ile yüzey sularının etkisiyle kolayca aşınabilen ve yumuşayabilen karakterdedir. Ağaçlı üyesinde gelişen kütle hareketleri, konsolide olmamış killerin tekrarlayan şişme ve büzülme olayları ile oluşan kuruma çatlakları boyunca, yağış ve yüzey sularının sızması ile zeminin kayma direncinin düşmesi sonucunda oluşmuş olup, akma-kayma türündedir (Şekil 7). Aşağıda bunların geliştiği tipik örnekler yer almaktadır.

Km: 66+500-67+800 arası kütle hareketleri: Yaklaşık kuzeydoğu/batıgüneybatı doğrultuda uzanan yol güzergâhında terk edilmiş maden çukurlarında oluşmuş büyüklükleri farklı iki adet yapay göl bulunmaktadır. Otoyolu güzergahı da yer yer kısmen doldurulan bu dolgu alanlarından geçmektedir. Ocak işletmeleri tarafından çıkarılan gelişigüzel dökülen pasalar ile kontrolsüz dolgulardan tepeler oluşturulmuş ve bu tepelerde zamanla duraylılık sorunları meydana gelmiştir (Şekil 7).

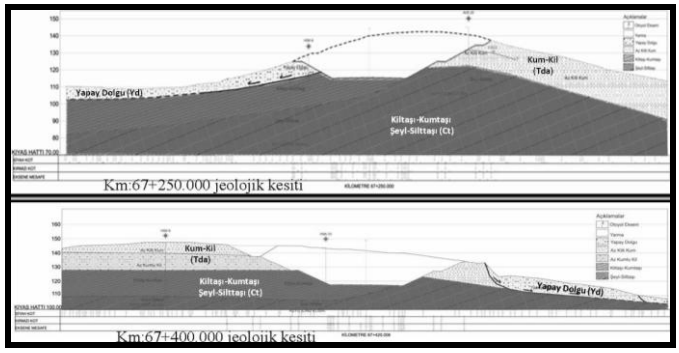
Çiftalan-Odayeri-Ağaçlı köyleri dolayında işletilen ve halen terk edilen çok sayıda ocak bulunmaktadır. Açılmış olan bu kömür ve kum ocaklarında, faaliyetler bittikten sonra büyük boyutlarda çukurlar oluşmuş, bu çukurlar, ocak işletmelerince pasa ve diğer hafriyat malzemeleri ile doldurulmuştur (Şekil 8d). Pasalar ile 20-30 metreye varan dik yarlar oluşturulmuştur. Pasalar içindeki dik yüksek eğimli yamaçlarda kaymaların etkisiyle gelişen tansiyon çatlakları görülmektedir. Dolgu alanlarında eğimin >%10 olduğu bölgelerde ve ocak göletlerinin etrafında bu hareketler belirgindir (Km: 67+150-67+420). Otoyol güzergâhındaki hareketleri belirlemek amacı ile 50-100m aralıklarla 21 adet jeolojik kesit hazırlanmıştır. Bu kesitlerden heyelânlara ait kayma düzlemleri belirlenmiştir. Şekil 7 den alınan 2 jeolojik kesit üzerinde gelişen hareketler açıklanmaktadır. Arazi ve sondaj çalışmalarından kontrolsüz yerleştirilmiş dolgu kalınlığının maksimum 70m'ye kadar ulaştığı, güzergâhdaki (Km: 66+500-67+800) kalınlıklarının ise 20-25m arasında olduğu saptanmıştır.

Km:67+250 de açılan kuyuya yerleştirilen inklinometre ölçümlerinde 30 metre derinlikte ortalama 0,4mm/gün'lük deformasyonlar belirlenmiştir (Şekil 10). Ana kayma düzlemi kontrolsüz yapay dolgu tabanından geçmekte ve heyelân kuzeye göl istikametinde gelişmektedir. Bu hareketlerin önlenmesi için pasa malzemesinin tümü kaldırılarak geri kalan kısmında şev eğimleri yatırılmıştır.

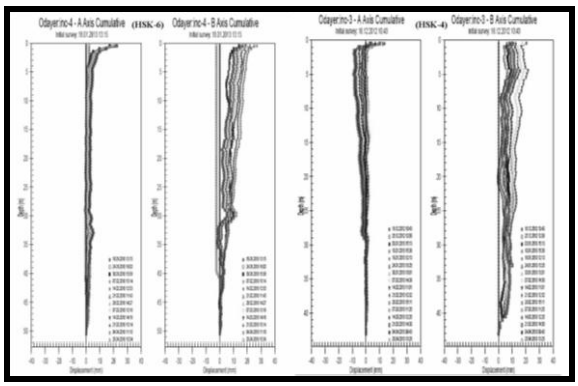


Şekil 7. İnceleme alanının Jeoloji Haritası, Aktif ve hareket beklenen Potansiyel Heyelan bölgeleri

Şekil 8. İnceleme alanındaki akma-kayma türündeki kütle hareketleri (a,b,c) ve ocak göletleri (d)



Şekil 9. Ağaçlı-Odayeri heyelanının kayma yüzeylerinin jeolojik kesitler üzerindeki gösterimi.



Şekil 10. Odayeri-Ağaçlı bölgesinde yapılan kontrolsüz dolgularda meydana gelen heyelanların inklinometre ölçümleri ile kayma yüzeylerinin belirlenmesi (HSK-6, HSK-4)

3. SONUÇLAR

Bu makalede, İstanbul dolayında gelişen denetimsiz yerleşmelerin tetiklediği heyelanların yanı sıra çeşitli kütle hareketlerinin etkili olduğu mühendislik uygulamalarından örnekler verilmiştir. Yapılan incelemelerle, heyelanların geometrisi ve kinematiğinin aydınlatılması amaçlanmıştır. Örneğin, Avcılar bölgesindeki heyelanın yarı spiral kesitli bir kayma yüzeyine sahip olduğu; kayma yüzeyinin 40 m kadar derinden geçtiği; heyelanın deniz tabanında da sürecek şekilde geliştiği; taç çizgisi gerisinde Gürpınar killeri içerisinde yeni bir kayma kamasının oluşmaya başladığı belirlenmiş, Odayeri-Ağaçlı dolayındaki kütle hareketlerinin ise, eski maden ocağı pasa yığınları ile kil-kum'dan oluşan taban birimleri sınırlarında gelişen, 30 metre derinlikte düzlemsele yakın yarı spiral bir kayma yüzeyine sahip olduğu gözlemlenmiş ve ölçülmüştür.

4. KAYNAKLAR

Akyüz, S., 2010. İstanbul ve yakın civarının Paleozoik istifi, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.

Arpat, E., 1999. Büyükçekmece ile Küçükçekmece (İstanbul) heyelanlarının genel özellikleri ve yarattıkları başlıca sorunlar. 52.Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.

Dalgıç, S., 2003. İstanbul ili Kıraç belediyesi imar planını revizyonuna esas jeolojik-jeoteknik araştırma raporu. İÜ, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.

Duman, T.Y., Keçer, M., Ateş, Ş., Emre, Ö., Gedik, İ., Karakaya, F., Durmaz, S., Şahin, H., Gökmenoğlu, O., 2004. İstanbul metropolü batısındaki (Küçükçekmece-Silivri-Çatalca yöresi) kentsel gelişme alanlarının yerbilimi verileri. MTA Özel Yayın Serisi 3, Ankara.

ELC, 2005, Avcılar-Ambarlı mahallesi güneyi duraylılık etüdü. Ortak Rapor, İstanbul.

Gözübol, A.M., Eroskay, O., 1994. İstanbul Beylikdüzü Gürpınar belediyesi toplu konut alanının jeoteknik incelemesi. İÜ, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.

Geosan, 1993. İstanbul-Ambarlı Altaş liman tesis alanı mühendislik jeolojisi. Rapor, Yakuplu Belediyesi, İstanbul.

IMP, Yerbilimleri, 2006. İstanbul İl bütünü çevre düzeni planı raporu. Yönetici Özeti. IMP, İstanbul.

Özgül, N., Özcan, İ., Akmeşe, İ., Üner, K., Akay, E., Akdeniz, N., Bilgin, R., vd., 2012. İstanbul il alanının jeolojisi, İBB Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul.

Öngür, T., 2005, ELC Avcılar-Ambarlı mahallesi güneyi duraylılık etüdü, Ortak Rapor, İstanbul.

Sayar, C., 1977. Haliç ve civarının jeolojisi. haliç sorunları ve çözüm yolları ulusal sempozyumu, BÜ. İstanbul.

Yıldırım, M., Gökaşan, E., 2010, Mühendisler için jeoloji bilgileri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yüzer, E., 2010. İstanbul Heyelanları. İstanbul'un Afetlerden Zarar Görebilirliği Sempozyumu, İÜ, İstanbul.

Yüzer, E., Eriş, İ., Bakır, A., Aydoğan, S., 2007. İstanbul heyelanları. İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu, JMO İstanbul Şubesi, İstanbul.

Yüzer, E., Öztaş, T., Vardar, M., Eyidoğan, H., Eyüboğlu, R., Eriş, İ., Yalçın, T., Bozkurtoğlu, E., Dumlu, O., Yavuz, V., Mahmutoğlu, Y., Koçak, C., Altınışık, F., İnkaya, D., 1997. İstanbul-Avcılar belediyesi yoğun yapılaşma alanının yerleşime uygun amaçlı mühendislik jeolojisi ve jeoteknik araştırma projesi. 3 Cilt İTÜ Vakfı, İstanbul.

Doğu Karadeniz Kıyı Şeridi Potansiyel Heyelan Alanlarının Çağdaş Değerlendirme Yöntemleriyle İncelenmesi

Application of Sophisticated Methods for the Potantial Landslide Areas in the Eastern Black Sea Coast

F. Tarhan[1], F. Bulut[1,*], A. Akgün[1], H. Ersoy[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon*
*(*bulut@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Jeolojik yapısı, morfolojik ve iklimsel özellikleri nedeniyle Doğu Karadeniz Bölümü'nde çok sayıda heyelan meydana gelmektedir. Türkiye'de heyelanlardan etkilenen yerleşim birimlerinin dağılımına bakıldığında, bunların yaklaşık % 35'inin Karadeniz Bölgesi'nde olduğu göze çarpmaktadır. Özellikle, bölge nüfusunun artmasının beraberinde getirdiği çarpık kentleşme ve yer seçiminde heyelan riski taşıyan alanların dikkate alınmaması, can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Planlama aşamasında özellikle yeni seçilecek yerleşim alanlarının, kara ve demiryolu güzergâhlarının ve mühendislik yapılarının inşa edileceği alanların heyelana ne kadar duyarlı olduğuna yönelik değerlendirmelerin yapılması son derece önemlidir. Bu amaçla, bireysel düzeyde üniversitelerimizde ve bazı kamu kurumlarında dikkate değer ve son derece önemli ancak az sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Özellikle il, ilçe gibi yerel düzeye indirgenecek kurum, araştırma enstitüsü vb. gibi yapılanmalarla, daha güncel verilerin daha hızlı biçimde toplanması ve daha etkin biçimde değerlendirilmesi ile bölgede heyelan etkilerinin en aza indirgenmesi mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Doğu Karadeniz, Duyarlılık

ABSTRACT: *Due to the geological, morphological and climatological characteristics, many landslides occur in the Eastern Black Sea region. By considering a close inspecti on to the distribution of the landslide-damaged residential areas in Turkey, 35% of them is in the Black Sea region. Inparticular, unplanned urbanization as a result of population increases in the region, and ignorance of landslide risk prone areas for site selection purposes causes loos of life and property. In the planning stagel and slide susceptibility assessments for area swhere newly selected settlement sites, highway and railway routes, and engineering constructions sites is highly important. For this purpose, although some notable and highly important but a few studies were carried out by the indivudials at the universities and some govermental organizations in ourcountry, their results can not exactly be implemented to the practice. Mitigating adverse effects of landslides in the region will be able to possible by recording more actual data rapidly, and assessing these data effectively particularly by establishment and research institutes etc. at the level of province, district and local goverment.*

Keywords: *Landslide, Eastern Black Sea, Susceptibility*

1. GİRİŞ

Doğu Karadeniz Bölümü kıyı şeridinde; gerek jeomorfolojik özellikler, gerekse de iklim koşulları nedeniyle, uzun yıllardır farklı boyutlarda heyelanlar oluşmakta ve yerleşim alanları olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu doğal morfolojik süreç, insan ile etkileşimin başladığı noktada ise afet boyutuna erişmektedir. Bir doğal afet olarak heyelanlar günümüzde çağdaş teknolojik olanaklar yardımıyla önceden tahmin edilebilir ve önlenebilir. Bu noktada, doğal afet yönetim bilincinin yerleşmesi ve uygulamaya koyulması ise etkin bir afet yönetim sisteminin en önemli kısmını oluşturmaktadır. Buradan itibaren, uygun afet yönetim biçiminin seçilmesi, gerekli ve güncel veri ve bilgilerin toplanması, toplanan veri ve bilgilerin uygun analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi, analiz sonuçlarından elde edilen ürünlerin ise karar vericiler tarafından kullanıma sunulması etkin bir afet yönetim biçiminin olmazsa olmaz adımlarını oluşturmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, son yıllarda ülkemiz genelinde ve Doğu Karadeniz Bölümü'nde meydana gelen heyelanların söz edildiği biçimde

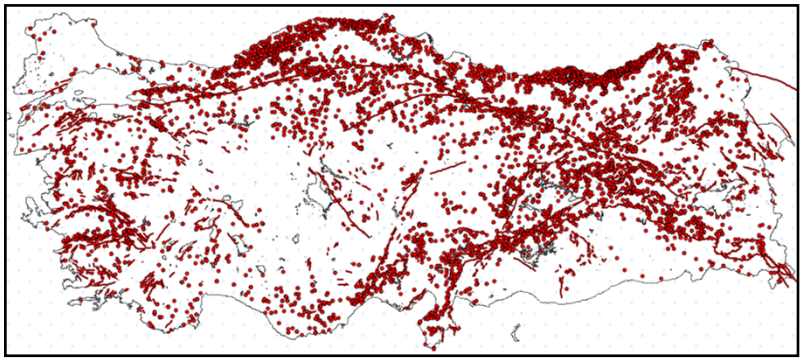
değerlendirilmesi noktasında da dikkate değer bir çaba ve gelişim göze çarpmaktadır. Bununla birlikte, bu çaba ve gelişimlerin ne kadar etkin olduğunu ve nasıl daha iyi olabileceği üzerine yapılan değerlendirmelerin de yeninden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bölge için çok önemli olan heyelan sorunu 1950'li yılardan itibaren çok sayıda araştırmacı (Beret, 1955; Erguvanlı ve Tarhan, 1982; Önalp vd., 1987; Önalp, 1991; Tarhan, 1991; Bulut vd., 1999; Duman vd., 2007; Yalçın ve Bulut, 2007; Akgün ve Bulut, 2007; Akgün vd.,2008; Nefeslioğlu ve Gökçeoğlu, 2011; Dağ ve Bulut, 2012) tarafından araştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Ordu ilinden Artvin'in Hopa ilçesine kadar uzanan Doğu Karadeniz Bölümü kıyı şeridinde meydana gelen heyelanların nedenleri araştırılmış ve heyelan yoğunluğu fazla olan alanlar çağdaş değerlendirme yöntemleri ile incelenmiştir.

2. DOĞU KARADENİZ BÖLÜMÜ KIYI ŞERİDİ HEYELANLARI

2.1. Kütle Hareketlerinin Dağılımı

Doğal afetler nedeniyle uğranılan can kaybı ve yapısal hasar istatistikleri, en büyük payın depremlere ait olduğunu göstermektedir. Bu pay ülkemiz için tüm afetler nedeniyle uğranılan kaybın 2/3'ü civarındadır. Bu nedenle de ülkemizde afet ile deprem eş anlam taşımaktadır.Bununla birlikte, başta Karadeniz Bölgesi olmak üzere, Akdeniz ve Marmara bölgelerinde yoğun bir şekilde heyelan, taşkın, moloz-çamur akması, kaya düşmelerigibi doğal afetler oluşmaktatır (Şekil 1).



Şekil 1. 1950-2010 yılları arasında Türkiye'de kayıt altına alınmış kütle hareketlerinin lokasyonları(AFAD, 2010).

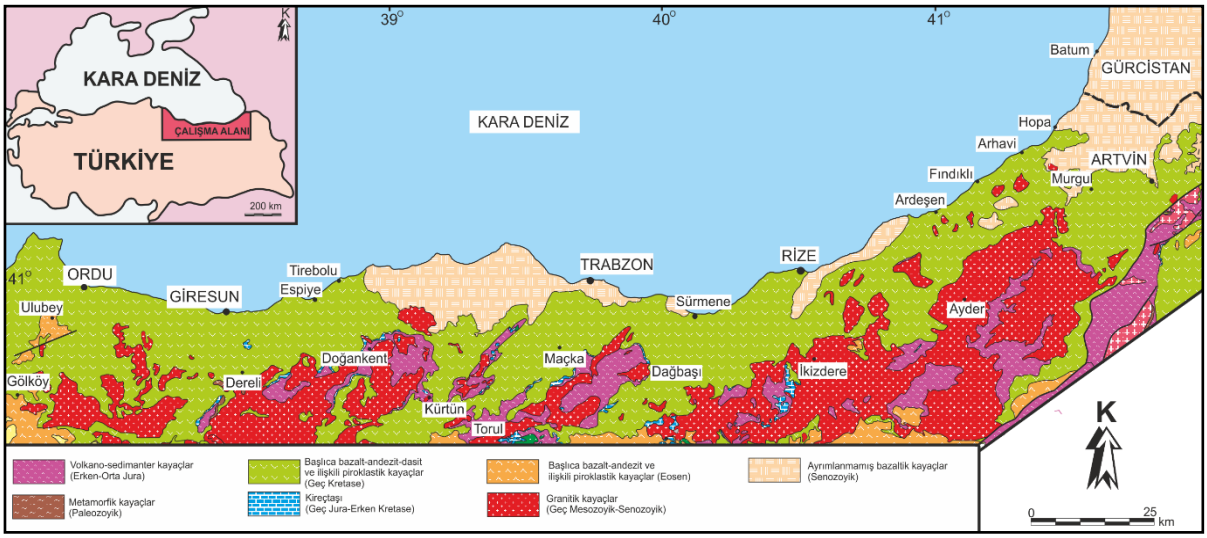
Ülkemizde heyelan ve taşkınların en fazla görüldüğü bölge Karadeniz Bölgesi'dir. Trabzon ili ise son 50 yıl içerisinde, olmuş veya olması muhtemel heyelanlar sebebiyle nakline karar verilen konut sayısının en fazla olduğu ildir (Akgün ve Bulut, 2007; Ersoy ve Bulut, 2008; Dağ ve Bulut, 2012). İlde heyelan olaylarının sık bir şekilde yaşanmasında bölgenin sahip olduğu toprak yapısı, bitki örtüsü, jeolojik ve jeomorfolojik özellikler önemli rol oynamaktadır (Ersoy ve Bulut 2008). İlde heyelan olaylarının ilkbahar sonları ve yaz başları ile sonbahar dönemlerinde meydana gelmesi, bu olaylar üzerinde iklimin de çok önemli etkileri olduğunu göstermektedir (Kadıoğlu 2006, Önsoy vd., 2008). Meydana gelen heyelanların genel dağılımına bakıldığında; kontrolsüz kazıların yapıldığı ve yol yapımları sırasında mühendislik prensiplerine uygun olmayan tekniklerin uygulandığı alanlarda heyelan sayısının arttığı dikkat çekmektedir (Yalçın, 2011).

2.2. Jeoloji

Çalışma alanı olarak belirlenen Doğu Karadeniz kıyı şeridi, Doğu Pontid Orojenik Kuşağının Kuzey Zonu'nda, Ordu Melet ırmağı ile Gürcistan sınırı arasında yer alır (Şekil 2). Bu zonda, Paleozoyik yaşlı taban kayasını düşük dereceli metamorfik kayaçlar ile bunları kesen metamorfize olmamış granitik kütleler oluşturur (Eyüboğlu vd., 2014). Bölgenin tabanını oluşturan bu birimler, Erken-Orta

Jura yaşlı, baskın olarak volkanik ve daha az oranlarda da sedimanter kayaçlardan oluşan Hamurkesen Formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür. Bu volkana-sedimanter karakterli istif tüm Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yaygın bir yüzeyleme alanına sahip olan Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga Kireçtaşı tarafından uyumlu olarak örtülür. Ancak, Kuzey Zon'da bazı alanlarda Berdiga Kireçtaşları, sürekli bir seri halinde olmayıp, Geç Kretase istifi içerisinde yoğun volkanik aktivite ve/veya granit,gabro ve diyorit intrüzyonlarının yerleşimine bağlı olarak parçalanmış olan bloklar halinde bulunur (Eyüboğlu vd., 2014).

İnceleme alanında Geç Kretase dönemi, iki farklı periyodda gelişen yoğun magmatik aktivite ile temsil edilir. Birinci periyod (Turoniyen-Santoniyen?) bazaltik-andezitik volkanik ve ilişkili piroklastik aktivite ile başlamış (Çatak Formasyonu) ve dasit, hematitik dasit, riyodasit ve ilişkili piroklastikleri oluşturan felsik aktivite (Kızılkaya Formasyonu) ile devam etmiştir (Eyüboğlu vd., 2014). İkinci periyod ise (Santoniyen-Mestriştiyen) bazaltik-andezitik karakterli volkanizma ve ilişkili piroklastik aktivite ile başlamış ve biyotitli dasit, riyodasit, riyolit ve piroklastiklerini oluşturan felsik aktivite (Çayırbağ Formasyonu) ile son bulmuştur (Eyüboğlu vd., 2014). Geç Kretase dönemi boyunca etkili olan bu magmatizmanın duraksadığı dönemlerde ise sedimanteraraseviyeleri oluşturan kumlu kireçtaşı, kireçtaşı ve marn tabakaları çökelmiştir. Volkanik kayaç ağırlıklı Geç Kretase istifi, Mestriştiyen-Paleosen yaşlı olan ve başlıca kumlu kireçtaşı, biyomikrit ve marn ardalanmasından oluşan Bakırköy Formasyonu tarafından örtülür (Eyüboğlu vd., 2014). Geç Kretase dönemi, özellikle alanın doğu kesiminde olmak üzere (Kaçkar Batoliti), tüm bölgede granitik kütlelerin yerleşimi ile de karakteristiktir. İnceleme alanında Senozoyik dönemi baskın olarak, Eosen yaşlı bazaltik-andezitik volkanik kayaçlar (Kabaköy Formasyonu) ile granitik ve gabroyik kütleler ve Miyo-Pliyosen yaşlı alkalin volkanikler (Saraftepebazaniti), başlıca kırıntılı sedimanter kayaçlardan oluşan ve yer yer de bazik piroklastik aktivitenin ürünlerini içeren Beşirli Formasyonu ile temsil edilir (Eyüboğlu vd., 2014).



Şekil 2. Doğu Karadeniz Bölümü Jeoloji Haritası (Eyüboğlu vd., 2014)

2.3. Ayrışma

Bölgede, özellikle bazik karakterli volkanik birimlerin ayrışması ile oluşan regolitik zeminlerin kalınlığı birkaç metreden 20 m'ye kadar değişmektedir. Regolitler genel olarak, Eosen-Neojen (?) yaşlı volkano-tortul serinin en üst seviyelerinde gözükmektedir. Özellikle temeldeki volkanik kayaçların ayrışması sonucu oluşan kırmızı killer, derine doğru ayrışmamış volkanik kayaçlara geçiş gösterir. Bölgede yapılan çalışmalarda özellikle ayrışma derinliğinin 5 m'den yüksek olduğu kesimlerde heyelanların yoğunlaştığı görülmektedir (Tablo 1).

Çizelge 1. Ayrışma derinliğine göre bölgede oluşan heyelanların yüzdeleri (AFAD, 2010)

Ayrışma derinliği (m)	Heyelan yüzdesi
0-5	% 10
5-10	% 35
10-15	% 45
15-	% 10

2.4. Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri

Volkanik kayaçların ayrışması sonucu oluşan zeminlerin tane boyu dağılımları, su içeriği, özgül ağırlığı ve doğal birim hacim ağırlığı ve plastik özellikleri belirlenmiştir. Zeminlerin su içeriklerinin % 29 ile % 55, özgül ağırlıklarının 2.36 ile 2.61, doğal birim hacim ağırlıklarının ise 16 kN/m^3 ile 19 kN/m^3 arasında değiştiği görülmektedir. Bununla birlikte, zemin içerisindeki çakıl oranının % 3'ü geçmediği, kum oranının % 11 ile % 20, silt oranının % 20 ile 30 ve kil oranının % 35 ile 50 arasında olduğu belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda numunelerin, likit limitlerinin % 33 ile % 90, plastik limitlerinin % 18 ile % 51 ve plastisite indisinin ise % 10 ile % 40 arasında olduğu görülmüştür. Çalışmada zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre sınıflandırılmış ve buna göre zeminlerin MH, OH ve CH sınıflarında olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlardan, çalışma konusu zeminlerden alınan örneklerin yaklaşık % 5'inin çok yüksek plastisiteli, % 70'inin yüksek plastisiteli, % 20'sinin orta plastisiteli, % 5'inin düşük plastisiteli zeminler sınıfına girdiği anlaşılmaktadır. Kil içeriği yüksek olan kayaçların bünyelerine su almaları durumunda şişme davranışlarını önceden tahmin edebilmek için şişme potansiyeli açısından değerlendirilmesinde yarar vardır. Çalışmada volkanik kayaçların ayrışma ürünü olan regolitik zeminlerin plastisite özellikleri ve aktivite değerlerinden yararlanarak genellikle orta ve düşük şişme potansiyeline sahip oldukları saptanmıştır.

Zeminlerin makaslama dayanımı parametreleri belirlenmiş, kohezyon değerlerinin 10 ile 51 kPa arasında, içsel sürtünme açısının ise 7 ile 40^o arasında değiştiği ortaya konulmuştur (Ersoy vd.,2013).

2.5. Morfoloji, İklim ve Bitki Örtüsü

Doğu Karadeniz Bölümü'nde deniz kıyısına paralel yüksek sıradağlar hakimdir. Doğu-Batı doğrultusundaki bu dağlar, Karadeniz kıyısının hemen gerisinde uzanmaktadır. Bu nedenle kıyı bölgelerinde düz alanlar kısıtlıdır. Nüfusun çoğu dağlar ve kıyı şeridi arasında kalan dar ve düzlük alanlarda bulunmaktadır. Bununla birlikte, sahile dik konumlu vadiler boyunca da yerleşimler görülmektedir. Belirli alanlardaki, yüksek eğimli alanlarda meydana gelen kütle hareketleri bu doğal yapının bir sonucudur.

Doğu Karadeniz Bölümü kıyı şeridinde yazlar sıcak, kışlar ılık ve her mevsim yağışlı bir iklim hakimdir. Aylık ortalama sıcaklık kıyı bölgesindeki illerde hemen hemen aynıdır. Yıllık ortalama sıcaklık 13.7 ^{0}C ile 14.5 ^{0}C arasında değişmektedir. Yıllık yağış miktarı ise bölge içinde farklılıklar göstermektedir. Batıda yıllık yağış yaklaşık 1000 mm iken, doğuda bu değer 2000 mm'nin üzerindedir

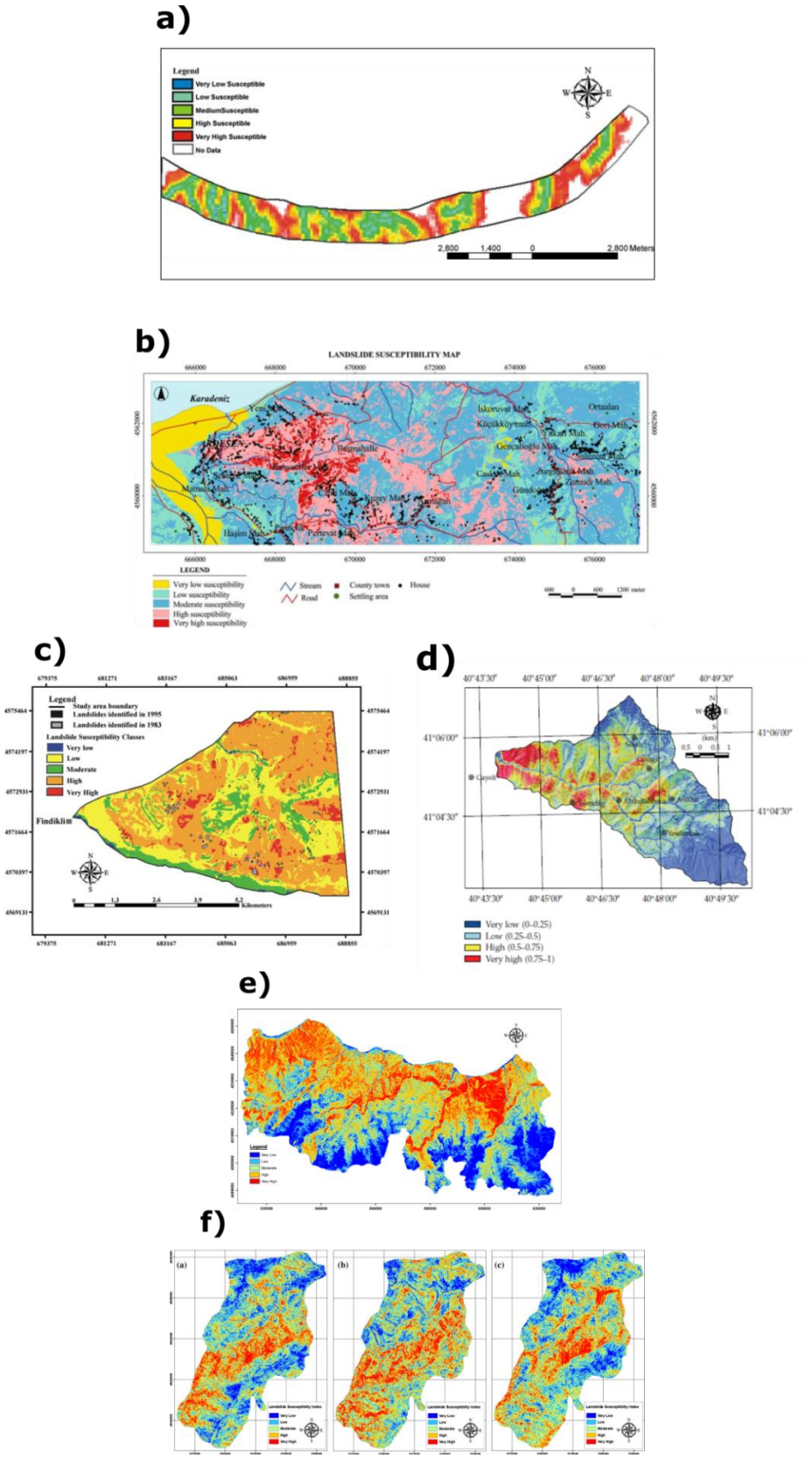
Doğu Karadeniz Bölümü'nde her mevsim yağış izlenir. En çok yağış, sonbahar ve kış aylarında olmakla beraber, Temmuz ve Ağustos aylarında sağanak ve ani yağışlar görülür. Bölgede yüksek eğim, morfolojik, jeolojik ve hidrolojik yapı taşkın ve heyelanlar için uygun koşullar sağlamaktadır. Bununla birlikte, özellikle aşırı yağışlar ve yapay kazılar heyelana duyarlı alanlarda yamaç dengesini bozarak kütlesel duraysızlıklara yol açmaktadır.

3. BÖLGEDE YAPILAN HEYELAN TAHMİNİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Doğal afetlerin meydana gelmeden önce yer, büyüklük ve tekrar meydana gelme olasılıklarına yönelik tahmin çalışmaları, son 30 yılda dünyada afet önleme amaçlı olarak araştırmacılar ve ilgili kurumlar (araştırma merkezleri, enstitüler, yerel ve genel yönetim birimleri vb.) tarafından sıklıkla kullanılan yaklaşımlar olarak görülmektedir. Bu amaçla, özellikle kütle hareketleri ile ilgili olarak kütle hareketinin mekânsal olarak meydana gelme olasılıklarının belirlenmesi amacıyla "duyarlılık", büyüklük ve tekrarlanma olasılıklarına yönelik olarak "tehlike" ve bunların birleşimi ile üretilerek canlı-cansız varlıklar üzerinde maddi kayıp boyutunda değerlendirme sağlayan "risk" haritalarının üretildiği görülmektedir (Fell vd., 2008). Sözü edilen bu değerlendirmelerde, litoloji, ayrışma, yamaç parametreleri (eğim, yönelim, eğrilik, akarsu güç indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi vb.), çevresel parametreler (arazi örtüsü/kullanımı, yollara yakınlık, dere yataklarına yakınlık vb.) ve yapısal jeolojik (kırık hatlarına yakınlık, kırıklılık yoğunluğu vb.) veriler kütle hareketlerinin oluşumunu hazırlayan parametreler olarak dikkate alınmaktadır (Chacon vd., 2006). Tehlike aşamasında, kütle hareketini tetikleyen yağış, deprem vb. tetikleyici unsurların mekânsal dağılım ve zamansal tekrarlanma gibi verilerinin elde edilmesi de olması gereken en önemli aşamalardan birisidir (Van Vesten vd., 1999). Söz konusu bu verilerin elde edilmesinin yanı sıra, en önemli ve hemen hemen olmazsa olmaz verilerin başında da kütle hareketi envanter verisi gelmektedir. İlgili alanda, daha önceden meydana gelmiş kayma, akma, düşme vb. türdeki kütle hareketlerinin mekânsal, geometrik (boyu, genişliği, deriniliği vb.) ve aktivasyon (aktif, durağan, duraylı halde vb.) özelliklerinin sözü edilen envanter verisinde yer alması da gerekmektedir. Bu nedenle, titiz ve dikkatle hazırlanmış ve güncellenmiş envanter verisinin yukarıda bahsedilen duyarlılık, tehlike ve risk değerlendirmelerinin sağlıklı bir şekilde yapılmasında son derece önemli olduğu da belirtilmektedir (Van Westen vd., 1999). Tüm veriler elde edildikten sonra seçilecek uygun bir yöntem (istatistiksel, sezgisel, uzman görüşü vb.) ile de alana ait duyarlılık, tehlike ve risk haritalarının elde edilmesi mümkün olacaktır.

Bu kapsamda, Doğu Karadeniz Bölümünde son 10 yıl içerisinde yapılan heyelan duyarlılık, tehlike ve risk çalışmalarına bakıldığı zaman da önemli bir çabanın sarf edildiği görülmektedir. Bu amaçla, Yalçın ve Bulut (2007) Ardeşen (Rize) ilçesinde, Akgün ve Bulut (2007) Arsin-Yomra ilçeleri (Trabzon) arasında, Akgün vd. (2008) Fındıklı (Rize) ilçesinde, Dağ (2007) Çayeli (Rize) ilçesinde, Nefeslioğlu ve Gökçeoğlu (2011) Çayeli Büyükköy (Rize) su toplama havzasında, Aksoy (2011) Ardeşen (Rize) ilçesinde, Reis vd. (2012) Rize il genelinde, Akgün (2014) Tonya (Trabzon) ilçesinde, Osna vd. (2014) Değirmendere Vadisi (Trabzon), Kavzoğlu vd. (2014a) Trabzon il genelinde ve Kavzogluvd (2014b) Düzköy (Trabzon) ilçesinde yapmış oldukları çalışmalarda ilgili alanların heyelan duyarlılık haritalarını seçmiş oldukları farklı parametreler ve değerlendirme yöntemleri ile hazırlamışlardır (Şekil 3).

Görüldüğü üzere, son derece geniş bir alan olan ve hemen her yerinde değişik boyut ve türde kütle hareketinin meydana geldiği Doğu Karadeniz Bölümünde, yukarıda örneklenen çalışmalar dışında aynı amaç için başka çalışmaların olmadığı görülmektedir. Sözü edilen çalışmaların hemen hepsi akademik çevreler tarafından ve son derece kısıtlı olanak ve bütçeler içerisinde yapılmış çalışmalar olması nedeniyle oldukça değerli görülmektedir. Bu noktada, yapılan bu çalışmalarda ilerleyen zaman dilimlerinde mekânsal olarak nerelerde heyelan olabileceğine yönelik tahminler gerçekleştirilmiş ve bu alanların yerleşim, yol, kazı vb. mühendislik amaçlı çalışmaların planlanması ve yönetilmesinde bir altlık olarak kullanılmasının beklendiği vurgusu yapılmıştır. Ancak, uygulamada söz konusu bu vurgunun ne kadar hayata geçirilebildiği ve karar vericiler tarafından ne kadar dikkate alınarak kullanıldığı hususu bilinmemektedir.



Şekil 3. Doğu Karadeniz Bölümünde yapılmış olan heyelan duyarlılık ve tehlike çalışmalarından bazı örnekler: a)Akgun ve Bulut (2007), b) Yalcin ve Bulut (2007), c) Akgun vd. (2008), d) Nefeslioglu ve Gokceoglu (2011), e) Kavzoglu vd. (2014a), f) Kavzoglu vd. (2014b).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğu Karadeniz kıyı şeridindeki heyelanların neredeyse tamamı "yüksek derecede ve tamamen ayrışmış" kayaçlar içerisinde meydana gelmiştir. Heyelanların oluşmasında yağışların bol olması, yamaç eğim açılarının fazla olması, yamaç topuklarının akarsular tarafından oyulması, yamaçlarda değişik amaçlı bilinçsiz kazı yapılması, konutlardaki atık su drenajının yapılmaması ve taş ocağı açımında kullanılan patlayıcı maddelerin sarsıntı oluşturması vb. gibi nedenler etkili olmuştur.

Şev ve yamaç duraylılık analizlerinde limit denge yöntemlerine dayalı yaklaşımların önemi büyüktür. Ancak, yörede çok fazla sayıda yamaç ve şev bulunması nedeniyle, bölgesel ölçekli (1:25.000-1:100.000 ölçekte) çalışmalarda deterministik yaklaşımlar çok zaman alıcı ve yüksek maliyetli olur. Bu nedenle şev ve yamaçların duraylılıklarının deterministik yaklaşımlarla incelenmesinden ziyade, bölgenin duraylılık, tehlike ve hatta risk haritalarının üretilmesi zamanın etkin şekilde değerlendirilmesi ve maliyetin azaltılması açısından son derecede önemlidir.

Bu haritaların üretilmesi için, güncel veri toplama ve daha önce toplanmış verilerin güncellenerek ileride yapılacak çalışmalara daha sağlıklı veri temin edilebilmesi amacıyla, genel ve bölgesel ölçekten ziyade il bazında veri toplama ve değerlendirme maksadıyla oluşturulacak afet yönetim birimlerinin aktif hale getirilmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle, üniversite-kamu işbirliğiyle Doğu Karadeniz Bölümü için Trabzon il merkezinde bir Heyelan Araştırma Enstitüsünün kurulması gerekmektedir. Zira, mevcut durumun afet yönetimi için yeterli olmadığı, bundan dolayı heyelanların neden olacağı afetlerin önceden kestirimi ve zararlarının azaltılması hususunda yeterince başarılı olunamayacağı açıktır.

5. KAYNAKLAR

AFAD, 2010. Karadeniz Bölgesinin su baskını ve heyelan tehlikeleri.Heyelan Projeleri Eğitimi, Rize.

Akgün, A.,2014. A different aspect to use of some soft computing methods for landslide susceptibility mapping. EGU General Assembly, Vienna, Austria.

Akgün, A., Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin Yomra (Trabzon, North Turkey) region. Environmental Geology, 51, 1377-1387.

Akgün, A., Dağ, S., Bulut, F., 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. Environmental Geology, 54, 1127-1143.

Aksoy, G., 2011. Arhavi (Artvin) ve Çevresinin Heyelan Duyarlılık Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Beret, B.,1955. Sera heyelanı. Türk Coğrafya Dergisi, 13-14.

Bulut, F.,Boynukalın, S., Tarhan, F., Ataoğlu, E, 1999. Reliability of landslide isopleth maps.Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58, 95-98.

Chacon, J.,Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65, 341-411.

Dağ, S., 2007.Çayeli (Rize) ve çevresinin istatistiksel yöntemlerle heyelan duyarlılık analizi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Dağ, S., Bulut, F., 2012. Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 36(1), 35-62.

Duman, T.Y.,Nefeslioğlu, H.A., Çan, T., Olgun, Ş., Durmaz, S., Hamzaçebi, S., Çöreklioğlu, Ş.,2007. Türkiye heyelan envanter haritaları. 58. Türkiye Jeoloji Kurultayı, s.326.

Erguvanlı, K., Tarhan, T., 1982. Doğu Karadeniz kıyı şeridindeki kütle hareketlerinin mühendislik jeoloji açısından değerlendirilmesi. KTÜ Yer Bilimleri Dergisi,100. Yıl Özel Sayı.

Ersoy, H., Bulut, F., 2008. Kütle hareketlerinin oluşumunda yağışın rolü. Taşkın, Heyelan ve Dere Yataklarının Korunması Konferansı, Trabzon.

Ersoy, H., Karslı, M.B., Çellek, S., Kul, B., Baykan, İ., Parsons, R.L., (2013). Estimation of the soil strength parameters in Tertiary volcanic regolith (NE Turkey) using analytical hierarchy process. Journal of Earth System Science, 122(6), 1545-1555.

Eyüboğlu, Y.,Santosh, M., Keewook, Y., Tuysuz, N., Korkmaz, S., Akaryalı, E., 2014. The Eastern Black Sea-type volcanogenic massive sulfide deposites: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and an overview of the geodynamics of oregenesis. Ore Geology Reviews, 59, 29-54.

Fell, R.,Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L.,Leroi, E., Savage,W.Z., 2008. Guide lines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, 102, 85-98.

Kadıoğlu, M., 2006. Heyelan ve sel risk yönetimi. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 1. Heyelan Sempozyumu, Trabzon.

Kavzoğlu, T., Sahin, E.K., Colksen, İ., 2014b. An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoydistrict. Natural Hazards, 76, 471-496.

Kavzoğlu, T., Sahin, E.K., Colksen, İ., 2014a. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. Landslides, 11, 425-439.

Nefeslioğlu, H.A., Gökçeoğlu, C., 2011. Probabilistic risk assessment in medium scale for rainfall-ınduced earth flows:Cataklic atchment area(Cayeli, Rize, Turkey). Mathematical Problems in Engineering, 2011, 21.

Önalp, A. Tarhan, F., Sevinç, N., 1987. Doğu Karadeniz heyelanları analizi, dengeli yamaç tasarımı. TÜBİTAK MAG: 585.

Önalp, A., 1991. Doğu Karadeniz heyelanlarının nedenleri, analizi ve kontrol olanakları. Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 85-96.

Önsoy, H., Murat, İ.K.,Kankal, M., Yüksek, Ö., Filiz, M.H., 2008. Doğu Karadeniz havzasında oluşan taşkınların nedenleri çözüm önerileri. Taşkın, Heyelan ve Dere Yataklarının Korunması Konferansı, Trabzon.

Ösna, T., Sezer, E.A., Akgün, A., 2014. Geofis: An integrated tool for the assessment of landslide susceptibility. Computers and Geosciences, 66, 20-30.

Reis, S., Yalcin, A., Atasoy, M., Nisanci, R., Bayrak, T., Erduran, M., Sancar, C., Ekercin, S., 2012. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratioand analytical hierarchy methods in Rize province (NE Turkey). Environmental Earth Science, 66(7), 2063-2073.

Tarhan, F., 1991. Doğu Karadeniz Bölgesi heyelanlarına genel bir bakış. Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 38-63.

Van Westen, C.J.,Seijmonsbergen, A.C., Mantovani, F., 1999. Comparing landslide hazard maps. Natural Hazards, 20, 137–158.

Yalçın, A., Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a casestudy from Ardesen (NE-Turkey). Natural Hazards, 41, 201-226.

Yalçın, A., 2011. A geotechnical study on the landslides in Trabzon province NE Turkey.Applied Clay Science, 52, 77-85.

Havuzlu Paleo-Heyelanının (Yusufeli, Artvin) Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi

Engineering Geological Assessment of the Havuzlu Paleo-Landslide (Yusufeli-Artvin)

H. Ersoy[1,*], K. Gelişli[2], A. Bayraktar[3], H. H. Öztürk[4], A. C. Seçkin[5], G. Karaibrahimoğlu[6], G. Sağır[4], M. Özen[4], K. Tezel[1], B. Yüregir[1] B. Kul Yahşi[1]

[1] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
[3] Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon
[4] DSİ, 26. Bölge Müdürlüğü, Artvin
[5] AYSON Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş. Ankara
[6] Doğuş Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş, Yusufeli, Artvin
*(*ersoy@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, Artvin barajının (Yusufeli-Artvin) su tutmasıyla topuk kısmı gölalanı içerisinde kalacak olan paleo-heyelan malzemenin stabilitesi araştırılmıştır. Çalışmada, derinlikleri 40-120 metre arasında değişen 25 adet sondaj kuyusu açılmış, 11 profilde elektrik rezistivite ve multi-elektrod çalışmaları yapılmıştır. 4 kuyuda 126 adet presiyometre deneyi yapılmış ve yeraltı suyu gözlemi için 2 adet rasat kuyusu tesis edilmiştir. Çalışmada Janbu yöntemi uygulanarak suyun işletme seviyesinde ve yatay yer ivmesinin 0.25g olması durumunda birleşik kayma analizleri yapılmış, 0.5-1.5 güvenlik sayısına sahip olası kayma yüzeylerinin 840 m'den aşağı kotlarda olduğu anlaşılmıştır. Analizlerle kaymanın gerileyen şekilde devam edeceği tespit edilmiş, gerileyen kaymalar sonucunda olası heyelan sınırının 640 m kotuna ulaştığı görülmüştür. Tekrarlayan her kayma sonucunda gelişecek yeni kaymada, kayan malzemenin boyutları ve hacmi azalmıştır. Bu durum baraj inşası sonucunda rezervuar suyunun işletme kotuna ulaşması durumunda tüm heyelan malzemesinin etkileneceği bir duraysızlığın olmayacağı, daha küçük boyutlarda ve gerileyen nitelikte tekrarlı kütle hareketi riskinin olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Baraj, Göl, Rezervuar, Heyelan, Jeoteknik

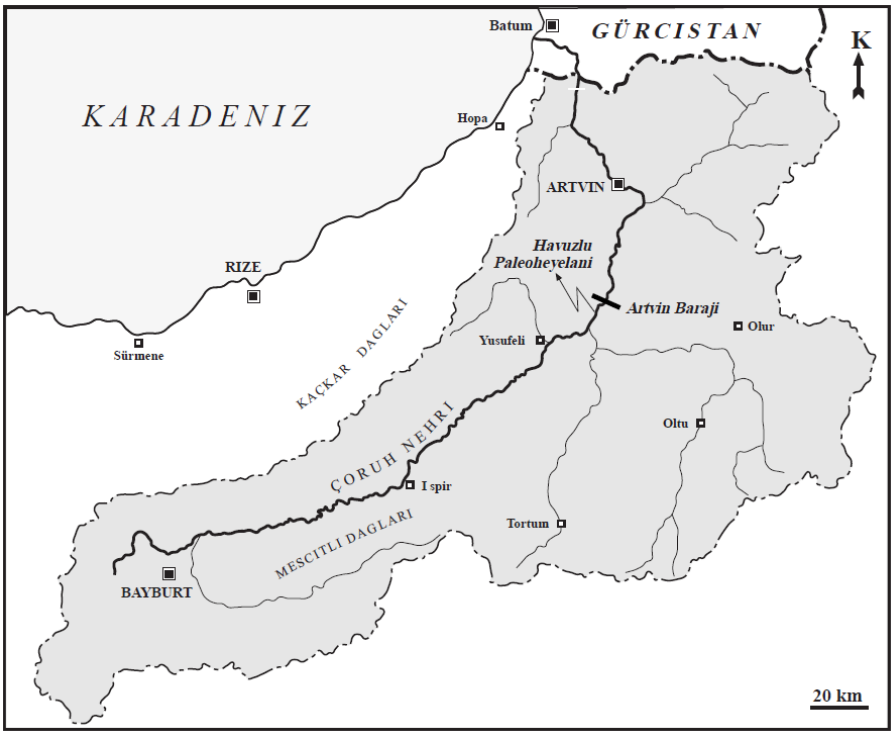
ABSTRACT: *In this study, stability of the paleo-landslide material, whose toe area will remain within the lake area due to impoundment of Artvin dam (Yusufeli-Artvin) retaining water, was investigated. During the study, 22 boreholes, the depths of which vary between 40-120 meters, were drilled and electric-resistivity and multi-electrode studies were performed on 11 profiles. 126 pressuremeter tests were conducted in 4 wells and 2 observation wells were installed for observation of underground water. The Janbu method considering combined sliding was applied in the analysis. It was found that possible sliding surfaces with 0.5-1.5 factors of safety had levels below an elevation of 840 m for an operational level of water and in case of 0.25g earthquake ground acceleration. With the analysis, it has been determined that sliding will continue in a retrogressive manner; it was observed that possible limit of the landslide reached 640 m of altitude as a result of the retrogressive sliding. The size and volume of the sliding material decrease for each newly occurring landslide as a consequence of recurrence of the retrogressive sliding. This suggests that a failure, which might affect the entire landslide material will not occur in case the reservoir water rises to the operational level after improvement, and that there is a risk for a repeated retrogressive mass movement with smaller dimensions.*

Keywords: *Dam, Lake, Reservoir, Landslide, Geotechnic*

1. GİRİŞ

Artvin Barajı ve HES Projesi, Doğu Karadeniz Bölümü'nün Orta Çoruh Havzası'nda ve Çoruh Nehri üzerinde planlanmıştır. Yusufeli ilçesinin yaklaşık 20 km kuzey batısında bulunan (Şekil 1) ve inşası halen devam etmekte olan baraj kemer tipindedir.

Çoruh Nehri Havzası'nda baraj yeri ve tipi seçimine yönelik ilk çalışmalar 1970'li yılların sonlarına doğru Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) tarafından başlatılmıştır (Ertunç, 1980). 1982 yılında Çoruh Nehri Havzası Master Planı yapılmış (EİEİ, 1980), bu kapsamda tüm havzanın jeolojik, jeomorfolojik, tektonik ve iklim özellikleri ile sosyoekonomik durumu ve ulaşım olanakları araştırılmıştır. EİEİ tarafından 1990 yılında revize edilen çalışmalar sonucunda Artvin Barajı ve Hidroelektrik Santral Projesi hazırlanmıştır. Proje kapsamında baraj inşa edilecek alanın ve çevresinin iklim, hidrolojik, jeolojik ve sismik özellikleri detaylı olarak incelenmiş, derivasyon yapılarının planlaması, baraj tipi seçimi, temel iyileştirme yöntemleri, dolusavak ve dip savak tasarımı, enerji üretim tesislerinin projelendirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Artvin Barajı rezervuar alanında iki büyük heyelanın bulunduğu belirlenmiştir. Baraj yerine göre akış yukarıda, Çoruh Nehri'nin sağ sahilinde ve baraja 8 km uzaklıkta bulunan heyelan Havuzlu Paleo-Heyelanı, baraj yerine göre akış yukarıda, Çoruh Nehri'nin sol sahilinde ve baraja 6.5 km uzaklıkta bulunan heyelan ise Demirkent Paleo-Heyelanı olarak tanımlanmıştır (EİEİ, 1990).

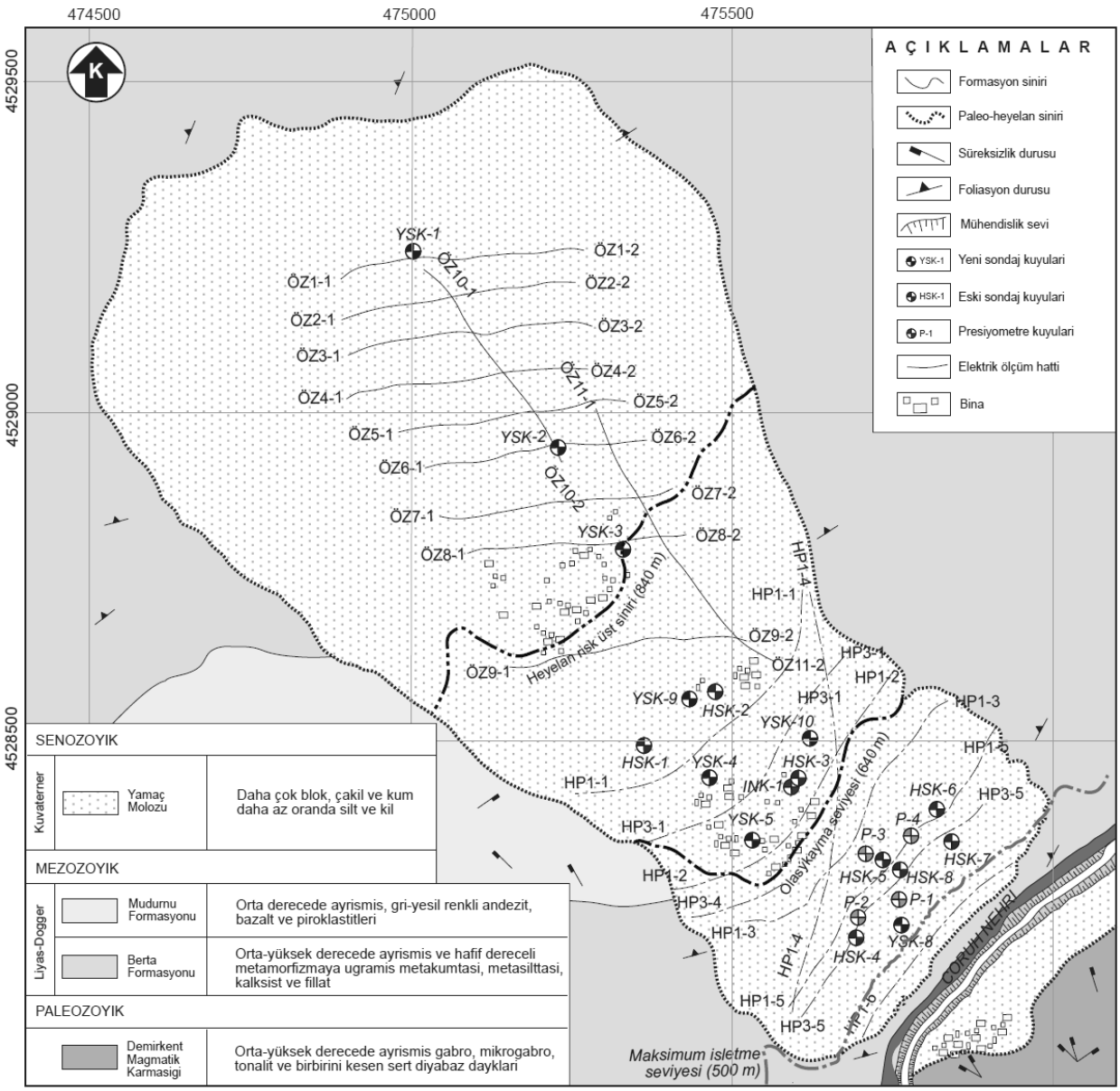


Şekil 1. Artvin Barajı ve Havuzlu Paleoheyelanı'nın Çoruh Havzası içerisindeki konumu

EİEİ tarafından 1992 yılında yapılan son çalışmada ise, Artvin Baraj ve Hidroelektrik Santral Projesi ile ilgili detaylı mühendislik jeolojisi çalışmaları yapılmış, sahada piyozometrik basıncın yükselmesi sonucunda heyelan riskini arttırabileceği ve deprem etkisinin, piyozometrik basıncın yükselmesine kıyasla daha etkili olacağı belirlenmiştir. Bununla birlikte, heyelan olması durumunda rezervuara dolacak malzeme hacminin belirlenmesine yönelik detaylı çalışmaların yapılması önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında ise; inşası devam etmekte olan Artvin barajının su tutmasıyla birlikte topuk kısmı gölalanı içerisinde kalacak olan Havuzlu paleo-heyelanın yanal ve düşey devamlılığı jeolojik ve jeofizik çalışmalar ile belirlenmiş, farklı koşullar için paleo-heyelan malzemesinin stabilitesi araştırılmıştır.

2. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

Havuzlu Paleo-heyelan malzemesinin yanal ve düşey devamlılığını ve heyelan malzemesinin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan mühendislik jeolojisi çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Arazi gözlemleri ve yerinde yapılan deneyler (sondaj ve jeofizik çalışmalar) çalışmanın ilk aşamasını oluştururken, laboratuvar deneyleri (konsolide olmamış malzemesinin indeks özellikleri) ikinci aşamayı oluşturmuştur. Tüm bu verilerin ışığında mühendislik jeolojisi haritaları hazırlanırken, ISRM (1976) ve IAEG (1976 ve 1979) tarafından önerilen ve Dearman (1981) tarafından modifiye edilen litolojiye, kökene ve jeoteknik özelliklere dayanan sınıflama sistemleri kullanılmış, sonuç olarak 1/2500 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası ve kesitleri hazırlanmıştır (Şekil 2).

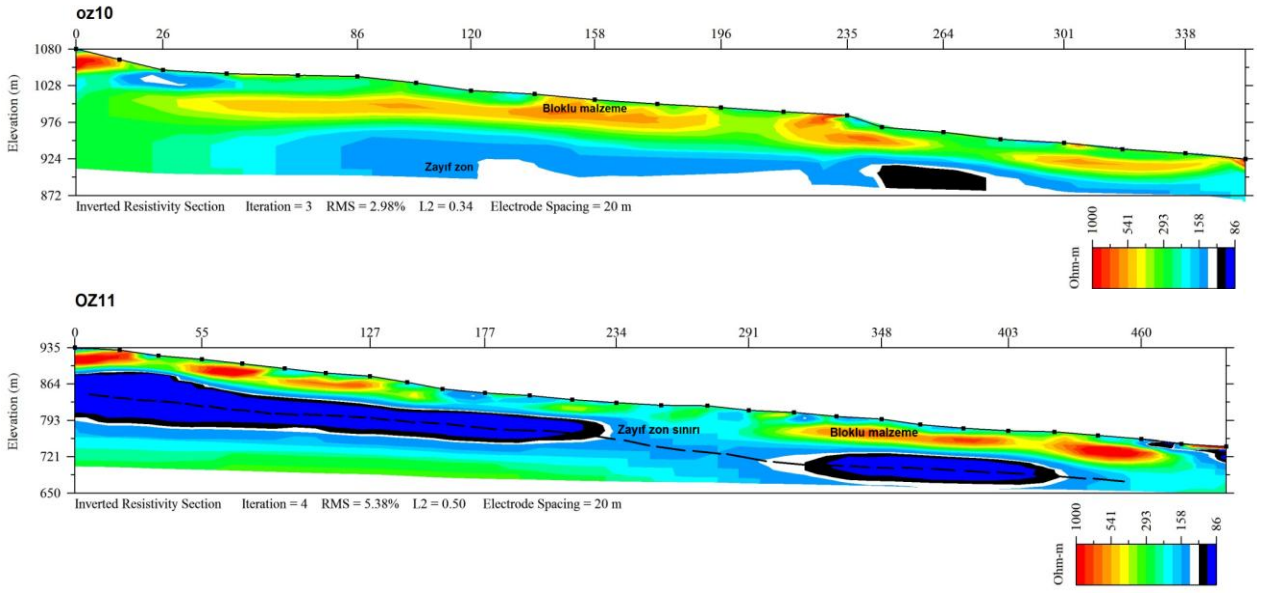


Şekil 2. Havuzlu Paleo-heyelanı'nın mühendislik jeolojisi haritası

Çalışma konusu heyelan malzemesinin geometrisinin ortaya konulması amacıyla 2013 ve 2014 yılları arasında heyelan malzemesini tamamıyla kat edecek ve derinlikleri ana kayada 10 m ilerleyecek şekilde toplam 1740 m olmak üzere 23 adet sondaj kuyusu açılmış (Çizelge 1) ve 11 profilde elektrik rezistivite ve multi-elektrod çalışmaları yapılmıştır (Şekil 3).

Çizelge 1. Havuzlu Paleo-heyelan sahasında açılan sondajlar hakkında bilgiler

Sondaj No	Koordinatlar		Kot (m)	Kaya Derinliği (m)	Toplam Derinlik (m)
	Y	X	Z		
HSK-1	475363.932	4528494	745	94.00	100.00
HSK-2	475476.439	4528575	738	52.00	52.00
HSK-3	475597.611	4528438	671	74.00	77.00
HSK-4	475695.091	4528200	550	62.00	76.50
HSK-5	475737.313	4528326	586	61.00	85.00
HSK-6	475821.513	4528395	578	40.00	61.00
HSK-7	475843.374	4528345	542	40.00	55.00
HSK-8	475763.320	4528302	569	57.00	64.00
YSK-1	475006.06	4529244	1078	39.00	75.00
YSK-2	475226.43	4528947	929	86.00	97.10
YSK-3	475332.42	4528785	848	80.80	91.80
YSK-4	475471.89	4528447	698	83.00	100.00
YSK-5	475532.83	4528348	664	105.00	117.50
YSK-8	475764.67	4528234	523	33.00	51.00
YSK-9-1	475438.00	4528563	739	-	80.20
YSK-9-2	475444.23	4528565	739	-	74.90
YSK-10	475623.77	4528502	679	78.00	93.60
INK-1	475597.52	4528436	670	69.00	88.00
P-1	475761.86	4528259	538	41.00	50.00
P-2	474697.40	4528228	556	44.00	60.00
P-3	475708.90	4528327	598	55.30	70.00
P-4	475781.74	4528363	574	40.00	60.00
P-4A	475787.09	4528378	574	40.00	60.00
			Toplam	-	1739.6



Şekil 3. Heyelan malzemesi eğim yönünde alınmış OZ 10 ve OZ 11 profile ait 2-boyutlu yeraltı özdirenç kesiti

Elde edilen sonuçlar kullanılarak alınan jeolojik kesitler incelenip yorumlandığında, paleo-heyelan malzemesinin 39-105 metre arasında kalınlığa, 1650 m uzunluğa yaklaşık 80-85 milyon m^3 hacme sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 2 ve 3). Paleo-heyelan malzemesinin indeks ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yerinde ve laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiş, 5 adet sondaj ve 4 adet araştırma çukurundan alınan örselenmiş örnekler üzerinde tane boyu dağılım ve kıvam limitleri deneyleri ASTM D422, D4318 D4718 (ASTM 1991a, b, c) standartlarına göre yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Sondajlardan ve araştırma çukurlarından alınan örselenmemiş zemin örneklerinin bazı indeks özellikleri

Örnek No	Dane dağılımı (%)			Kıvam limitleri (%)			Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	Genel Sembol
	Çakıl	Kum	Silt+Kil	LL	PL	PI		
SK5-1	1	56	43	-	-	-	-	SM
SK4-1	22	29	49	41	25	16	-	SC
SK1-1	20	55	25	37	23	14	-	SC
SK1-2	29	40	31	41	25	16	-	SC
SK5-2	45	29	26	39	24	15	-	GC
AÇ1	-	-	-	30	17	13	21.84	-
AÇ2	-	-	-	27	15	12	20.08	-
AÇ3	30	49	21	-	-	-	-	-
AÇ4	29	53	18	-	-	-	-	-
Aralık	1-45	29-56	18-49	27-41	15-25	12-16		

Çalışma kapsamında 4 kuyuda (P1, P2, P3 ve P4) 126 adet presiyometre deneyi yapılmış (Çizelge 3) ve bu verilerden yararlanılarak farklı derinlikler için içsel sürtünme açısı değerleri hesaplanmıştır. 3 kuyuda yeraltısuyuna rastlandığı için bu kuyular izleme amaçlı ölçüm aletiyle (presiyometre) donatılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 3. Presiyometre verileri sonuçlarından yararlanılarak farklı derinlikler için hesaplanan içsel sürtünme açısı değerleri

Derinlik	P1	P2	P3	P4
0-5			34-40	30-32
5-10	34-40	30-32		
10-15			32-34	40
15-20				> 50
20-25	34-37	45-48		40
25-30				
30-35	> 50	32-34		48
35-40		48	48	
40-45				
45-50	fillat	fillat		fillat
50-55				
55-60			fillat	

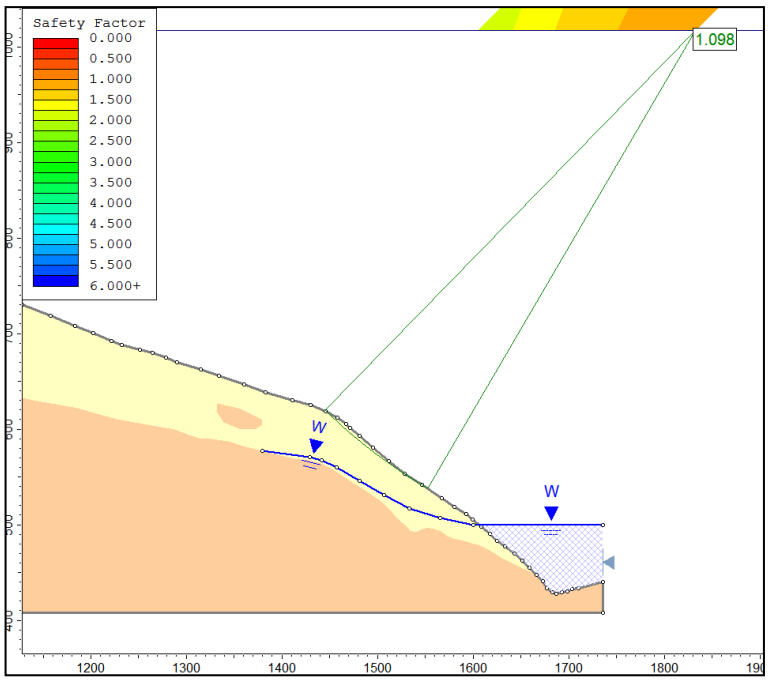
Çizelge 4. Yeraltısuyu derinliği ölçüm sonuçları

Sondaj No	Koordinatlar		Kot (m)	Statik Seviye (m)	Yeraltı suyu kotu (m)
	Y	X	Z		
HSK-4	475695	4528200	550	64.80	485.98
HSK-6	475821	4528395	578	53.55	524.92
P-4	475781	4528363	574	48.10	526.43

3. YAMAÇ STABİLİTE ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında, arazi çalışmaları sonucunda yanal ve düşey devamlılığı belirlenen paleo-heyelan malzemesinin Artvin Barajı'nın su tutması sonucu göl seviyesinin 500 m kotuna ulaşması durumundaki stabilitesi limit denge yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Toplam 5000 kayma yüzeyi (dairesel-düzlemsel) için stabilite analizi yapılmış (Janbu 1956, 1973), 840 metreden yukarı kotlarda güvenlik sayısının 1.5 değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre SM ve SC olarak tanımlanan çok düşük kohezyonlu bu zeminin su ile teması sonucunda zamanla kohezyonunu kaybedeceği düşünülerek, analizlerde bu değer "0" olarak seçilmiştir. Bununla birlikte, özellikle presiyometre deney sonuçları kullanılarak hesaplanan 30-50^0 arasında olduğu hesaplanmış ve analizlerde kullanılmak üzere bu değerlerin ortalaması 38^0 esas alınmıştır. Rezervuardaki suyun maksimum işletme seviyesinde (500 m) olması durumunda yapılan limit denge analizlerinde güvenlik katsayısı 1.098 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4).



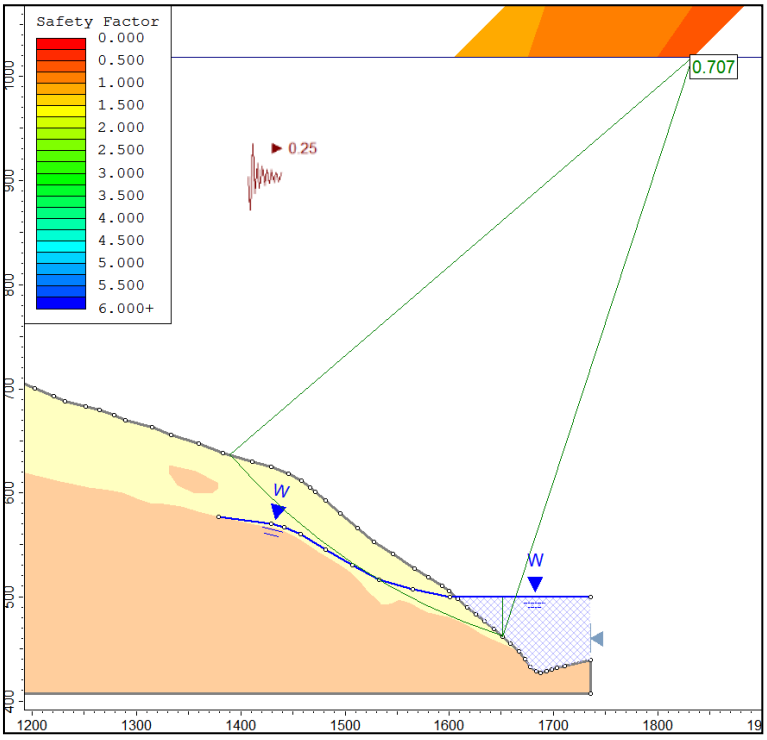
Şekil 4. Gölün maksimum seviyede (500 m kotu) olması durumunda minimum güvenlik sayısına ait kayma yüzeyi için stabilite analiz sonucu

Çalışmanın ikinci aşamasında deprem durumu gözetilerek yatay yer ivmesi 0.25g alınmış (Erdik vd., 2006) ve analiz tekrarlanmıştır. Bu durumda güvenlik sayısının 0.71'e düştüğü görülmüştür. Bu durumda gelişebilecek bir kütle hareketinin boyutları incelendiğinde yaklaşık 32 m kalınlığında, 314 m uzunluğunda ve hacmi yaklaşık 4 x 10^6 m^3 lük bir kütlenin bulunduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5).

Bu durum baraj inşası sonucunda rezervuar suyunun maksimum işletme kotuna ulaşması durumunda heyelan riskini olduğu ancak 80 10^6 m^3 lük tüm heyelan malzemesinin etkileneceği bir duraysızlık olmayacağı anlaşılmıştır. Bununla birlikte, daha küçük boyutlarda ve gerileyen nitelikte tekrarlı kütle hareketi riskinin olduğu, gelişebilecek olası kütle hareketinin en fazla 640 m kotuna ulaşacağını ortaya koyulmuştur. Olası kayma yüzeylerinin genel olarak heyelan topuk noktasından yaklaşık 220 m'lik mesafede geliştiği görülmektedir.

3. SONUÇLAR

Yapılan tüm değerlendirmeler sonucunda heyelan malzemesinde meydana gelebilecek olası duraysızlıkların 840 m kotundan aşağıda bulunan yüzeylerden itibaren gelişebileceği de görülmektedir. Bu durum; çalışma konusu heyelan malzemesinde kütlesel bir yenilmeden (heyelan) ziyade lokal duraysızlığın gelişme potansiyelinin çok daha fazla olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte her iki durum için yapılan hesaplamalarda güvenlik katsayısı değeri 1.5'in (Huang, 1983) altında olduğu için Havuzlu Köyü yaşayanları için bir riskin bulunduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Gölün maksimum seviyede (500 m) ve yer ivmesi değerinin 0.25g olması durumunda minimum güvenlik katsayısı veren kayma yüzeyi için stabilite analiz sonucu

Özellikle deprem yer ivmesinin etkisinde yapılan hesaplamalarda, mevcut durumda (su olmaksızın) dahi heyelan açısından yüksek riskin olduğu anlaşılmaktadır. Aynı risk suyun maksimum işletme seviyesinde olması durumunda da değişmemiştir. Burada güvenlik katsayısını düşüren en büyük etkenin deprem yer ivmesi olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışma kapsamında, en düşük güvenlik sayısı değerine sahip kayma dairesinin konumu ve geometrisi incelendiğinde, olası heyelan malzemesinin tavan kotunun 640 m, taban kotunun 480 m olduğu görülmektedir. Heyelan malzemesinin taban kotu, maksimum işletme seviyesinin (500 m) 20 metre altındadır. Baraj gölünün maksimum işletme seviyesinde olması ve deprem yer ivmesinin etkisi hesaba katılarak yapılan analizlerde yaklaşık 4 x 10^6 m^3 lük bir malzemenin duraysız olacağı hesaplanmıştır. Oluşacak muhtemel heyelanın önceden planlanan çevirme tünelini devre dışı bırakması durumuna karşı, mevcut batordonun yükseltilmesi, tünel giriş ağzına baca yapılması veya tünelin uzatılması gibi önlemlerden birinin alınması önerilir.

Paleo-heyelan malzemesinin, sabit jeodezik ve jeoteknik ölçüm sistemleri ile hem su tutma aşaması hem de baraj işletmesi süresince günlük olarak gerçek zamanlı izlenmesi ve sonuçların değerlendirilerek gerekli tedbirlerin alınması önemlidir.

Heyelan malzemesinin özellikleri nedeniyle, baraj işletmesi süresince rezervuar su seviyesindeki değişimlerin kontrollü yapılması ve ani su seviyesi değişimlerine izin verilmemesi önem arz etmektedir. Ayrıca, Havuzlu Paleo-Heyelan alanında, yerleşimin olup olmamasına bağlı olmaksızın, yüzey ve yağmur sularının uzaklaştırılması uygun olacaktır.

Havuzlu Paleo-heyelanından rezervuar içine ani kütle kaymasıyla Artvin Barajı memba yüzünde ve Yusufeli Barajı mansap topuğunda oluşabilecek dalga yüksekliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, oluşabilecek dalga yüksekliğine göre Artvin Barajının memba ve mansap vadi yamaçları boyunca risk taşıyan bölgeler için gerekli önlemlerin alınması ve bir acil eylem planının hazırlanması önerilir.

4. KAYNAKLAR

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1991a. Annual Book of ASTM Standarts, ASTM Publication Sec. 4 Vol. 04.08 Philadelphia

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1991b. Annual Book of ASTM Standarts, D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils ASTM Publication 18 pp.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1991c. Annual Book of ASTM Standarts, D4718-87 (Reapproved 2001) Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles. ASTM Publication, 3 pp.

Erdik, M., Demircioğlu, M., Şeşetyan, K. ve Durukal, E., 2006, Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları Limanlar ve Havameydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği için Deprem Tehlikesi Belirlenmesi, BÜ Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü.

Ertunç, A., 1980, Çoruh Havzası Olası Baraj Yerleri, Göl Alanları Ve Tünel Güzergahlarının Mühendislik Jeolojisi. Doçentlik tezi, E.I.E.I Yayınlan, Ankara

Janbu, N, Bjerrum, L and Kjaernsli, B, 1956. Veiling ved losning av fundamentaring-soppgaver, Publication No:16, Norwegian Geotechnical Insttute

Janbu, N, 1973. Slope Stability Computations Embankment Dam Engineering-Casagrande Volume, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos (eds.), John Wiley and Sons, 47-86, New York

Dearman, W.R, Matula, M, 1981. Environmental Aspect of Engineering Geological Mapping, Bulletin of International Association of Engineering Geology, 14, 141-146

Huang, Y.H., 1983, Stability Analysis of Earth Slope, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 305 pp.

IAEG (International Association of Engineering Geology), 1976. Engineering Geological Maps. A Guide to Their Preparation, The Unesco Press, Paris, 79 pp.

IAEG (International Association of Engineering Geology), 1979. Engineering Geological Mapping for Planning, Design and Construction in Civil Engineering, England, 380 pp.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1976. Engineering Geological Maps, The UNESCO Press, 15, 78 pp.

Atakum (Samsun) İlçesinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi

Production of Landslide Susceptibility Map of Atakum (Samsun) District

H. Akıncı[1,*], C. Kılıçoğlu[2]

[1] *Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Seyitler, Artvin.*
[2] *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Kavak, Samsun.*
*(*hakinci@artvin.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, Samsun ili Atakum ilçesinin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Heyelan duyarlılık analizinde litoloji, yükseklik, eğim, bakı, plan eğriliği, profil eğriliği ve arazi örtüsü parametreleri kullanılmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılıyor olması, doğru sonuçlar sağlaması ve uygulamasının kolay olması nedeniyle çalışmada "frekans oranı yöntemi" kullanılmıştır. Üretilen duyarlılık haritası, "çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek derecede duyarlı" alanlar olmak üzere 5 grup altında sınıflandırılmıştır. Heyelan duyarlılık haritasının güvenilirliğini test etmek için heyelan envanter haritasında yer alan ve kontrol amacıyla analizlerde kullanılmayan heyelan alanları duyarlılık haritası ile karşılaştırılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritasının kontrol heyelanları ile çok yüksek ve yüksek derecede duyarlı bölgeler bazında toplamda %84.99 uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CBS, Heyelan, Frekans Oranı Yöntemi, Duyarlılık Haritası, Atakum

ABSTRACT: *In this study, landslide susceptibility map of Atakum district of Samsun province was produced. The lithology, altitude, slope, aspect, plan curvature, profile curvature and land cover parameters have been used in the landslide susceptibility analysis. Frequency ratio method has been used in the study since it is widely used in the literature, provides accurate results and is very easy to apply. The areas in the produced susceptibility map has been classified into five groups as "very low, low, moderate, high and very high susceptible". Landslide areas located in the landslide inventory map and the landslide susceptibility map have been compared to each other in order to test the reliability of the produced map. As a result, it was verified that the produced landslide susceptibility map is consistent with the control landslides in a ratio of 84.99% on the basis of the very high and the high susceptible areas.*

Keywords: *GIS, Landslide, Frequency Ratio Method, Susceptibility Map, Atakum*

1. GİRİŞ

Afet, yerel kapasiteyi aşan, ulusal veya uluslararası düzeyde yardım gerektiren, önceden tahmin edilemeyen ve çoğu kez aniden meydana gelen, büyük zararlara, yıkımlara ve acılara neden olan bir durum veya olay olarak tanımlanmaktadır (Vos vd., 2010). Afetler, insanlar için fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıplara neden olan olaylardır. Örneğin, 2012 yılında dünya genelinde meydana gelen 357 doğal afet olayından 120 milyonun üzerinde insanın etkilendiği, 9655 insanın yaşamını yitirdiği ve 157,3 milyar dolar ekonomik zararın olduğu rapor edilmiştir (Guha-Sapir vd., 2013).

Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (CRED) tarafından 1988 yılından itibaren yönetilen ve 1900 yılından günümüze kadar dünya genelinde meydana gelen 20.000'den fazla afet ile ilgili bilgilerin tutulduğu Uluslararası Afet Veritabanı (EM-DAT), afetleri "doğal ve teknolojik afetler" olmak üzere iki temel gruba ayırmaktadır. Doğal afetler, 5 alt grupta 12 afet tipini içermektedir. Bu sınıflandırmadan hareketle doğal afetler, genel olarak, "önceden tahmin edilemeyen ve oluşumu engellenemeyen biyolojik, meteorolojik, hidrolojik, iklimsel ve jeofiziksel kökenli olayların sonuçları" şeklinde tanımlanabilir. Depremler, taşkınlar ve kasırgalarla birlikte tüm Dünya'da en sık görülen doğal afetlerden biri de heyelanlardır. Heyelan, bir yamacı oluşturan doğal kaya, toprak veya yapay

dolgu malzemenin ya da bunların kombinasyonundan oluşan malzemelerin aşağı ya da dışa doğru hareket etmesi ve yer değiştirmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Varnes, 1958). Heyelanlar, çoğu zaman, can kaybı, ekonomik zararlar, çevresel etkiler, kültürel ve doğal miras kaybı gibi büyük ölçekli sosyo-ekonomik yıkımlara neden olurlar. Örneğin, 2 Mayıs 2014 tarihinde Afganistan'ın kuzeydoğusundaki Badahşan vilayetinde aşırı yağışların neden olduğu heyelan sonucunda 256 kişi yaşamını yitirmiş ve 300 konut hasar görmüştür (IFRC, 2014). Ülkemizde de en sık gerçekleşen doğal afetin heyelan olduğu ve tüm illerimizin heyelandan belirli derecelerde etkilendiği görülmektedir (Gökçe vd., 2008). Heyelanların yıkıcı etkisi Ülkemizde kendisini son olarak 26 Ağustos 2010 tarihinde göstermiş ve Rize'nin Gündoğdu beldesinde sağanak yağışların neden olduğu heyelanda 13 kişi yaşamını yitirmiştir.

Samsun, Türkiye'de heyelanların sıkça yaşandığı illerden biridir. Heyelanlar nedeniyle Samsun il merkezine yönelik olarak yapılan hasar dağılımı ve mikro bölgelendirme çalışmasında il merkezi, yapılaşmanın sakıncalı olduğu (mevcut yapıların boşatılması gereken) alanlar, yeni yapılaşmanın sakıncalı olduğu (mevcut yapıların dondurulacağı) alanlar ve belirli koşullarla yeni yapılaşmaya izin verilecek alanlar olmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır (Doyuran vd., 1985). Buna rağmen, il genelindeki yapılaşma ağırlıklı olarak heyelanların görüldüğü Atakum ilçesinin güney sırtları üzerinde gelişmiştir. Heyelanların ülkemizde can ve mal kayıplarına neden olan en önemli doğal afetlerin başında geldiği dikkate alındığında, olası can ve mal kayıplarının önüne geçmek için Samsun ili Atakum ilçesindeki heyelanların bir kez daha değerlendirilmesi kaçınılmaz olmuştur.

Heyelanların sebep olduğu sosyal ve ekonomik kayıplar etkili bir planlama ve yönetimle azaltılabilmektedir. Bunun için, yerleşim alanlarının seçimi, alt yapı çalışmaları ve diğer mühendislik yapılarının inşasında jeolojik ve jeoteknik amaçlı arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılarak, çeşitli bilgileri içeren farklı türde haritalar hazırlanmaktadır. Bu çerçevede hazırlanan jeolojik tabanlı en önemli haritalardan biri de heyelan duyarlılık haritalarıdır (Yalçın, 2007a). Heyelan duyarlılık haritaları, gelecekte olabilecek heyelanlara karşı duyarlı alanları ortaya koyarlar ve herhangi bir alanın heyelan oluşumuna karşı eğilimini ifade ederler (Dağdelenler, 2013).

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan yöntem ve parametrelerin değerlendirildiği çalışmalarda (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001; Dağ vd., 2011), bölgesel özelliklerden dolayı araştırmacıların heyelan duyarlılık analizlerinde farklı parametreler kullanmasına rağmen eğim, bakı, litoloji ve arazi örtüsünün sıkça kullanılan parametrelerden olduğu belirlenmiştir. Parametre seçiminde, bölgesel özelliklerin yanı sıra kullanılacak parametre ile ilgili veri setinin temin edilip edilemediğinin de etkili olduğu bilinen bir gerçektir. Bu çalışmada, litoloji, yükseklik, eğim, bakı, eğrilik (plan ve profil eğrilikleri) ve arazi örtüsü parametreleri kullanılmıştır. Literatürde, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması sırasında kullanılan yöntemler ve parametreler konusunda araştırmacılar arasında henüz bir görüş birliğinin oluşmadığı ve her araştırmacının çalıştığı sahaya ilişkin parametreleri dikkate alması nedeniyle çok sayıda parametre ve yöntemin kullanıldığı ifade edilmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001; Dağ vd., 2011). Dağ vd. (2011), özellikle son 20 yıllık döneme ait literatürde ulaşılabilen 118 adet çalışmayı incelemiş ve heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında, çoğunlukla istatistiksel yöntemlerin kullanıldığına ve bu yöntemlerle hazırlanan haritaların oranının %64 olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada da, literatürde yaygın olarak kullanılıyor olması, basit ve anlaşılır bir matematik modeline sahip olması, doğru sonuçlar sağlaması ve uygulamasının kolay olmaları nedeniyle frekans oranı metodu kullanılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Atakum ilçesi, Samsun Büyükşehir Belediyesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Doğusunda İlkadım, batısında 19 Mayıs, güneyinde ise Kavak ve Bafra ilçeleri ile komşudur. Kuzeyi ise Karadeniz'le çevrilidir. İlçe, şehir merkezinin batısından 5 km mesafedeki Kürtün deresinden başlayıp, sahil

boyunca 20 km batıya kadar uzanır. Samsun'un diğer yerleşim bölgelerine göre daha düz bir alana yayılan ilçenin nüfusu hızlı artış göstermektedir. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre ilçenin 2014 yılı nüfusu 158.031'dir. Çalışma alanı, 41^{o} 13' 34" ve 41^{o} 26' 46" kuzey paralelleri ile 35^{o} 58' 48" ve 36^{o} 18' 52" doğu boylamları arasında kalan 354 km^{2}'lik alanı kapsamaktadır.

2.2. Çalışma Alanının Genel Jeolojisi

Çalışma alanında 7 farklı formasyon izlenmektedir. MTA tarafından yapılan çalışmalara göre Atakum ilçesinde, yaşlıdan gence doğru şu birimler gözlenmektedir (Öztekeşin, 2008).

Cankurtaran Formasyonu (Kc)**:** Formasyon tüf, tüfit, kumlu kireçtaşı ve marn araseviyeli kumtaşı-şeyl ardalanmasından oluşmaktadır. Formasyon KAF ile Erikli Fayı arasında yer alan kıvrımlar eksen ve kanatlarında; yaklaşık 1500 km²'lik bir alanda yüzeylenmektedir. Birim genelde kumtaşı-şeyl ardalanması şeklindedir. İçinde tüf, tüfit, kumlu kireçtaşı ve marn seviyeleri de gözlenmektedir. Alt ve orta seviyelerde tüf ve tüfit bantları üst seviyelerde azalmaktadır. Orta seviyelerde kumlu kireçtaşı seviyeleri gözlenmeye başlanır. Üst seviyelerde karbonat oranı artarak birim kumlu kireçtaşı, kireçtaşı ve marn ardalanmasıyla dereceli olarak Akveren formasyonuna geçilmektedir.

Akveren Formasyonu (Kta)**:** Formasyon alt seviyelerde kumtaşı, kumlu kireçtaşı, marn ve şeyl ardalanması şeklindedir. Orta seviyelerde kumtaşı, üst seviyelerde kumlu kireçtaşı oranının azalması ile istif kireçtaşı-marn ardalanmalı olarak devam etmektedir. Birimin üst seviyelerinde çört arabantları ve çört yumrulu kireçtaşları ile kırmızı-şarabi renkli marn ardalanması gözlenmektedir. Birim altında bulunan Cankurtaran formasyonu ile dikey geçişlidir.

Atbaşı Formasyonu (Ta)**:** Birim ince-orta tabakalı, bej renkli kireçtaşı, kırmızı renkli kumtaşı ve marn ardalanması ile başlar. Birimin orta seviyeleri kırmızı-bordo renkli ince tabakalı kumtaşı ve kalın-çok kalın tabakalı marn ardalanmasından oluşmaktadır. Üst seviyeler boz renkli, ince tabakalı kumtaşı ve orta tabakalı marn ardalanması ile Kusuri formasyonuna geçmektedir.

Kusuri Formasyonu (Tk)**:** Formasyon ince-orta tabakalı, boz-sarı renkli kumtaşı, kireçli kumtaşı ile bej-krem renkli kireçtaşı aratabakalı marn istifinden oluşmaktadır. Kumtaşı ve kumlu kireçtaşları genelde tabaka içyapıları ile çizilme izi türünden taban yapıları içermektedir. Birimin marn oranı %70-80 dolayındadır. Formasyon Atbaşı formasyonu üzerinde uyumlu ve dikey geçişli olarak yer almaktadır. Birimin üzerine Erikli Fayı ile Cankurtaran ve Akveren formasyonları tektonik olarak, Tekkeköy formasyonu uyumlu ve dikey geçişli olarak gelmektedir.

Tekkeköy Formasyonu (Tt)**:** Formasyon tabanda kumtaşı, marn ve tüfit ardalanması ile bazalt ve aglomeralardan oluşmaktadır. Formasyon tabanda ince tabakalı kumtaşı, marn ve kalın tabakalı tüfit şeklindedir. Birimin 200m seviyesinde, kalınlıkları 20-25m olan iki tüfit tabakası yer almaktadır. Bu istif üst seviyelere doğru bazalt, aglomera ve tüf şeklinde devam etmektedir. Aglomeralar, tüf bir matriks içerisinde andezit, bazalt, dasit, çakıl ve bloklardan meydana gelmiştir.

Mahmurdağı Volkanitleri (Tmv)**:** Bazalt, andezit, tüf, aglomera ile bazaltik batolit, dayk ve sillerden oluşmaktadır. Dağınık yüzeylemeler şeklinde gözlenmektedir. Mahmurdağ'da bazaltlar tipik olarak yüzeylenmektedir. Bazaltlar, koyu siyah ve gri renkli, porfirik dokuludur. Ojit, olivin, lösit ve plajiyoklas fenokristalleri ve bunları bağlayan bir hamur maddesinden oluşmaktadır. Mahmurdağı volkanitlerini oluşturan bazaltlar batolit, dayk ve siller şeklinde diğer formasyonları kesmiş ve aralarına yerleşmişlerdir.

Eski Alüvyon (Qe)**:** Atakum sahil düzlüğü ve Kürtün ırmağı çökelleridir. Atakum sahil düzlüğünde kum, silt, kötü derecelenmiş denizel kavkılı kumlar ve Kürtün ırmağı boyunca çakıl, kum ve siltlerden oluşmuştur.

2.3. Çalışma Yöntemi

Çalışma alanının heyelan duyarlılık haritasını üretmek için ihtiyaç duyulan topoğrafik parametrelere ait veriler, 1/25.000 ölçekli standart topoğrafik haritalardan üretilmiştir. Topoğrafik haritalardaki eşyükseklik eğrileri kullanılarak ArcGIS 10.0 yazılımında çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretilmiştir. Üretilen SYM, 10x10m hücre boyutuna sahip ESRI GRID formatına dönüştürüldükten sonra çalışma alanının sırasıyla yükseklik, eğim, bakı ve eğrilik haritaları üretilmiştir. Çalışma alanının arazi örtüsü verisi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan sayısal formatta temin edilmiştir. MTA Genel Müdürlüğünden temin edilen 1/25.000 ölçekli sayısal heyelan envanter haritası ve jeoloji haritası, ESRI GRID formatına dönüştürüldükten sonra duyarlılık haritasının üretilmesine geçilmiştir. Elde edilen haritalar, sırasıyla heyelan envanter haritası ile değerlendirilmiş ve her bir katmanın alt gruplarının heyelanlarla olan ilişkileri tespit edilmiştir. Bu veriler yardımıyla, çalışma alanının heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir.

2.4. Verilerin Temini ve Hazırlanması

Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinin ilk adımı, geçmişte meydana gelen heyelanlar hakkında bilgi edinmektir. Çünkü gelecekteki heyelanların şimdiki ve geçmişte olmuş heyelanlarla benzer şartlar altında gerçekleşebileceği varsayılmaktadır (Yalçın, 2007a; Erener ve Düzgün, 2007; Reis vd., 2009; Kumtepe vd., 2009). Bu nedenle, heyelan duyarlık çalışmalarında ihtiyaç duyulan en önemli verilerin başında, "heyelan envanter haritaları" gelmektedir. Heyelan envanter haritaları, arazideki mevcut heyelan alanlarının alansal dağılım ve özelliklerinin gösterildiği haritalardır. Bu haritalar, arazide fark edilebilir heyelanları göstermektedir (Çevik ve Topal, 2003; Yalçın, 2007a; Reis vd., 2009). Bu çalışmada, MTA Genel Müdürlüğü tarafından üretilen 1/25.000 ölçekli sayısal heyelan envanter haritaları kullanılmıştır.

Litoloji, heyelan oluşumunu etkileyen önemli parametrelerden bir tanesidir (Kumtepe vd., 2009) ve heyelan duyarlılık çalışmalarında önemli rol oynar. Çünkü farklı litolojik birimler, heyelanlar gibi aktif jeomorfolojik süreçler için farklı duyarlıklara sahiptir. Jeomorfolojik süreçler, kısmen litolojiye ve litolojiyi oluşturan temel malzemelerin ayrışma özelliklerine bağlıdır (Çevik ve Topal, 2003). Çalışma alanındaki litolojik birimler, MTA Genel Müdürlüğü tarafından üretilen 1/25.000 ölçekli jeoloji haritalarından elde edilmiştir.

Heyelan duyarlılık analizlerinin en önemli parametrelerinden biri eğim açısı birçok çalışmada kullanılmaktadır. Daha önceki çalışmalar ve arazi gözlemleri eğimin artmasıyla heyelana karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir (Yalçın, 2007a). Bu nedenle, ArcGIS 10.0 CBS yazılımında eşyükseklik eğrileri kullanılarak çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretilmiştir. Üretilen SYM, 10m x 10m hücre boyutlu ESRI GRID formatına dönüştürülmüş ve çalışma alanının eğim haritası üretilmiştir. 5^o aralıklarla yeniden sınıflandırılan eğim haritası, heyelan envanter haritası ile çakıştırılarak her bir eğim grubuna karşılık gelen heyelanların yüzde olarak dağılımları tespit edilmiştir (Çizelge 2). Çalışma alanındaki maksimum eğimin 89 derece olduğu ve eğim değerlerine göre en fazla heyelanın %33,35'lik oranla 5-10^o eğim grubunda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında eğim gibi bakı da önemli faktörlerdendir (Çevik ve Topal, 2003; Ercanoğlu vd., 2004). Çalışmada bakı ile heyelanlar arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla SYM'den çalışma alanının bakı haritası üretilmiştir. Bakı haritası, dokuz sınıfa ayrılmış ve her bir bakı grubundaki heyelan varlığı yüzdesi hesaplanmıştır (Çizelge 2). Çalışma alanındaki heyelanların %22,23'ünün güneydoğu, %17,93'ünün doğu ve %17,19'unun kuzeydoğu bakıya sahip yamaçlarda gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Heyelan duyarlılık çalışmalarında sıkça kullanılan bir diğer parametrede yüksekliktir (Çevik ve Topal, 2003; Ercanoğlu vd., 2004). Çalışma alanında yükseklikler 0–1300 m arasında değişmektedir. Yükseklik değerleri 100 m aralıklarla 9 kategoriye ayrılmış ve heyelan-yükseklik ilişkisi tespit

edilmiştir. Alandaki heyelanların, en çok %24'lük oranla 100-200 m yükseklik değerlerine sahip alanlarda meydana geldiği tespit edilmiştir (Çizelge 2). Eğrilik değerleri topoğrafyanın morfolojik yapısını göstermektedir (Erener ve Düzgün, 2010). Plan eğriliği topoğrafik konverjans (akışın toplandığı) ve diverjans (akışın dağıldığı) alanlarını ortaya koyarak yüzeyde akış halindeki suyun hangi noktalarda birleşeceği yönündeki eğilimi ifade eder. Negatif değerli plan eğriliği akışın toplandığını, pozitif değerler dağıldığını belirtir. Bu değerlerden akarsu ve sırtlar çıkarılabilir. Profil eğriliği ise suyun yüzeydeki akış hızı ve çökellerin yamaç boyunca taşınımı ve böylece gelişen erozyonu, eğim değişim oranını ifade ederek ortaya koyar. Profil bileşeni negatif ise konkav-içbükey (çukur), pozitif değerler ise konveks-dışbükey (tepe) yapıyı gösterir (Kılıç ve Gökaşan, 2009). Çalışma alanının plan ve profil eğrilik haritaları SYM'den üretilmiştir. Eğrilik haritaları, heyelan envanter haritası ile çakıştırılarak çalışma alanındaki eğrilik-heyelan ilişkisi belirlenmiştir (Çizelge1).

Arazi örtüsü, yamaçların stabilite halinde olduğunun dolaylı bir ifadesidir. Kıraç ve nadir arazi örtüsü ile kaplı alanlar daha hızlı erozyon ve ormanlara göre daha büyük duraysızlıklar göstermektedir. Bazı araştırmalarda (Yalçın, 2007b; Reis vd., 2009) yamaç duyarlılığında arazi örtüsünün çok önemli yer tuttuğu ortaya konulmuştur. Bu nedenle projede, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan temin edilen CORINE2006 arazi örtüsü verisi kullanılmıştır.

2.5. Frekans Oranı Yöntemi Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi

Frekans oranı yöntemi, geçmiş heyelan konumları ile heyelanı etkileyen her bir faktörün korelasyonunu araştırmak için kullanılmaktadır (Erener ve Düzgün, 2010). Bu nedenle, heyelanı etkileyen her bir faktör alt kategorilere ayrılır ve her bir faktörün her bir alt kategorisindeki frekans oranı hesaplanır (Erener ve Lacasse, 2007). Frekans oranları hesabı için Eş.1'deki formül kullanılmaktadır.

$$FR = HVY / AKY \quad (1)$$

Burada, HVY heyelanı etkileyen bir faktörün her bir alt kategorisindeki "heyelan varlığının yüzdesi", AKY ise heyelanı etkileyen bir faktörün her bir "alt kategorisinin yüzdesi"dir. Frekans oranı hesap tablosunda HVY, A/B ve AKY ise C/D şeklinde hesaplanır. Burada, A her bir alt kategorideki heyelanlı hücre sayısını, B çalışma alanındaki toplam heyelanlı hücre sayısını, C her bir alt kategorideki toplam hücre sayısını, D ise çalışma alanındaki toplam hücre sayısını ifade etmektedir. Hesaplanan frekans oranı değerlerinden 1'den büyük olanlar yüksek korelasyonu, 1'den düşük olanlar ise düşük korelasyonu göstermektedir. Frekans oranı yöntemi ile duyarlılık haritalarının üretilmesinde, heyelanı etkileyen her bir faktörün alt kategorileri için hesaplanan frekans oranları dikkate alınmaktadır (Erener ve Düzgün, 2007; Erener ve Lacasse, 2007; Reis vd., 2009). Her bir kategori için hesaplanan frekans oranları, ArcGIS 10.0 yazılımında ilgili katmana atanmış, daha sonra tüm katmanlar üst üste çakıştırılarak heyelan duyarlılık indeksi (LSI) bulunmuştur. Heyelan duyarlılık indeksi 2.88–13.53 aralığında değişmektedir. Toplam frekans değeri daha sonra "çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek derecede duyarlı" alanları belirlemek amacıyla 5 sınıfa ayrılmış ve Şekil 2'de gösterilen duyarlılık haritası elde edilmiştir.

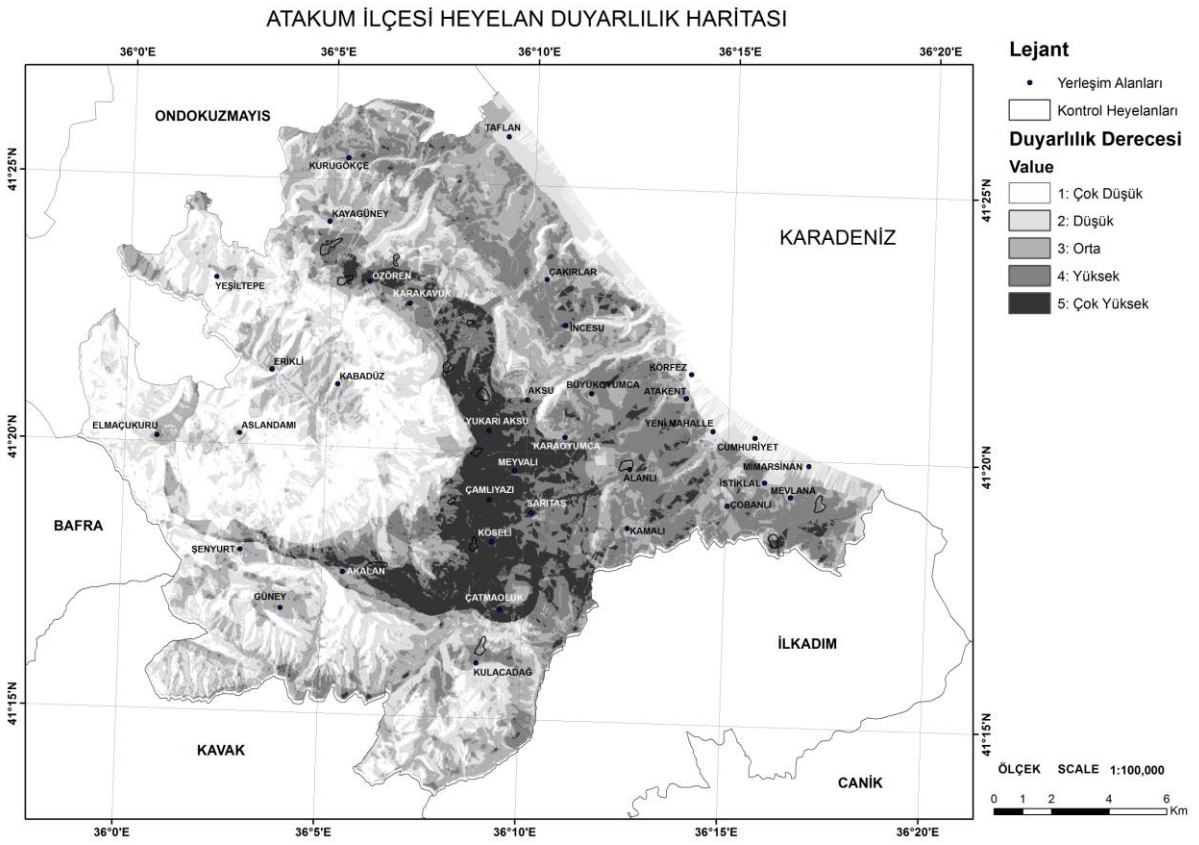
Çizelge 1. Plan ve profil eğriliği parametrelerinin frekans oranları

Parametre	Alt Kategori	Heyelanlı Piksel Sayısı	Heyelan Varlığı Yüzdesi	Kategorideki Piksel Sayısı	Kategori Yüzdesi	Frekans Oranı
Plan Eğriliği	İçbükey	25399	39.35	1364596	38.49	1.022
	Düz	11720	18.16	567387	16.00	1.135
	Dışbükey	27421	42.49	1613359	45.51	0.934
Profil Eğriliği	İçbükey	28502	44.16	1600364	45.14	0.978
	Düz	8216	12.73	436803	12.32	1.033
	Dışbükey	27822	43.11	1508175	42.54	1.013

* Toplam heyelanlı piksel sayısı A = 64540 ve çalışma alanındaki toplam piksel sayısı D = 3545342.

Çizelge 2. Heyelanı etkileyen diğer parametrelerin frekans oranları

Parametre	Alt Kategori	Heyelanlı Piksel Sayısı	Heyelan Varlığı Yüzdesi	Kategorideki Piksel Sayısı	Kategori Yüzdesi	Frekans Oranı
Litoloji	Qe	2065	3.20	215986	6.09	0.525
	Tmv	0	0.00	3445	0.10	0.000
	Tt	27122	42.02	2044721	57.67	0.729
	Tk	23131	35.84	503578	14.20	2.523
	Ta	3488	5.40	55547	1.57	3.449
	Kta	8734	13.53	664426	18.74	0.722
	Kc	0	0.00	57639	1.63	0.000
Yükseklik (m)	0-100	6342	9.83	430841	12.15	0.809
	100-200	15515	24.04	458773	12.94	1.858
	200-300	5289	8.19	394790	11.14	0.736
	300-400	11245	17.42	329543	9.30	1.874
	400-500	14533	22.52	351993	9.93	2.268
	500-600	4554	7.06	333078	9.39	0.751
	600-700	1948	3.02	312594	8.82	0.342
	700-800	2414	3.74	288602	8.14	0.459
	800-900	2700	4.18	240238	6.78	0.617
	900-1300	0	0.00	404890	11.42	0.000
Eğim (Derece)	0-5^o	10615	16.45	639632	18.04	0.912
	5-10^o	21527	33.35	544571	15.36	2.171
	10-15^o	13506	20.93	528376	14.90	1.404
	15-20^o	8120	12.58	548466	15.47	0.813
	20-25^o	5382	8.34	554815	15.65	0.533
	25-30^o	2729	4.23	429705	12.12	0.349
	30-35^o	1193	1.85	191857	5.41	0.342
	35-40^o	413	0.64	53244	1.50	0.426
	40-45^o	96	0.15	11063	0.31	0.477
	> 45^o	959	1.49	43613	1.23	1.208
Bakı	Düz	4727	7.32	263462	7.43	0.986
	Kuzey	7800	12.09	458910	12.94	0.934
	Kuzeydoğu	11094	17.19	535012	15.09	1.139
	Doğu	11570	17.93	501859	14.16	1.266
	Güneydoğu	14345	22.23	434684	12.26	1.813
	Güney	10346	16.03	380447	10.73	1.494
	Güneybatı	1899	2.94	379753	10.71	0.275
	Batı	548	0.85	262758	7.41	0.115
	Kuzeybatı	2211	3.43	328457	9.26	0.370
Arazi Örtüsü	Yapay Bölgeler	1928	2.99	171721	4.84	0.617
	Mera	361	0.56	8472	0.24	2.341
	Tarım	51782	80.23	1709956	48.23	1.664
	Orman	8946	13.86	1549336	43.70	0.317
	Yarı Doğal Alan	1523	2.36	105857	2.99	0.790



Şekil 2. Frekans oranı yöntemine göre üretilen heyelan duyarlılık haritası

3. BULGULAR

Kütle hareketlerini oluşturan etkenler genel olarak, zemin koşulları, jeomorfolojik süreçler, fiziksel süreçler ve insan etkileri olmak üzere 4 grupta toplanmaktadır. Yapılan değerlendirmelerde, Atakum ilçesindeki kütle hareketlerinin zemin koşullarından ve insan etkilerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışma alanındaki heyelanların insan etkilerinden kaynaklandığını gösteren en önemli bulgu arazi örtüsü-heyelan ilişkisi incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Arazi örtüsü verilerine göre Atakum ilçesindeki heyelanların %80'inin tarımsal alanlarda meydana geldiği tespit edilmiştir (Çizelge 2). Yamaçlarda teraslamanın ardından doğal bitki örtüsünün kaldırılması, araziyi ekime hazır hale getirmek için bitki örtüsünün yakılması, ormansızlaştırma ve tarımsal amaçlar için toprağın sürekli sulanması gibi uygun olmayan aktiviteler, heyelanlara neden olan insan faaliyetleri arasında yer almaktadır. Diğer taraftan, alandaki heyelanların %42,02'sinin Tekkeköy Formasyonu, %35,84'ünün ise Kusuri Formasyonu içerisindeki sahalarda yer aldığı görülmektedir (Çizelge 2). Bu iki formasyondaki heyelanlar, alandaki toplam heyelanlı alanların %77,86'sını oluşturmaktadır. Bu nedenle, Atakum ilçesindeki kütle hareketlerinde litolojik özelliklerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, frekans oranı yöntemi kullanılarak Samsun ili Atakum ilçesinin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Uygulamada, heyelanı etkileyen 7 farklı faktör dikkate alınmıştır. Üretilen duyarlılık haritası, "çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek derecede duyarlı" alanlar olmak üzere 5 şekilde sınıflandırılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritasının güvenilirliğini test etmek için heyelan envanter haritasında yer alan ve kontrol amacıyla analizlere dahil edilmeyen heyelan alanları duyarlılık haritası ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, kontrol heyelanlarının %38,48'inin çok yüksek derecede, %46,50'sinin yüksek derecede, %13,60'ının orta derecede ve

%1,42'sinin düşük derecede duyarlı bölgede kaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, üretilen heyelan duyarlılık haritasının kontrol heyelanları ile çok yüksek ve yüksek derecede duyarlı bölgeler bazında toplamda %84,99 oranında uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). Environmental Geology, 44, 949-962.

Dağ, S., Bulut, F., Alemdağ, S., Kaya, A., 2011. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan yöntem ve parametrelere ilişkin genel bir değerlendirme, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1(2), 151-176.

Dağdelenler, G., 2013. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde örneklem ve doğrulama stratejilerinin değerlendirilmesi (Gelibolu Yarımadası'nın doğu kesimi). Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Doyuran, V., Lünel, T., Altıner, D., Koçyiğit, A., 1985. Samsun yerleşim sahası mikro bölgelendirme çalışmaları. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 28, 93-103.

Ercanoğlu, M., Gökçeoğlu, C., Van Asch, T.W.J., 2004. Landslide Susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. Natural Hazards, 32, 1–23.

Erener, A., Düzgün, H.S.B., 2007. Heyelan analizlerinde coğrafi ağırlıklandırılmış regresyon (CAR) metodu. 11. Türkiye Bilimsel Harita ve Teknik Kurultayı, Ankara.

Erener, A., Lacasse, S., 2007. Heyelan duyarlılık haritalamasında CBS kullanımı. Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, KTÜ, Trabzon.

Erener, A., Düzgün, H.S.B. 2010. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). Landslides, 7(1), 55-68.

Gökçe, O., Özden, S., Demir, A., 2008. Türkiye'de Afetlerin mekânsal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri. Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı, Ankara.

Gökçeoğlu, C., Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 23(2001), 189-206.

Guha-Sapir, D., Hoyois, Ph., Below, R., 2013. Annual disaster statistical review 2012: the numbers and trends. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium.

IFRC, 2014. Afghanistan: floods and landslide. IFRC Information Bulletin, http://www.ifrc.org/docs/Appeals/rpts14/IBafgFFLSn2-080514.pdf.

Kılıç, F., Gökaşan, E., 2009. Yeryüzü şekillerinin SYM ile CBS ortamında değerlendirilmesi (ders notu), http://www.yildiz.edu.tr/~fkilic/CBSYeryuzuV4.pdf.

Kumtepe, P., Nurlu, Y., Cengiz, T., Sütçü, E., 2009. Bolu çevresinin heyelan duyarlılık analizi. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, İzmir.

Öztekeşin, K., 2008. Samsun kenti (büyükşehir belediyesi) içmesuyu potansiyeli. TMMOB Samsun Kent Sempozyumu, Samsun.

Reis, S., Yalçın, A., Atasoy, M., Nişancı, R., Bayrak, T., Sancar, C., Ekercin, S., 2009. CBS ve uzaktan algılama teknikleri ile heyelan duyarlılık haritalarının üretimi: Rize ili örneği. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği V. Teknik Sempozyumu, Ankara.

Varnes, D.J., 1958. Landslide types and processes in Eckel. Landslides and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report 29, NAS-NRC Publication 544, Washington, D.C.

Vos, F., Rodriguez, J., Below, R., Guha-Sapir, D., 2010. Annual disaster statistical review 2009: the numbers and trends, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université catholique de Louvain, Brussels, Belgium.

Yalçın, A., 2007b. Environmental impacts of landslides: A case study from eastern black sea region, Turkey. Environmental Engineering Science, 24(6), 821-833.

Yalçın, A., 2007a. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde analitik hiyerarşi yönteminin ve CBS'nin kullanımı. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(3), 1-14.

Beylerli Göleti (Çardak-Denizli) Dolusavak Heyelanının Oluşum Mekanizması ve Nedenlerinin İncelenmesi

Investigation of Reasons and Mechanisms of the Beylerli Dam (Çardak-Denizli) Spillway Landslide

H. Kumsar[1,*], Ö. Aydan[2], R. Z.Acar[1], Ş. Tahracı[1], S. Subaşı[1], O. Genç[1]

[1] *Pamukkale Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı, Denizli*
[2] *Department of Civil Eng. and Architecture, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa, Japan*
*(*hkumsar@pau.edu.tr)*

ÖZ: Denizli ili Çardak ilçesinin güney doğusunda yer alan ve inşaatı 2006 yılında tamamlanan Beylerli göletinin sol sahil yamacında farklı derecelerde bozunmuş şist, bazalt, diyabaz, serpantin ve radyolaritleri içeren melanj birimi ve bu birimin blok ve kırıntılarından oluşan yamaç molozu birimi yayılım gösterir. Yamaç içerisinde su çıkışlarının olması melanj birimindeki bozunma derecesinin artmasında etkili olmuştur. Bu yamaç içinde bir adet fosil heyelan ile 2004 ve 2009 yıllarında meydana gelen heyelan alanları mevcuttur.Bu çalışma kapsamında 2009 tarihinde meydana gelen ve göletin dolusavak yapısına zarar veren heyelanın oluşum mekanizması ve nedenleri incelenmiştir.Arazi çalışmalarında yamaçta yayılım gösteren bozunmuş melanj birimi içinde dairesel kayma ile bu kütlenin taç kısmındaki yamaçta kama türü kaymanın meydana geldiği belirlenmiştir.Arazide dairesel kaymanın içinde geliştiği bozunmuş melanj biriminden örselenmemiş örnekler alınarak farklı su içeriklerinde konsolidasyonlu ve drenajlı koşullarda doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır.Heyelan öncesi topoğrafik harita verilerinden alınan kesit üzerinde dairesel kayma yüzeyi tanımlanmış ve SLOPAC2D programı kullanılarak yamaç kütlesinin duraylılığı limit denge yöntemleri ile incelenmiştir.Yamaç içerisinde su çıkışlarının olmasından dolayı, yamacın duraylılığı farklı gözenek suyu basıncı katsayıları (r_u) için hesaplanmış ve r_u değerinin 0.26-0.3 arasında olması durumunda yamacın duraylılığını kaybettiği belirlenmiştir. Kama türü kayma, normal fay yüzeyi ile doğrultu atımlı fay yüzeyinin kesiştiği ve dalım açısı 45.8^o olan arakesit boyunca yamaç molozunun kayması sonucu meydana gelmiştir.

Anahtar kelimeler: Beylerli Göleti, Heyelan, Duraylılık Analizi, Dairesel Kayma, Kama Türü Kayma

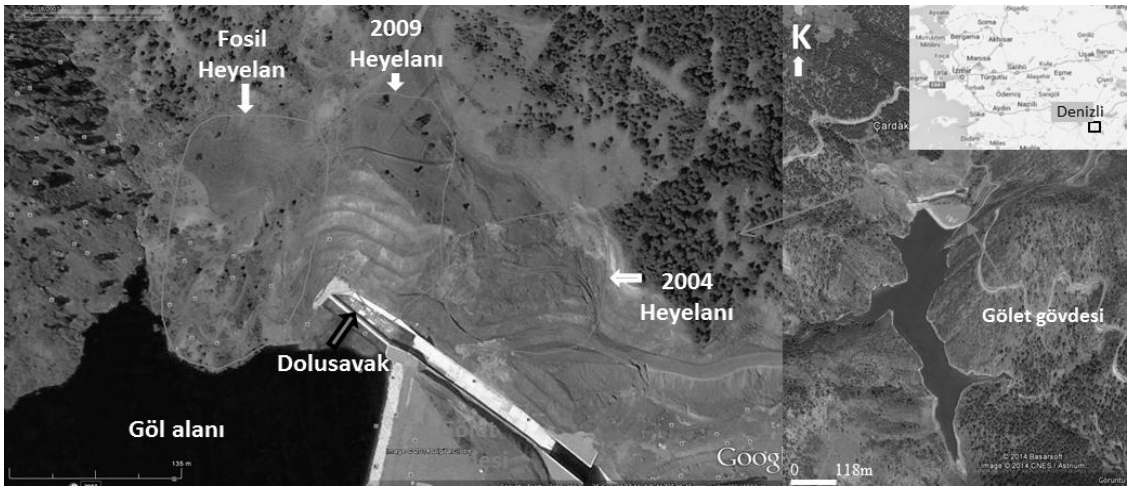
ABSTRACT: *Beylerli Dam, located in southeast of Çardak district in Denizli, was constructed in 2006. Melange formation, which is made up of weathered schist, basalt, serpentine, radiolarite, and talus frormation, that contains particles and blocks of melange, outcrop in the left abutment area of the dam. Discharge of groundwater through the slope affected alteration degree of melange. There are one fossil landslide and two landslides that occurred in 2004 and 2009 respectively. This study covers the investigation of the reasons and mechanism of the landslide that damaged the spillway of the dam in 2009. A circular slope failure took place within weathered melange, and a wedge type of failure occurred at the crown part of the circular failure in the slope that were observed during field investigation. Undisturbed samples were taken from the weathered melange in which circular failure surface took place. Direct shear tests of the samples were carried out under drained and consolidated conditions. A cross-section was drawn by using topographical map of the area before the slope failure, a circular failure surface was defined on the cross-section, and stability of the slope was assessed by using limiting equilibrium methods available on SLOPAC2D computer program. As there is groundwater discharge through slope, the stability assessment of the slope was carried out by considering different values of pore water pressure ratio (r_u), and it was found that slope mass on circular failure surface becomes unstable when r_u value is between 0.26-0.3. Talus formation failed on a wedge surface that was formed by intersecting of a normal fault and a strike slip fault surfaces having 45.8^o intersection angle.*

Keywords: *Beylerli Dam, Landslide, Stability Analysis, Circular Failure, Wedge Failure*

1. GİRİŞ

Baraj ve gölet yapılarında yamaç ve şev duraylılığı çalışmaları mühendislik projesinin sürdürülebilir olmasında önemli rol oynar. Özellikle baraj ekseni, dolusavak, elektrik üretim santrali, tünel ve galeri giriş ağızları, sulama kanalları, göl alanındaki yamaçlarda duraylılık analizlerinin yapılması ve kaymayı önleyecek mühendislik önlemlerinin alınması baraj güvenliği açısından gereklidir.

Beylerli göleti Denizli'nin 50 km doğusunda Değirmendere çayı üzerinde kil çekirdekli zonlu toprak dolgu gövde tipinde 2006 yılında inşaatı tamamlanmıştır. Baraj yüksekliği temelden 52m olup sulama ve taşkın önleme amaçlı yapılmıştır. Dolusavak boşaltım kanalı sol sahilde karşıdan alışlı olarak inşa edilmiştir. Dolusavak yapısının sol yamacında palyeli şev kazıları yapıldıktan sonra 2004 yılında kütle hareketi meydana gelmiş ve DSİ tarafından mühendislik jeolojisi incelemesi ve bu çalışma sonuçlarına göre şev düzenlemesi yapılmıştır. 2009 yılında önceki heyelan alanının güney sınırında dolusavak yapısının doğu yamacında meydana gelen duraysızlık sonucunda heyelan kütlesi yamaç eğimi yönünde hareket ederek dolusavak boşaltım kanalını tehdit etmiştir (Şekil 1). 2014 yılında bu heyelan kütlesi daha fazla hareket ederek dolusavak boşaltım kanalını tamamen doldurmuş ve göl alanında biriken fazla suyun dolusavaktan tahliye edilmesi mümkün olmamış, bu da göletin güvenliğini tehdit etmiştir. Kayahan ve Kiremitçioğlu (2009)tarafından yapılan çalışmada heyelan alanında palyeli kazı yapılması ve yamaçta boşalım gösteren yeraltısuyunun tahliye edilmesi önerilmiştir.



Şekil 1. Beylerli gölet yeri ve dolusavak yapısını etkileyen heyelan alanlarının uydu görüntüsü üzerindeki dağılımı (Google, 2014).

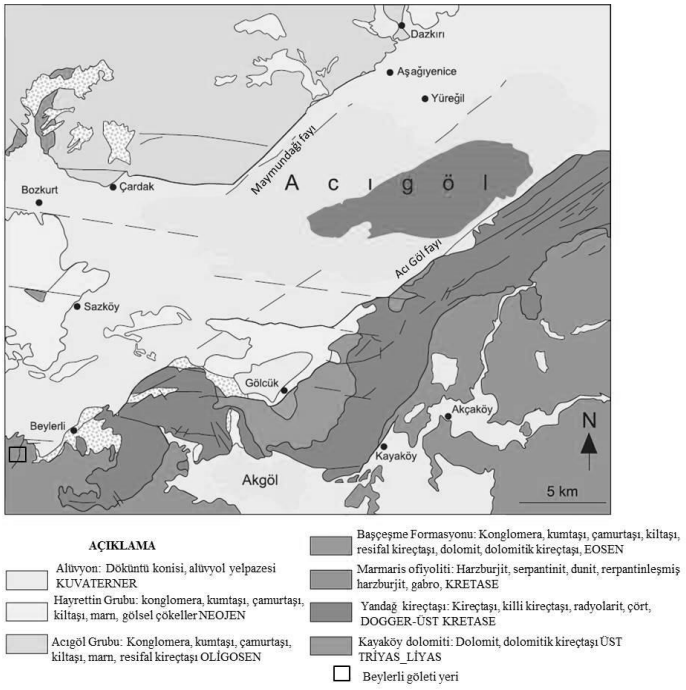
Bu çalışmada, Beylerli göleti dolusavak heyelanının oluşum mekanizması ve oluşum nedenleri incelenmiştir. Bu amaçla arazide jeolojik ve jeoteknik çalışmalar yapılmış, heyelanın kayma yüzeyinden alınan örselenmemiş örneklerin farklı su içeriklerinde doğrudan makaslama deneyleri yapılmış ve kayan kütlenin makaslama direncindeki değişimlerin su içeriği ile olan ilişkileri ortaya konmuştur. Elde edilen makaslama dayanımı parametreleri kullanılarak kil, bozunmuş serpantin ve radyolaritten oluşan yamacın duraylılık analizleri yapılmıştır. Yamacın üst kesiminde doğrultu atımlı ve normal fay yüzeylerinin kesişmesi ile oluşan kama türü kayma yüzeyi üzerinde yer alan yamaç moluzunun da duraylılığı incelenmiştir.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanı Acı Göl havzasının güneydoğu ucunda Çardak grabeni ve onun güney kanadı ile Güneybatı Torosların arasında kalmaktadır. Çalışma alanı ve yakın çevresinde Marmaris ofiyolit napı

olarak tanımlanan harzburjit, serpaninit, dünit, serpantinleşmiş harzburjit, peridotit, gabro, bazalt ve diyorit, yer yer kireçtaşı, radyolarit ve şist blokları içeren melanj (karmaşık) yayılım göstermektedir (Şenel, 1997; Helvacı vd, 2013). Çalışma alanının da içinde bulunduğu Acı Göl havzasının şekillenmesinde etkin olan başlıca faylar Çardak fayı, Maymundağı fayı ve Acıgöl fayıdır (Şekil 2). Tektonik açıdan oldukça aktif olan Acı Göl fayı sol yanal bileşene sahip normal bir faydır (Toker, 2008).

Beylerli gölet alanı ve yakın çevresinde yayılım gösteren karmaşık istif ya da melanj olarak adlandırılan birimler, peridotit naplanması ile birlikte gelmiş olan kayaçlardır. Bölgeye büyük bir sürüklenim sonucunda gelmiş olan bu birimler oldukça çatlaklı, kırıklı ve ince yapraklanmalı, şistozite dokulu olup son derece zayıf dayanımlıdır. Gölet yeri ve çevresinde naplanmanın ve tektonizmanın etkisiyle kaylanmalar ve kırık yüzeyleri yaygındır (Kayahan ve Kiremitçioğlu, 2009).



Şekil 2. Denizli Acıgöl havzası ve çevresinin jeolojik haritası (Şenel, 1997; Helvacı vd, 2013).

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

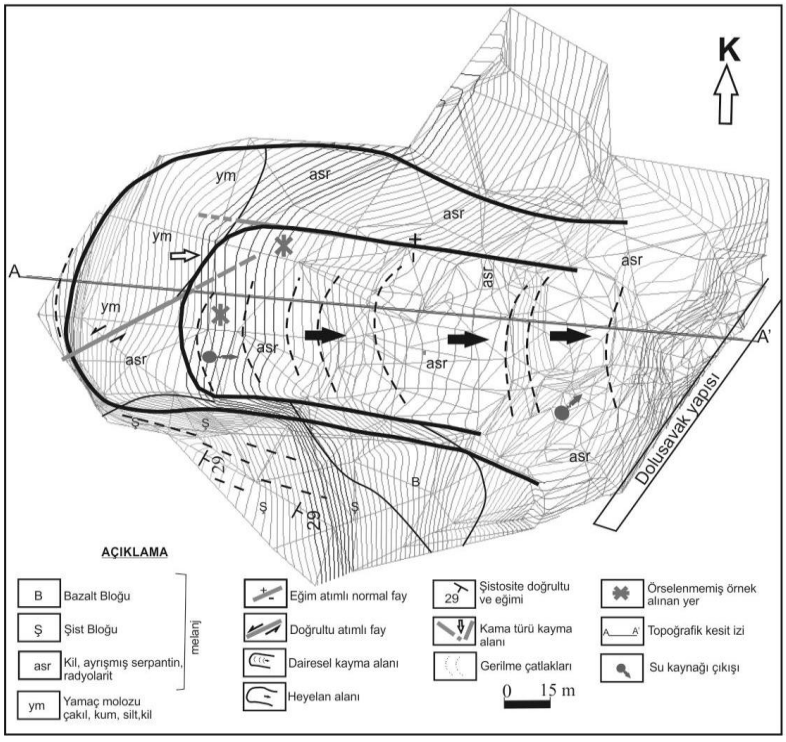
Beylerli göleti ekseninin sol sahil yamacı sürekli kütle hareketlerinin etkisi altındadır. Yamaç üzerinde eski (fosil) bir heyelan alanı ile 2004 ve 2009 da meydana gelen iki heyelan kütlesi mecuttur. Bu çalışma, 2009 yılında meydana gelen heyelanın oluşum mekanizması ve heyelana neden olan etkenlerin mühendislik jeolojisi açısından incelenmesini içermektedir (Şekil 3).

Dolu savak yapısının sol yamacı; ayrışmış serpantin, radyolarit, şist, diyorit, kil birimlerini içeren melanj serisi ve bunların üzerine uyumsuzlukla gelen yamaç molozu biriminden oluşmaktadır. Melanj serisi oldukça çatlaklı, kırıklı ve parçalı olup, su ile temasında kolaylıkla aşınarak ayrışabilmekte, melanj içinde bloklar halinde gözlenen aktinolit, klorit, mikaşist birimi de sürekli su ile temas ettiği kesimlerde killeşmiştir (Kayahan ve Kiremitçioğlu, 2009).

Yamaç içinde iki ayrı noktada düşük debili kaynak çıkışları mevcuttur. Bu suların yamaç içinde sürekli akışı sonucu serpantin ve şist birimleri ileri derecede bozunmaya uğramış ve killeşmiştir. Heyelan alanında doğrultu atımlı fay ve eğim atımlı normal fay yüzeyleri gözlenmiştir. Dolusavak yamacında meydana gelen kütle hareketlerinde bu tektonik yapıların etkisi olmuştur.

İleri derecede bozunmaya uğramış serpantin ve kil birimi içinde dairesel kayma meydana gelmiştir. Duraysızlaşan yamaç kütlesi dolusavak kanalının içerisine yığılarak barajın güvenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Dairesel kayma alanının taç kısmında yeralan yamaç molozu da doğrultu atımlı fay ve normal fay yüzeylerinin arasında oluşan kama türü kayma yüzeyinin arakesit doğrusu boyunca duraysızlaşmıştır.

Beylerli Göleti dolusavak yamacında meydana gelen bu heyelanın hareket mekanizması ve duraylılığını etkileyen nedenlerin incelenmesi amacıyla arazi çalışmaları yapılmış ve arazide bozunmuş serpantin ve kilden örselenmemiş örnekler alınmıştır. Alınan bu örnekler üzerinde birim hacim ağırlık,su içeriği, ve konsolidasyonlu, drenajlı koşullarda doğrudan makaslama deneyleri yapılarak birimin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Melanjdan alınan farklı örnekler üzerinde yapılan deneylerde yamaç moluzu ve bozunmuş melanj kütlelerinin doğal birim hacim ağırlıkları 20,55 kN/m^3 ile 22,82 kN/m^3, doygun birim hacim ağırlığı ise 17,86 kN/m^3 ile 23,46 kN/m^3 arasında değişmektedir.Şist birimleri üzerinde arazide ve laboratuvarda yapılan sürtünme açısı belirleme deneylerinde şistozite yüzeylerinin sürtünme açısı (ϕ) 28° ile 35° arasında değişmektedir.



Şekil 3. Dolusavak yapısı sol yamacında meydana gelen heyelan alanının mühendislik jeolojisi haritası

Dairesel kayma yüzeyinin içinde geliştiği ileri derecede bozunmuş serpantin ve kil birimlerinin makaslama dayanımının farklı su içeriklerindeki değişiminin şev duraysızlığına olan etkisinin incelenmesi için araziden öreselenmemiş örenekler alınmıştır. Bu örneklerin doğal su içeriklerinde ve kapilerite ile farklı miktarlarda suya doygun hale getirilmiş su içeriklerinde makaslama dayanımları belirlenmiştir. Örselenmemiş örneklerin kapilerite ile su içeriğinin artırılması için makaslama kutusu örnek kalıpları içindeki örnekler, tabanında 1 cm yüksekliğinde su olan bir kap içerisinde 15, 60 ve 120 dakika bekletilerek farklı miktarlarda suya doyurulmuş ve daha sonra doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır.

Ayrıca heyelan kütlesi içinde su çıkışlarının olmasından dolayı örselenmemiş zemin örnekleri makaslama kutusunun deney haznesine yerleştirilmiş, hazne su ile doldurulmuş ve örnek suya doygun hale getirilerek doğrudan makaslama deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Dairesel kaymanın içinde geliştiği birimin makaslama dayanımı düşük su içeriklerinde yüksektir. Zemin numuneleri kapilerite ile maksimum %25.9'a kadar suya doygun hale gelmekte ve bu doygunluğa büyük oranda 15 dakikada ulaşabilmektedir. Su içeriğinin artmasına bağlı olarak makaslama dayanımı değerlerinde önemli azalma görülmektedir.

Çizelge 1. Melanj örneklerinin suya doygun ortamda yapılan makaslama dayanımı deney sonuçları.

Deney Örneği Türü	Su muhtevası w (%)	Doruk kohezyon c_p (kPa)	Doruk içsel sürtünme açısı ϕ_p (^{o})	Artık kohezyon c_r(kPa)	Artık içsel sürtünme açısı ϕ_r(^{o})
Örselenmemiş Numune-1	12,8	32,7	20,44	25,2	21,4
Örselenmemiş Numune-2	16	40,65	24,56	10	29,98
15 dakika kapileriteyle doygun	25,07	0	29,34	0	28,18
60 dakika kapileriteyle doygun	25,97	2,68	26,11	2,68	25,45
120 dakika kapileriteyle doygun	25,5	8	26,61	2,65	24,41
Suya batık ve drenajlı	25,5	15	19,9	9	17,7

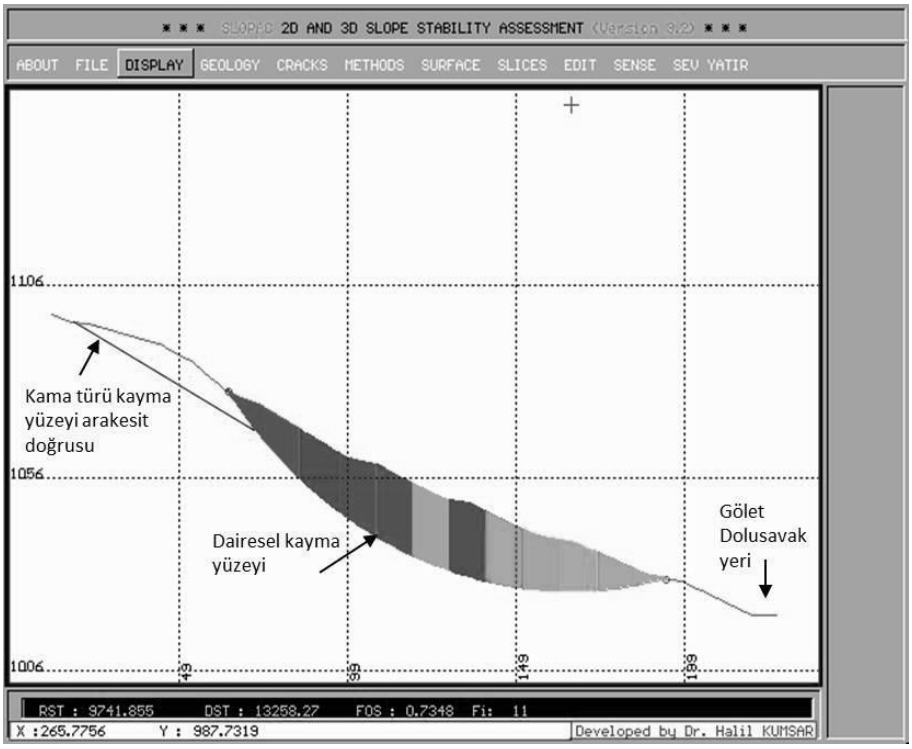
3.1. Duraylılık Analizleri

Beylerli göleti sol sahil yamacında meydana gelen heyelanın duraylılık analizleri ve harekete neden olan faktörlerin incelenmesi amacıyla limit denge analiz yöntemleri kullanılmıştır. Duraysızlık öncesi arazinin topoğrafik haritasından kesit alınmış ve arazide gözlenen dairesel kayma yüzeyi verileri değerlendirilerek kesit üzerinde diresel kayma yüzeyi SLOPAC2D (Kumsar, 1993) programı topoğrafik kesit üzerinde çizilmiş ve düşey dilimlere ayrılmıştır (Şekil 4). Kayma yüzeyi üzerindeki yamaç kütlesinin duraylılık analizleri SLOPAC2D bilgisayar programı kullanılarak Bishop (1955), Aydan vd. (1992) ve Kumsar (1993) tarafından önerilmiş limit denge yöntemleriyle hesaplanmıştır.

Duraysız yamaç alanı içerisinde iki ayrı noktada su çıkışının olmasından dolayı duraylılık analizlerinde melanj biriminin suya doygun koşulda elde edilen makaslama dayanımı değerleri kullanılmıştır. Yamaç kütlesi içinde gözenek suyu basıncının (r_u) olmadığı durumlarda güvenlik katsayısı (F) 1.29'dur. Yeraltısuyu ve yağış sularının etkisiyle yamaç içinde r_u'nun 0.26 - 0.3 arasında bir değere ulaşması durumunda yamaç duraysızlaşmaktadır (Şekil 5).

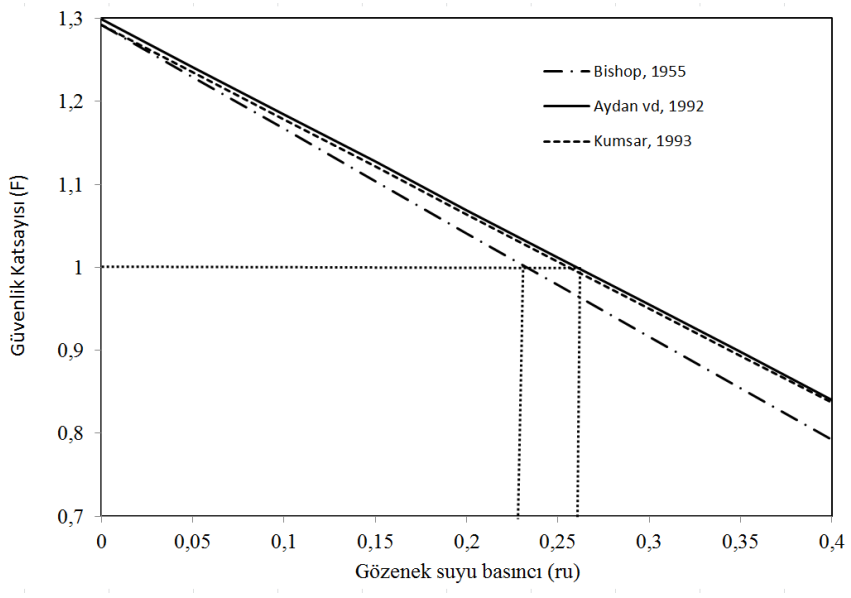
Kama türü kayma, dairesel kayma hareketi meydana geldikten hemen sonra aynı yamaç üzerinde kama kütlesinin topuğundaki kütlenin hareketi sonucunda kama türü kayma yüzeyinin arakesit doğrusunun yeni oluşan topoğrafya yüzeyi ile kesişmesi ile meydana gelmiştir.

Kama kütlesi 2 ayrı tektonik kökenli süreksizlik yüzeylerinin ara yüzeyinde oluşmuştur. Bunlardan biri sol yanal atımlı doğrultu atımlı fay yüzeyi (K65D/55GD) ve diğeri de Şekil 6a'da verilen eğim atımlı normal fay yüzeyidir (K72D/50KB). Kinematik analiz sonucunda kama kütlesinin arakesit doğrusunun dalım yönü açısı (β) 110^o ve dalım açısı (i_a) 45.8^{o}olarak belirlenmiştir(Şekil 6b). Fay yüzeylerinin sürtünme açısı (ϕ) eğimlendirme deneyi yapılarak belirlenmiş olup, ortalama 28^o'dir.

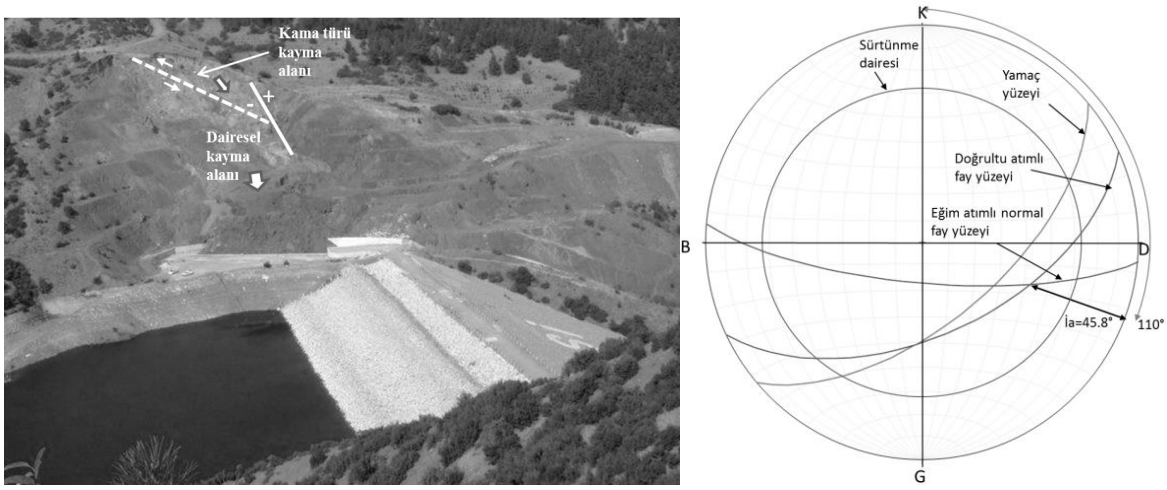


Şekil 1. Duraysız alanda kütle hareketi öncesi topoğrafyadan hazırlanan topoğrafik kesit üzerinde tanımlanan dairesel ve kama türü kayma kütlelerinin görünümü.

Kama kütlesinin güvenlik katsayısı (F) Hoek ve Bray (1981) yöntemine göre 0.84, Kovari ve Fritz, (1972) ve Kumsar vd. (2000) yöntemlerine göre 0.81 olarak hesaplanmıştır. Bu da, kama kütlesinin topuğundaki dairesel kaymanın hemen sonrasında kama türü kütle hareketinin meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 5. Dolusavak heyelan alanında dairesel kayma yüzeyi üzerindeki yamaç kütlesinin güvenlik katsayısının farklı gözenek suyu basıncı katsayısına bağlı olarak değişimi(F=1 kayma anıdır).



Şekil 6.(a) Dolusavak heyelan alanındaki dairesel ve kama türü kayma alanları, (b) kama türü kaymanın kinematik analizi

4. SONUÇLAR

Beylerli göleti sol sahil yamacında yayılım gösteren bozunmuş melanj birimi içerisinde önce dairesel kayma, dairesel kaymadan sonra da kama türü kayma meydana gelmiştir. Heyelan alanında dolusavak yapısı hasar görmüş ve kullanım dışı kalmıştır.

Dairesel kayma yüzeyi, serpantin ve radyolaritlerin bozunması sonucu killeşmiş yeşilimsi, kırmızımsı renkli çakıllı, kumlu, siltli kil birimi içinde gelişmiştir. Yamaç içinde iki ayrı noktada kaynak suyu çıkışının olması dairesel kaymanın meydana gelmesinde etkili olmuştur.

Dairesel kayma yüzeyi üzerindeki melanj birimi düşük su içeriğinde yüksek makaslama dayanımına sahip olup, duraylı kalmaktadır. Ancak yağışların etkisiyle melanjın makaslama danayınımı azalmakta ve yoğun yağışlı mevsimlerde suya doygun hale gelen melanj gözenek suyu basıncının da etkisiyle duraylığını kaybetmektedir.

Dairesel kayma yüzeyi üzerinde yeralan yamaç kütlesinin duraylılığı, gözenek suyu basıncı katsayısının artması dikkate alınarak incelenmiştir. Gözenek suyu basıncı katsayısının (r_u) 0.26-0.3 arasındaki değerlerde yamaç duraysızlaşmaktadır. Kama türü kaymanın iki süreksizlik yüzeyinin kesiştiği arakesit doğrusu boyunca meydana geldiği gözlenmiş olup, bunlardan biri doğrultu atımlı fay yüzeyi, diğeri ise eğim atımlı normal fay yüzeyidir. Kinematik analizden elde edilen veriler kullanılarak kama kütlesinin güvenlik katsayısı Kumsar vd. (2000)'nin yöntemiyle 0.81 olarak hesaplanmış olup, duraysızdır.

Heyelan kütlesi dolusavak yapısına hasar vermiştir ve barajın güvenliğini tehdit etmektedir. Heyelan alanında güvenli şev açıları hesaplanarak şev düzenlemesi yapılması ve heyelan malzemesinin kazılması ve güvenli bir alana dökülmesi gereklidir.

Heyelan alanı içinde iki adet su kaynağı çıkışı mevcuttur. Bu kaynakların çıkış noktalarından itibaren göl alanı içine kadar kapalı boru içinde aktarılması ve böylece yamaç içine devamlı su akışının engellenmesi gerekmektedir.

5. KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu çalışmada sağladıkları lojistik katkılardan dolayı DSİ 212. Şube Müdürlüğü'ne ve Doğan İnşaat Kuruluşuna teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Aydan, Ö., Shimizu, Y., Kawamoto, T., 1992. The stability of slopes against combined shearing and sliding failures and their stabilization. Asian Regional Symposium on Rock Slopes, Oxford & IBH Publ., New Delhi, pp 1105-1117.

Bishop, A. W. 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5,7-17.

Google Earth, 2014. https://maps.google.com/

Helvacı, C. , Alçiçek, M.C., Gündoğan, İ.,Gemici, Ü. 2013. Tectono sedimentary development and palaeo environmental changes in the Acıgöl shallow-perennial playa-lake basin, SW Anatolia, Turkey. Turkish Journal of Earth Science, 22, 173-190.

Hoek, E.,Bray, J. W. 1981. Rock Slope Engineering. Inst. Min. and Metall., 3rd edn., London.

Kayahan, N.,Kiremitçioğlu, İ.H. 2009. Denizli-Çardak Beylerli göleti ve sulaması inşaatı dolusavak boşaltım kanalı (palye kazıları) sol yamaçta oluşan heyelan ile ilgili mühendislik jeolojisi raporu (yayımlanmamış).

Kovari, K., Fritz, P. 1975. Stability analysis of rock slopes for plane and wedge failure with the aid of a programmable pocket calculator. 16th US Rock Mech. Symp., Minneapolis, USA, pp. 25-33.

Kumsar, H. 1993. Mine slope stability assessment by using inter-slice force transmission, PhD Thesis, Nottingham University, UK.

Kumsar, H., Aydan, Ö., Ulusay, R. 2000. Dynamic and static stability of rock slopes against wedge failures. Rock Mechanics and Rock Engineering, 33(1), 31-51.

Şenel, M. 1997. 1:100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları. Denizli-K9 paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.

Toker, E., 2008. Acıgöl Çardak (Denizli) grabeninin kuzeyindeki Tersiyer çökellerinin tektono-sedimanter gelişiminin incelenmesi. Doktora Tezi, SDÜFen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Açık Ocak İşletmesi Şeklinde Yürütülen Krom Madenciliği ve Kütle Hareketleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması: Musalı (Mersin) Örneği

Investigation of Relationship Between Open Pit Chrome Mining Operations and Mass Movements: A Case Study From Musalı (Mersin)

H. Tağa[1,*], C. Güler[1], H. Çakan[2]

[1] *Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampusu, 33343 Mersin*
[2] *Minsan A.Ş., Musalı Köyü 33250 Toroslar, Mersin*
*(*htaga@mersin.edu.tr)*

ÖZ: Üst Kretase zamanında yerleşmiş Mersin ofiyoliti içerisinde gelişen krom cevherleşmeleri, Musalı köyü (Mersin) civarında açık ve kapalı işletme yöntemleri kullanılarak işletilmektedir. Bu bölgede, yaklaşık 650 m genişliğinde ve 300 m boyunda bir kütle hareketi mevcuttur. Başlıca harzburjit, dünit ve serpantinden oluşan ve oldukça eklemli bir yapı sunan ofiyolit biriminde, oluşum tarihi belirlenemeyen bu kütle hareketinin içerisinde, açık ocak işletmesi şeklinde madencilik faaliyetleri yürütülmektedir. Bölgedeki madencilik faaliyetlerine bağlı olarak ana heyelan kütlesi hareketlenmekte ve ocak şevlerinde yeni kütle hareketleri meydana gelmektedir. Açık ocak işletmesini etkileyen ana heyelanda meydana gelen deformasyonları izlemek amacıyla; Kasım 2013'te biri kayan kütle üzerinde diğeri de sabit kütle üzerinde olmak üzere toplam 22 çift izleme çubuğu yerleştirilmiştir. Oluşturulan izleme noktalarında, 2 yıl boyunca 6 ayrı tarihte teodolit kullanılarak koordinat ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre; ana heyelan kütlesinde, açık ocak işletmesinin yerine ve geometrisine bağlı olarak, yatay ve düşey yönde farklı miktarlarda deformasyonların gerçekleştiği belirlenmiştir.

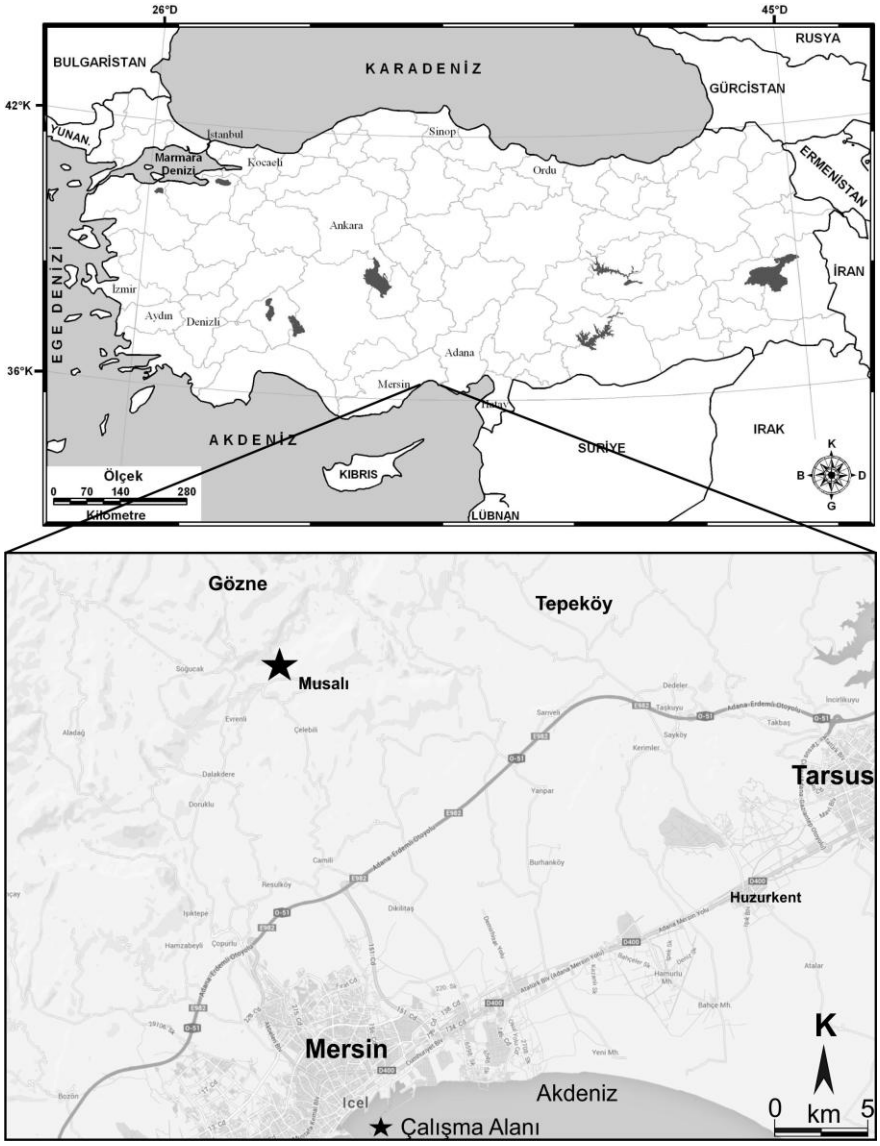
Anahtar Kelimeler: Kütle Hareketi, Deformasyon, Krom Madenciliği, Açık İşletme, Musalı.

ABSTRACT: *Chrome mineralization developed within the Mersin Ophiolite, emplaced during Upper Cretaceous, have been operated in the vicinity of Musalı village (Mersin) using open pit and underground mining methods. In this area, there is a mass movement with an approximate width of 650 m and length of 300 m. Within this ophiolitic unit, mainly consisting of harzburgite, dunite and serpentine, and displaying a highly jointed structure, an undated mass movement is nestled, in which mining activities are currently carried out using open pit method. Depending on the mining activities in the region, the main landslide mass is reactivated and new mass movements occur on the pit slopes. In order to monitor the displacements occurring in the main landslide affecting the open pit mine; a total of 22 pairs of monitoring points were installed in November 2013 on sliding and stable masses to carry out onsite theodolite measurements. On six different dates in a two-year period, coordinate measurements were taken and recorded at all monitoring points. According to these results; in the main landslide, depending on the location and geometry of the open pit mine, different amounts of deformations were determined in horizontal and vertical directions.*

Keywords: *Mass Movement, Deformation, Chrome Mining, Ppen Pit, Musalı.*

1. GİRİŞ

Mersin ili Toroslar ilçesi Musalı Köyü Karabucak Deresi mevkiinde açık ve kapalı ocak işletmeciliği şeklinde krom madenciliği yürütülmektedir (Şekil 1). Üst Kretase yerleşim yaşlı Mersin Ofiyolitinin dünit-harzburjit ve serpantin litolojilerinde gözlenen kromit çevherleşmesinin açık ocak işletmesinde 2012 yılının sonbahar mevsiminde şev duraysızlığı meydana gelmiştir (Şekil 2). Bu duraysızlık, açık işletmeyi de içine alan ve oluşum tarihi net olarak belirlenemeyen büyük bir kütle hareketinin içerisinde yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

Açık işletmenin güneyinde oluşan kütle hareketi ile terk edilmiş ve pasa döküm alanı olarak kullanılan açık işletmenin güneyinde yer alan kütle hareketi 1/1.000 ölçekli olarak haritalanmıştır. Heyelanlardaki gerilme çatlakları, heyelanların çökme ve kabarma bölgeleri bu heyelan haritalarına işlenmiştir. Ayrıca; yeni açık ocak işletmesi için ruhsat sahası içerisindeki ormanda ağaç kesimi yapılmıştır. Kesimi yapılmış ağaçlardaki asimetrik halka yapıları, oluşan deformasyon ve kütle hareketinin yönü açısından değerlendirilmiştir.

Geçmişten günümüze açık ocak işletmelerindeki deformasyon ve zemin hareketlerinin izlenmesi ve analiz edilmesini konu alan birçok çalışma bulunmaktadır (örn. Kennedy and Niermeyer, 1970;Singh ve Singh, 1993; Sun vd., 2000; Wang vd., 2005; Bye ve Bell, 2001; Kayesa, 2006; Rose ve Hungr, 2007; He vd., 2008; Han vd., 2010; Ma vd., 2012; Kavvadas vd., 2013). İzleme teknikleri, kütle hareketleri ile açık ocak işletmesi arasındaki ilişkinin anlaşılması ve tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da; Musalı açık ocak işletmeciliği şeklinde yürütülen krom madenciliği ile işletmeyi de içerisine alan kütle hareketi arasındaki ilişki, total station bazlı izleme tekniği ile değerlendirilmiştir.

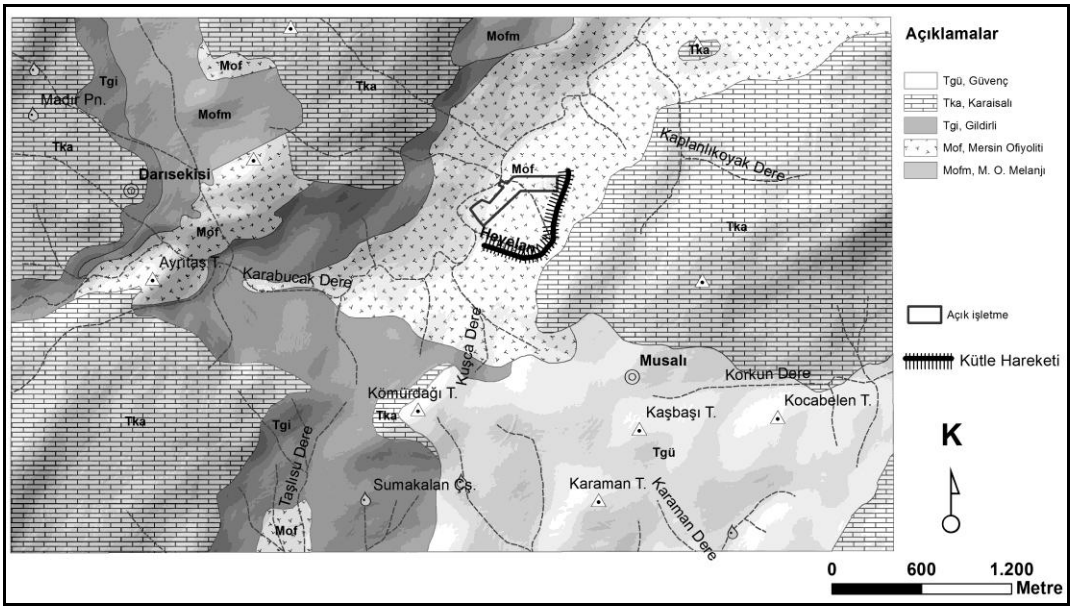
Şekil 2. Musalı krom işletmesi açık ocak şevindeki kütle hareketi.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ

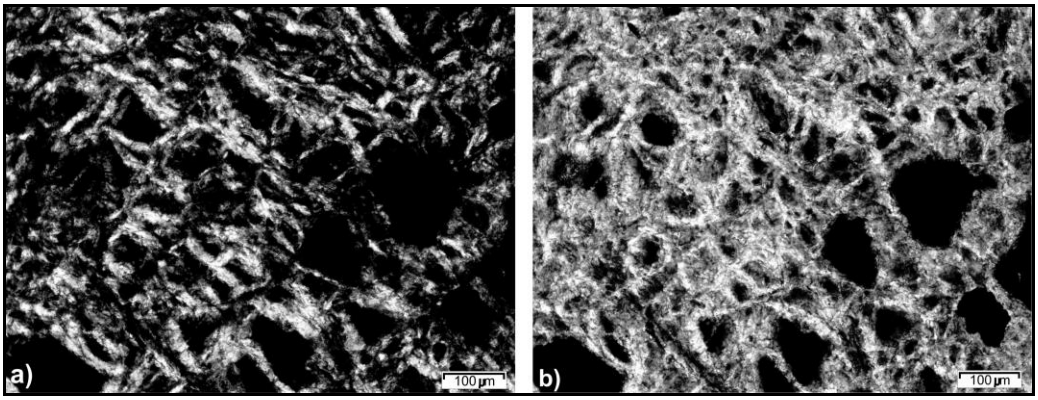
İnceleme alanında ve çevresinde Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı beş litostratigrafi birimi yüzeylenmektedir. Bunlar sırayla Üst Kretase yerleşim yaşlı Mersin Ofiyoliti ile ofiyolitik melanj (karışık), bu temel kayaların üzerine uyumsuz olarak gelen Oligo-Miyosen yaşlı Gildirli Formasyonu, bu formasyonun üzerine ise Alt Miyosen yaşlı Karaisalı Formasyonu gelmektedir. Alt–Orta Miyosen yaşlı Güvenç Formasyonu ise Karaisalı Formasyonu ile geçişli olarak gelmektedir (Şekil 3). İnceleme alanı, Karabucak Deresi'nin iki yanında ve Musalı köyünün kuzeybatısında gözlenen Mersin Ofiyoliti içinde yer almaktadır (Şekil 3). Birim, koyu zeytin yeşili, kahverengimsi yeşil, mavimsi yeşil, siyahımsı yeşil renklerde gözlenmektedir. Ofiyolitik birimler tektonizma etkisiyle ilksel konum ve yapılarını kaybetmiştir ve genellikle serpantinleşme hakimdir. Juteau (1980)'nun yaptığı çalışmalar sonucunda Mersin Ofiyolitinin, büyük çoğunluğunu serpantinize olmuş büyük harzburjit dilimleri ve bunları kesen toleyitik diyabaz daykları ve yer yer dünit, harzburjit, ortopiroksenit bantlanmasından oluştuğu ve Üst Kretase'de tektonik olarak bölgeye yerleştiği tespit edilmiştir. İnceleme alanında gözlenen ofiyolitik birim içerisinde tam bir stratigrafik (eksiksiz bir ofiyolitik istife) seviyeye rastlanmamış olup, serpantinit ve serpantinize peridotlar hakimdir (Şekil 4).

Özellikle açık ocak kazısında yüzeye çıkan kayaçlar atmosferik olayların etkisi ile ayrışarak parçalanmaktadırlar. Bazı yerlerde ise, dıştan içe doğru bir zonlanma gösterirler. Ayrıca ayrışmış bu ofiyolitik kayaçların içerisinde manyezit oluşumları tespit edilmiştir. Ofiyolitik seri üzerine Oligo-Miyosen yaşlı Gildirli Formasyonu uyumsuz olarak gelmektedir. Gildirli Formasyonunun bulunmadığı yerlerde ofiyolitik seri üzerine Alt Miyosen yaşlı resifal nitelikli Karaisalı Formasyonu uyumsuz olarak yer almaktadır (Şekil 3).

Gildirli formasyonu, konglomera-kumtaşı, silttaşı-kiltaşı ve killi kireçtaşı-marn birimlerinden oluşmuştur. Bu birimler birbirleri ile yanal ve düşey geçişli durumda olmakla birlikte, konglomera-kumtaşı birimi alt kesimlerde, silttaşı-kiltaşı birimi orta kesimlerde ve killi kireçtaşı-marn birimi üst kesimlerde egemendir. Schmidt (1961) tarafından tanımlanan Gildirli formasyonunu beyaz, açık gri renkli, bol algli-mercanlı kil yumrulu, erime boşluklu Karaisalı formasyonu tarafından açısal uyumsuzlukla üzerlenir. Alt Miyosen yaşlı bu Karaisalı formasyonunu killi kireçtaşı-marn, kiltaşı-silttaşı birimlerinden oluşan Güvenç formasyonu üzerlemektedir (Şekil 3).



Şekil 3.Çalışma alanı ve civarının jeoloji haritası (Şenol vd., 1998'den değiştirilerek).



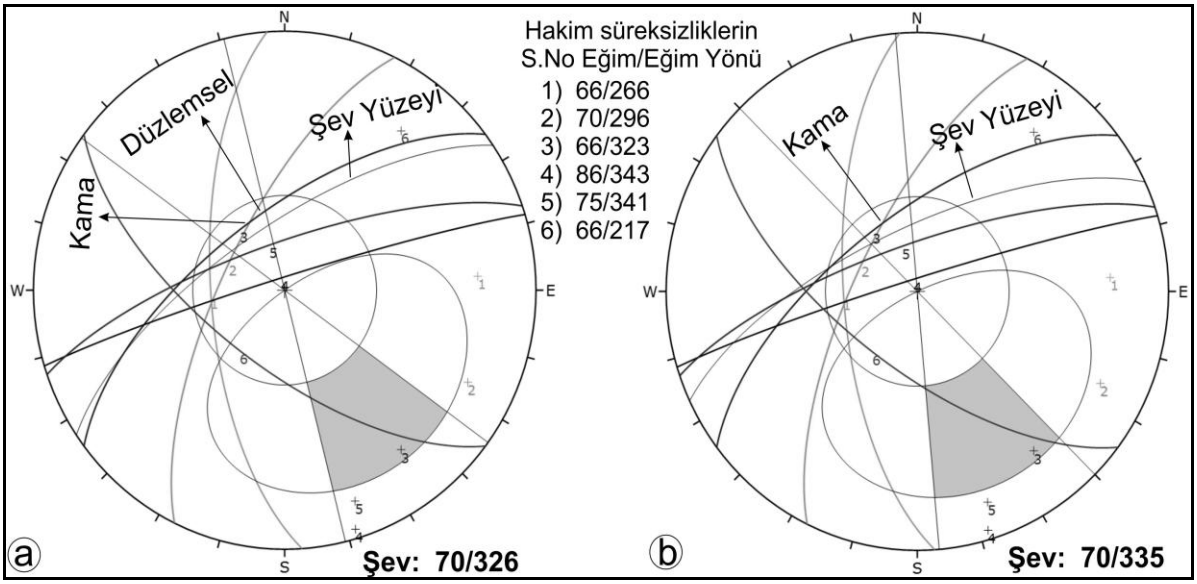
Şekil 4. Ayrışma ürünü serpantinize dünitin çift nikol (a) ve tek nikoldeki (b) mikroskop görünümleri.

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ ÇALIŞMALARI

İnceleme alanındaki krom madenciliğinin yapıldığı ofiyolit türü kayaçlar oldukça eklemli yapıda olup, süreksizliklerin kontrolünde oluşabilecek yenilmeleri belirlemek amacıyla yeni açık ocak sahasında hat tarama ve yüzlek tarama şeklinde süreksizlik çalışmaları ISRM (1981)'e göre gerçekleştirilmiştir. Süreksizlik yüzeyleri düzlemsel olup, ileri derecede ayrışmıştır. Basit eğme testiyle süreksizliklerin içsel sürtünme açılarının 26º ile 34º arasında dağıldığı belirlenmiş olup, analizlerde ortalama 30º alınmıştır. Ölçülen eklemler Rocscience Dips v6 (2013) yazılımı ile değerlendirilerek 66/266, 70/296, 66/323, 86/343, 75/341 ve 66/217 konumlu altı adet hakim süreksizlik düzlemi tespit edilmiştir. Hakim süreksizlik düzlemleri ile şevin konumu beraber değerlendirilerek yapılan kinematik analizlerde düzlemsel ve kama tipi bir yenilmenin oluşabileceği belirlenmiştir (Şekil 5).

Yüzeyden itibaren farklı derinliklerde yer alan krom cevherinin yüzeye yakın konumdakiler açık ocak işletmesi şeklinde işletilmektedir. Batıdan doğuya doğru kaydırma şeklinde gerçekleştirilen açık ocak işletmeciliğinde, eski ocak sahaları pasa döküm sahası olarak değerlendirilmektedir. Madencilik faaliyetinin gerçekleştirildiği alanın güneyinde yer alan ve pasa döküm sahası ile açık ocak işletmesini de içine alan, yaklaşık 600 m genişliğinde, 300 m uzunluğunda kuzey-kuzeybatı yönün hareket eden

kütle hareketi, Magellan Explorist XL tipi el GPS'i ile iz takip edilerek 1/1000 ölçekli olarak haritalanmıştır (Şekil 6).



Şekil 5. Açık ocak işletmesinde gerçekleştirilen kinematik incelemeler.

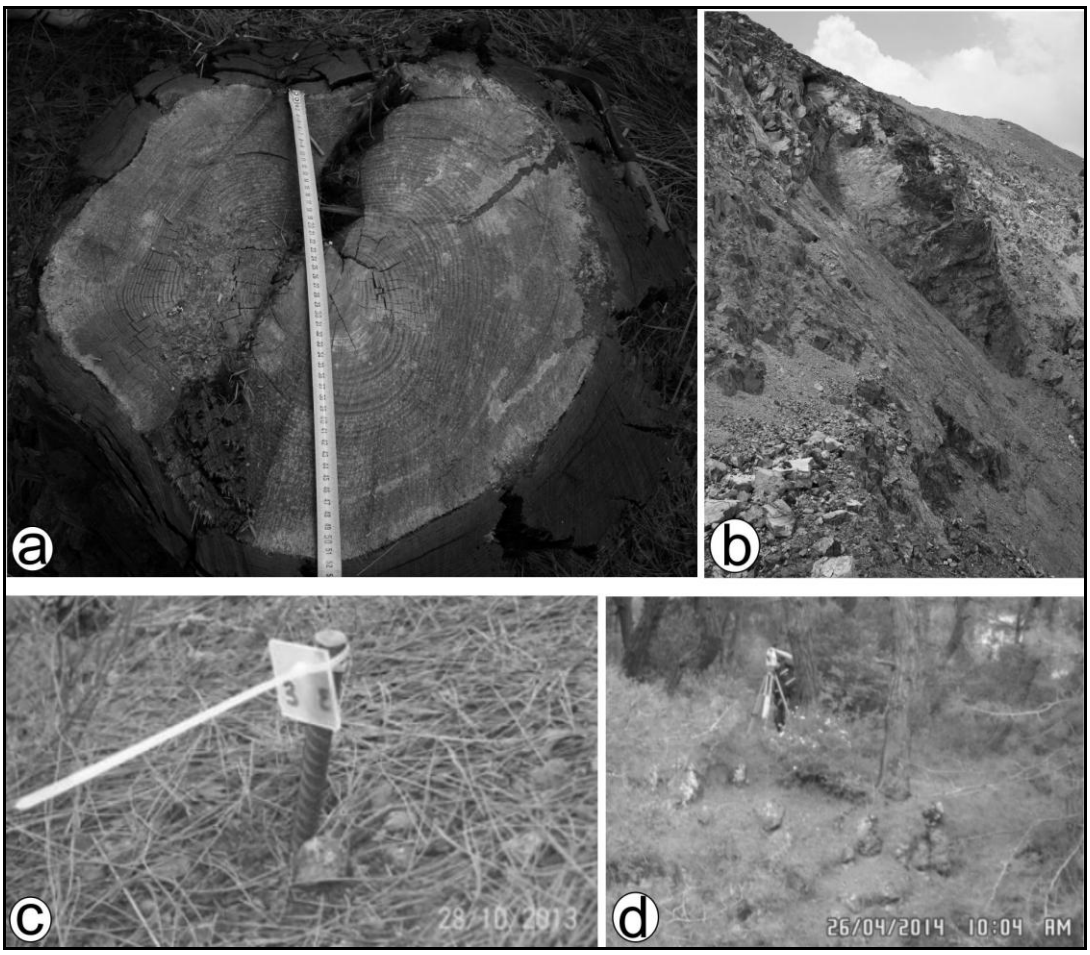
Yeni açık işletme sahası oluşturmak amacıyla inceleme alanındaki ormanda izinli ağaçlar kesimi gerçekleştirilmiştir. Kesilen ağaçların alansal dağılımları ve ağaç halkalarının simetri durumları ve yönelimleri pusula ve el tipi GPS kullanılarak değerlendirilmiştir. Ağaç halkalarının asimetri eksenlerine göre inceleme alanında kuzey-kuzeybatı yönlü sürekli bir hareketin olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7). Ayrıca açık ocak işletme sahasındaki 70/326 konumlu ikinci basamakta 40/335 konumlu bir düzlemsel kayma meydana gelmiştir (Şekil 7b).

4. HAREKET İZLEME ÇALIŞMALARI

Kütle hareketlerinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak veya en aza indirgemek için kayma mekanizması belirlenerek kütle hareketin bir plan doğrultusu boyunca izlenmesi önemlidir. İnceleme alanında açık ocak işletmesini de içerisini alan kütle hareketindeki deformasyonların izlenmesi amacıyla total station bazlı klasik izleme sistemi oluşturulmuştur. Biri kayan blokta biri de hareketli blokta olmak üzere 21 noktada düşey çelik çubuklar yerleştirilerek, çubuk çiftleri arasındaki x, y ve z yönündeki değişimler 2 yıl boyunca 6 kez ölçülmüştür (Çizelge 1) (Şekil 7 ve 8).

Güneybatıdan kuzeydoğuya doğru ilerlenerek gerçekleştirilen açık ocak işletmeciliğinde, terk edilen sahalar, pasa döküm sahası olarak değerlendirilmektedir. Açık ocak sahasından çıkan pasalar, aktif kütle hareketinin topuğunda yük oluşturmaktadır. Diğer yandan, yeni açık ocak kazıları ile de aktif kütle hareketinin topuğundan yük kaldırılmaktadır. Açık ocak kazısı ile topuğundan yük kaldırılan aktif kütle hareketi, açık ocak işletmesinin ilerlediği yönde ilerleyen bir kütle hareketine dönüşmektedir. Çizelge 1'den de görüldüğü gibi, kütle hareketinin topuğuna yük konulduğu kısımlarda yatay yöndeki deformasyonun durduğu, açık ocak işletme sahasında ise hareketin devam ettiği belirlenmiştir.

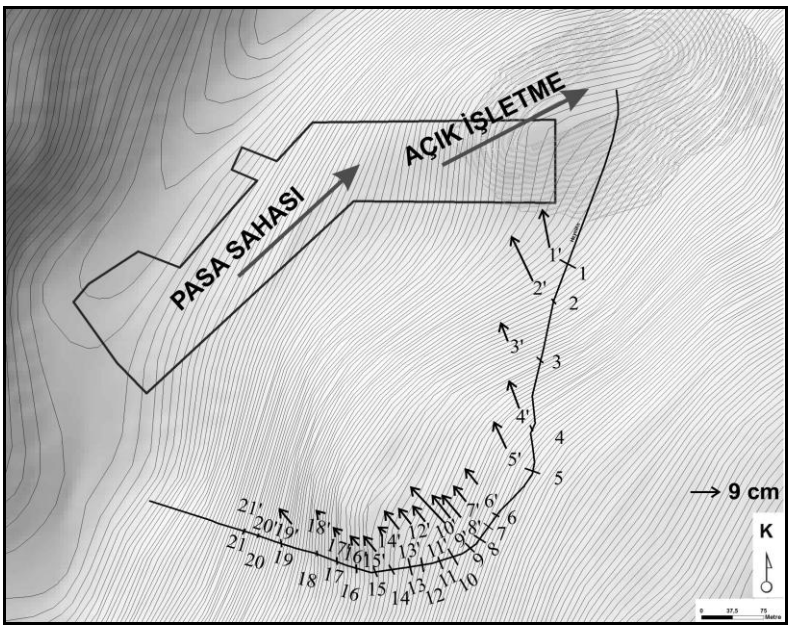
Şekil 6. Madencilik faaliyetinin yürütüldüğü saha ve kütle hareketi.



Şekil 7. Kesilen ağaçlardaki büyüme halkaları (a), açık ocak sahasında gözlenen düzlemsel kayma (b), izleme çubukları (c) ve izleme çubuklarında total station ile deformasyon ölçümleri (d).

Çizelge 1. Kütle hareketini izlemede kullanılan gözlem çubukları arasındaki mesafe değişimleri (cm).

Gözlem Noktaları	Ölçüm tarihleri					
	02.11.2013	01.03.2014	26.04.2014	15.11.2014	17.01.2015	23.03.2015
1-1'	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04
2-2'	0,04	0,06	0,01	0,01	0,01	0,02
3-3'	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
4-4'	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00
5-5'	0,04	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00
6-6'	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
7-7'	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
8-8'	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
9-9'	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
10-10'	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,05
11-11'	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01
12-12'	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
13-13'	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
14-14'	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
15-15'	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
16-16'	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
17-17'	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18-18'	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19-19'	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
20-20'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21-21'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 8. Kütle hareketinin izlendiği çubuklar ve kütlenin hareket yönü.

5. SONUÇLAR

Musalı (Mersin) yöresinde Kretase yerleşim yaşlı ofiyolitik kayaçlarda açık ocak işletmesi şeklinde yürütülen krom madenciliği ile kütle hareketi arasındaki ilişki incelenmiştir. Açık ocak işletme sahasındaki kinematik değerlendirmeye göre, açık ocak işletme şevlerinde kama ve düzlemsel tipte kütle hareketlerinin olabileceği öngörüsü gerçekleşmiştir. İnceleme alanındaki eklemli ofiyolitik kayaçların atmosferik şartların etkisiyle ayrışarak kolaylıkla dağıldığı belirlenmiştir.

Ağaç yaş halkaları kullanılarak yapılan değerlendirmede; bölgede kuzey-kuzeybatı yönünde sürekli bir kütle hareketinin olduğu belirlenmiştir. Doğal şev yönelimleri ile ağaç büyüme halkalarındaki asimetri yönleri birlikte değerlendirildiğinde bu hareketin yavaş bir krip şeklinde olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Açık ocak işletmesi ile kütle hareketi arasında bir ilişkinin olduğu teodolit bazlı klasik izleme sistemi ile gerçekleştirilen deformasyon ölçümleri ile ortaya konulmuştur. Açık ocak faaliyetleriyle birlikte hareket gözlenen bir bölgenin içindeki heyelanın tetiklendiği anlaşılmıştır. Ayrıca kütle hareketinin topuğuna, açık işletmeden çıkarılan pasa (dekapaj malzemesi) konulmasıyla, kütle hareketinin durduğu belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

Bye, A.R., Bell, F.G., 2001. Stability assessment and slope design at Sandsloot open-pit, South Africa. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(3), 449-466.

DIPS 6, 2013. DIPS-computer program for graphical and statistical analysis of orientation data. Rocscience Inc., Canada.

Han, F. Xie, F., Wang, J., 2010. 3D numerical simulation on the stability of rocks in transferred underground mining from open-pit. Journal of University of Science and Technology Beijing, 28(6), 509–514.

He, M.C., Feng, J.L., Sun, X.M., 2008. Stability evaluation and optimal excavated design of rock slope at Antaibao open-pit coal mine, China. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(3), 289–302.

ISRM, 1981. Rock characterisation, testing and monitoring-ISRM suggested methods. Oxford:Pergamon.

Juteau, T., 1980, Ophiolites of Turkey. Ofioliti, 2, 199-237.

Kayesa, G., 2006. Prediction of slope failure at Letlhakane mine with the geomos slope monitoring system. The South African Institute of Mining and Metallurgy International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, Cape Town, South Africa 605-622.

Kavvadas, M., Agioutantis, Z., Schilizzi, P.P., Steiakakis, C., 2013. Stability and movements of open-pit lignite mines in Northern Greece. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2193-2196.

Kennedy, B.A., Niermeyer, K,E., 1970. Slope monitoring systems used in the prediction of a major slope failure at the Chuquicamata Mine, Chile.

Ma, F., Zhao, H., Zhang, Y., Guo, J., Wei, A., Wu, Z., Zhang, Y., 2012. GPS monitoring and analysis of ground movement and deformation induced by transition from open-pit to underground mining. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4 (1), 82–87.

Rose, N.D., Hungr, O., 2007. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(2),308–320.

Schmidt G.C., 1961. Stratigraphic nomenclature for the Adana region petroleum district VII. Petroleum Administration Bulletin, 6, 47-63.

Singh, T.N., Singh, D.P., 1993. Prediction of instability of slopes in an opencast mine over old surface and underground workings. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 6(2), 81–89.

Sun, S., Cai, M., Wang, S.W., 2000. Study of sliding mechanism for slope due to the excavation from open pit into underground mine. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 19(1), 126–129.

Şenol, M., Şahin, Ş., Duman, T.Y., Albayrak, Ş., Akça, İ. ve Taşkın Ş., 1998. Adana-Mersin dolayının jeoloji etüd raporu: 1/100.000 ölçekli Mersin O33 paftası. MTA, Rapor No:109098.

Wang, J., Chang, L., Xia, C., Shi, W., Deng, K., 2005. Study on stability of jointed rock slope of an open iron mine. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(18), 350-354.

Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu (D400) Kaledran Mevkisinde (Km: 221+300–221+700) Meydana Gelen Kütle Hareketinin İncelenmesi

Investigation of Mass Movement Occurred In Kaledran Site Along the Alanya-Anamur-Mersin State Road (D400) (Km: 221+300–221+700)

K. Zorlu[1,*], H.Tağa[1], E. Yalçın[2], C. Güler[1], B. Hacak[2],E. Epsileli[2], M. Tepe[2]

[1] Mersin Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü, 33343 Mersin
[2] Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü, 33220 Mersin
*(*kivancgeo@mersin.edu.tr)*

ÖZ: Doğu Akdeniz Bölgesi'nde batı-doğu ulaşım bağlantısını sağlayan en önemli karayolu Antalya-Mersin (D400) hattıdır. Her iki şehrin de bölgenin turizm ve ticaret merkezleri olduğu düşünüldüğünde bu yolun önemi daha da artmaktadır. Ancak bu yolun tek şeritli ve ulaşımın nispeten zor sağlandığı bir yol olması nedeniyle, yeni bir güzergâh seçimi gündeme gelmiştir. Hâlihazırda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından projelendirilen bu yol güzergâhı, bölgedeki dağların kıyıya paralel uzanması ve sarp bir topoğrafya sunması nedeniyle ulaşım alt yapı çalışmalarında çeşitli mühendislik problemleri ile karşılaşılmaktadır. Alanya-Anamur-Mersin yolunun 221+300–221+700 kilometreleri arasında yaklaşık boyu80 m, genişliği 300 m ve derinliği 6-29 m arasında değişen bir kütle hareketi meydana gelmiştir. Bu hareket; Prekambriyen yaşlı, dolomit ve mermer mercekli kuvarsit, metakumtaşı, metasilttaşı, yer yer kızılımsı, sarımsı kahve renkli kuvarsit ve ince çamurtaşı seviyelerinden oluşan Tenzile formasyonunda gelişmiştir. Birim, oldukça kırıklı-çatlaklı bir yapı sergilemekte olup, ayrışma zonu5 m derinliğe kadar ulaşmaktadır. 2011 yılında meydana gelen bu kütle hareketinin türünü ve kayma mekanizmasını ortaya koymak amacıyla Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü tarafından açılan 8 adet sondaj kuyusuna yerleştirilen inklinometrelerde deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kütle hareketini tetikleyen mekanizmaların; birimlerin jeolojik, jeoteknik ve topoğrafik özellikleri ile birlikte, bölgedeki aşırı yağışlar ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. İnklinometre ölçümleri ve arazi gözlemlerinden elde edilen bulgulara göre, söz konusu kütle hareketinin dairesel olarak başladığı ve zayıflık düzlemi üzerinde düzlemsel olarak devam ettiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, Alanya-Anamur-Mersin yolunun 221+300–221+700 kilometreleri arasındaki kütle hareketinin mekanizması ortaya konulmuştur.

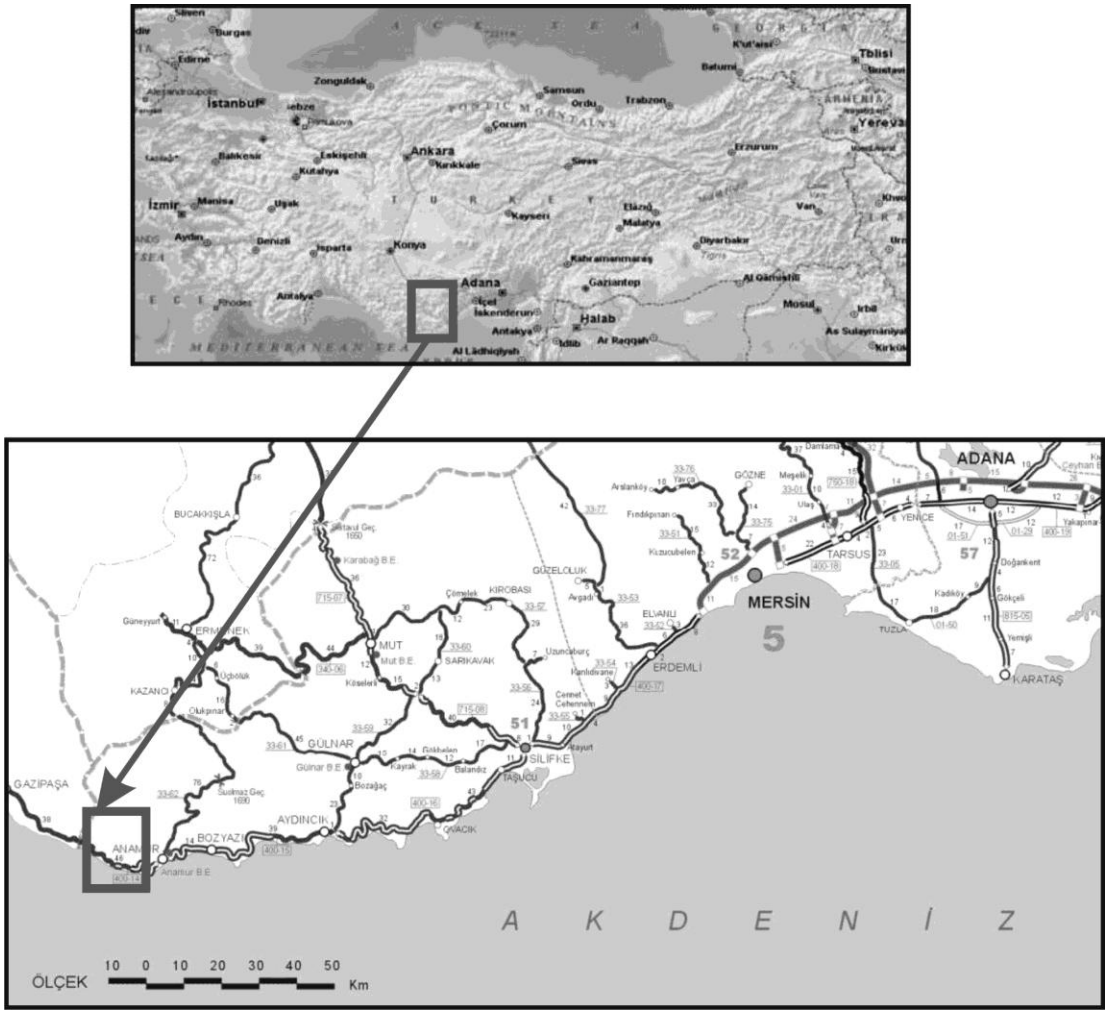
Anahtar Kelimeler: D400 Devlet Karayolu (Antalya-Mersin), Dairesel Kayma, Kütle Hareketi, Deformasyon Ölçümü, Kaledran

ABSTRACT: *Antalya-Mersin (D400) route is the most important road providing west-east transportation connection in the eastern Mediterranean region. Recently, a new route selection became a current issue because of the difficulties experienced in providing transportation along this single-lane road. However, during the construction phase, a variety of engineering problems are faced along the route due to presence of the mountain ranges with rugged topography. In year 2011, between kilometers 221+300–221+700 of the Alanya-Anamur-Mersin road, a mass movement occurred with an approximate length of 80 m, width of 300 m and depths ranging between 6-29 m. This movement developed in the Precambrian aged Tenzile formation. This unit displays a rather heavily fractured-jointed structure with alteration zone reaching to a depth of 5 m. Mechanisms triggered this mass movement determined as geological, geotechnical and topographic properties of the units, along with intense rainfalls that have occurred in the region. According to findings obtained from inclinometer measurements made in 8 boreholes drilled by 5th Regional Directorate of Highways and field observations; this mass movement possibly started as rotational and then continued on the plane of weakness as a planar failure.*

Keywords: *D400 State Road (Antalya-Mersin), Rotational Slide, Mass Movement, Deformation Measurement, Kaledran*

1. GİRİŞ

Doğu Akdeniz Bölgesi'nin batı-doğu bağlantısını sağlayan en önemli karayolu 480 km'lik Antalya-Mersin D400 karayoludur (Şekil 1). Topoğrafik şartlara da bağlı olarak bu karayolunun Taşucu-Alanya kesimi tek şeritten oluşan ve oldukça zor ulaşım şartlarına sahip bir yol niteliğindedir. Kuzey kesimini Toros dağlarının oluşturduğu bu yolun güney kesiminde ise Akdeniz bulunmakta ve genellikle yol kotu denizden 50-250 m yüksekte yer almaktadır. Güvenli ulaşımın güçlükle sağlandığı bu yol güzergâhı yerine, hem Taşucu-Alanya arasındaki mesafeyi en aza indirecek hem de ulaşım güvenliğini azami şekilde sağlayacak alternatif bir güzergâh seçimine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, mevcut yola alternatif bir yol güzergâhı, Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü tarafından projelendirilmiş ve yapım çalışmalarına 2010 yılında başlanmıştır. Bölgenin jeolojik ve topoğrafik özellikleri dikkate alındığında, yeni yol güzergâhı üzerinde pek çok sanat yapısının da (tünel, viyadük, yol şevi, vs.) inşası kaçınılmaz olmuştur (Yüksel Proje, 2013). Özellikle zayıf kayaçlarda açılan bazı yol yarmalarında, dik topoğrafyaya ve malzeme özelliklerine de bağlı olarak yenilmeler gözlenmiş ve yolun bu kesimleri için önleme-iyileştirme çalışmalarına yönelik projeler hazırlanmaya başlanmıştır.

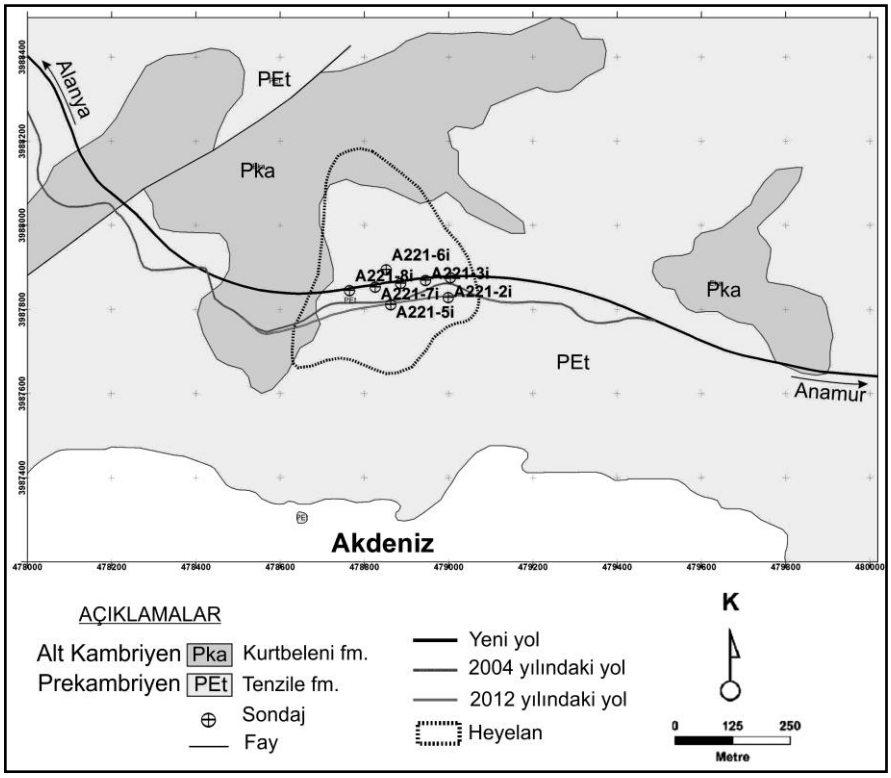


Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Bu çalışmada, Alanya-Anamur-Mersin yolunun 221+300–221+700 kilometreleri arasındaki Anamur-Kaledran mevkisinde meydana gelen kütle hareketinin tetikleyen unsurlar ve hareketin mekanizması ortaya konulmuştur.

2. ÇALIŞMA ALANIN JEOLOJİSİ

Çalışma alanı, Orta Toroslar'ın batı kesimlerinde, Anamur-Kaledran mevkisinde yer almaktadır. Orta Toroslar'da yapılmış çalışmalarda, tektonik birlikler, Alanya Tektonik Birliği, Aladağ Tektonik Birliği ve Antalya Tektonik Birliği olarak tanımlanmıştır. Bu birliklerin litolojik özellikleri, stratigrafisi ve yapısal özellikleri bakımından birbirinden farklı havzaları temsil ettikleri belirtilmiştir (İnan ve İnan, 2012). Alp orojenik kuşağı içerisinde yer alan Toroslar, litolojik ve yapısal özellikler bakımdan oldukça karmaşık bir tektonik ilişki sergilemektedir. Bölgede yürütülmüş pek çok çalışma olmakla birlikte, litolojik tanımlamalardaki ve formasyon isimlendirmelerindeki farklılıklar dikkat çekicidir.
Alanya-Anamur-Mersin yolunun 221+300–221+700 kilometreleri arasındaki Kaledran Mevkisinde yer alan otoyol şevinde meydana gelen kütle hareketi, Prekambriyen yaşlı Tenzile formasyonu içerisinde gelişmiştir. Üst Kambriyen-Ordovisiyen yaşlı Payallar formasyonuna benzer litolojik özelliklerinden dolayı bölgede kesin sınırları çizilemeyen Tenzile formasyonu sahanın güneybatı kesimlerinde yüzeylemektedir. Formasyon, dolomit ve mermer mercekli kuvarsit, metakumtaşı ve metasilttaşlarından oluşmaktadır. Birimin taban seviyeleri, gri, sarı, yeşilimsi ve mavimsi gri, kahve renkli kuvarsit ara bantlı, talklaşmış metasilttaşı ve şeylerle başlamaktadır. Bu seviyelerde kuvarsit ve ince çamurtaşı seviyeleri gözlenmektedir. Daha üst sevilerde ise kıvrımlı-kırıklı metasilttaşları yer yer dayklar ve siller tarafından kesilmektedir. Bu sokulumlara yakın yerlerde hidrotermal çözeltilere bağlı oluşumlar da (kükürt, pirit gibi) gözlenmektedir. Alt Kambriyen yaşlı kuvarsitlerin dokanaklarında küçük boyutlu dolomit ve mermer merceklerine rastlamak mümkündür. Tenzile formasyonunun alt dokanağı gözlenememekle birlikte, birimin üzerine Alt Kambriyen yaşlı Kurtbeleni formasyonu belirsiz bir uyumsuzlukla gelmektedir (Şekil 2). Bazı yerlerde birimin Üst Permiyen yaşlı Cebireis formasyonu tarafından açısal uyumsuz olarak üzerlendiği gözlenmektedir. Birimin silttaşlarından oluşması düşük enerjili şelf ve gel-git arası bir ortamı işaret etmektedir (Usta, 2001).

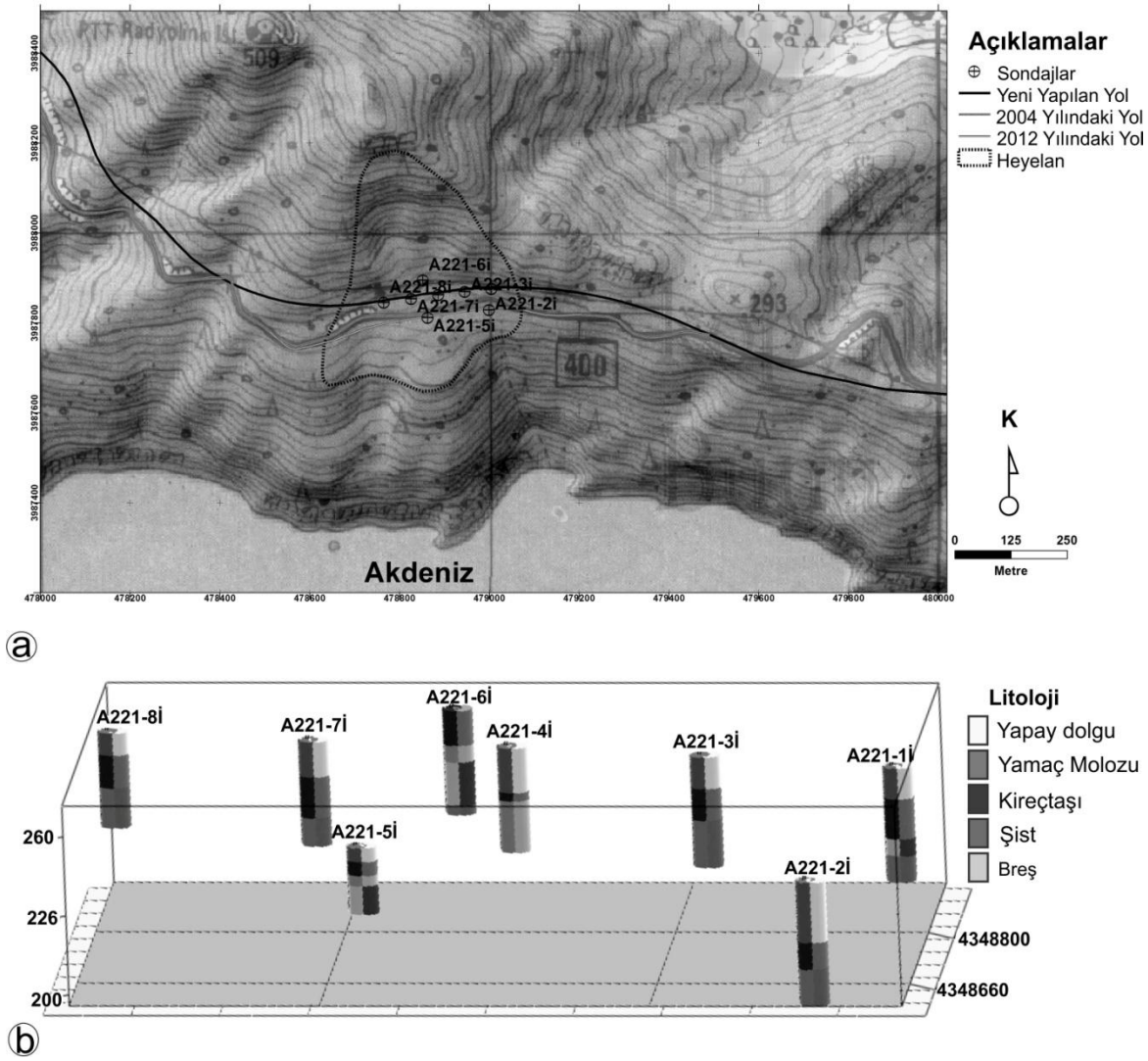


Şekil 2.İnceleme alanı ve yakın civarının jeoloji haritası (Usta, 2001).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu inşaatının 221+300 ile 221+700 kilometreleri arasındaki Kaledran mevkisinde meydana gelen kütle hareketi değerlendirilmiştir. Söz konusu hareket 2011 yılının Aralık ayında Prekambriyen yaşlı Tenzile formasyonu içerisinde gelişmiştir (Şekil 3). Kütle hareketi değerlendirilirken, Brunton 5010 tipi jeolog pusulası, Magellan Explorist XL el GPS'i, 1/25.000 ölçekli Alanya P29c4 paftası, 1/5.000 ölçekli hâlihazır harita, 1/1.000 ölçekli haritalar, çalışma alanını kapsayan 2012 yılına ait ortofotolar ile farklı tarihlere ait uydu görüntülerinden yararlanılmıştır.



Şekil 3.Kütle hareketinin, araştırma sondajlarının ve yolun 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritadaki konumu (a) ve araştırma sondajlarının dağılımı (b).

3.2. Yöntem

Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu inşaatı 221+300–221+700 kilometreleri arasında yer alan kütle hareketinin mühendislik jeolojisi haritası, 1994 yılına ait 1/25.000 ölçekli topoğrafik harita, uydu görüntüleri ve arazi çalışmaları ile oluşturulmuştur. Kütle hareketi haritalanırken, yüzeyde yer alan

gerilme çatlaklarının konumları ile ağaç halkalarındaki asimetri ve bu asimetrinin yönü Brunton 5010 tipi jeolog pusulası ile ölçülmüştür (Şekil 4). Ayrıca, ağaç halkalarında gözlenen asimetrik özelliklerden kütle hareketinin türünün belirlenmesi aşamasında da yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında, 1/1.000 ölçekli hâlihazır haritalar ve Aster uydu verilerinden yararlanılarak çalışma alanının sayısal yükseklik modeli oluşturulmuştur. Kütle hareketi derinliğinin ve kayma yüzeyinin belirlenmesi amacıyla, yapılmakta olan yol ekseninin her iki tarafında, derinlikleri 40 m'ye ulaşan 8 adet araştırma sondajı açılmıştır (Çizelge 1). Karotlu ilerleme şeklinde açılmış olan bu araştırma sondajlarında inklinometre düzenekleri kurularak 2012 yılının Ekim ayından 2013 yılı Mayıs ayına kadar deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

Şekil 4. Kütle hareketindeki gerilme çatlağı (a), hareketin geliştiği metasilttaşları (b) ve ağaç halkalarındaki asimetri (c).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan araştırma sondajlarının özellikleri

No.	X* (Sağa_Doğu)	Y* (Yukarı_Kuzey)	Z (Yükseklik) (m)	Sondaj Derinliği (m)	İnklinometre Tesis derinliği (m)
A221-1i	479004,39	3987875,20	256,72	36,00	36,0
A221-2i	478998,99	3987828,12	235,53	39,00	39,0
A221-3i	478945,00	3987868,97	256,05	34,50	34,5
A221-4i	478886,00	3987861,97	254,95	33,00	33,0
A221-5i	478862,35	3987810,82	237,80	21,00	16,5
A221-6i	478852,00	3987893,97	252,69	33,00	33,0
A221-7i	478826,00	3987852,97	253,60	33,00	33,0
A221-8i	478765,00	3987844,18	252,55	30,00	30,0

***** Koordinatlar UTM ED1950 6°'lik koordinat sistemine göredir.

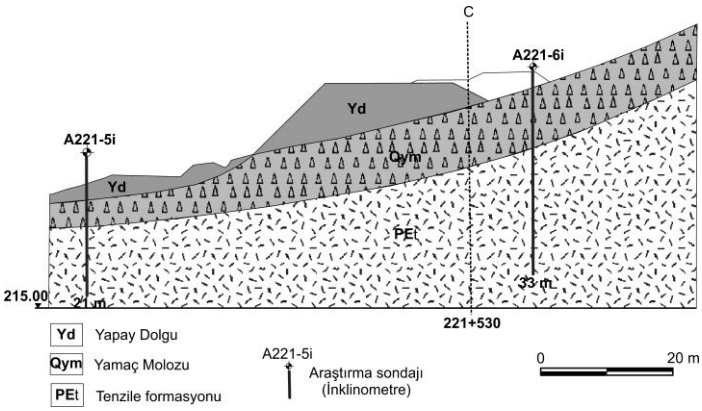
4. KÜTLE HAREKETİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Kütle Hareketinin Türü ve Yönü

2011 yılı Aralık ayında Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu inşaatı 221+300–221+700 kilometreleri arasında oluşan kütle hareketi, Varnes (1978)'a göre düzlemsel bir kayma olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, kütle hareketini tetikleyen en önemli unsurun inşası devam eden yol dolgusu ve yol kazısı olduğu belirlenmiştir. Bu değerlendirme yapılırken, mevcut yol inşasının kuzeyinde yer alan gerilme çatlağının doğrusal bir konum izlediği ve kütle hareketinin taç kısmından geçen orman yolu yarmasında mostra veren metasilttaşlarındaki foliasyon düzlemlerinin 120º/28º konumlu olduğu dikkate alınmıştır. Söz konusu hareket, Zaruba ve Mencl (1969)'a göre derin-çok derin olarak değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, kütle hareketinin gövdesinin orta seviyelerinde ve taç bölgesine yakın seviyeler arasında yer alan kesimde, kesilmiş ağaç halkalarında asimetrik bir durum gözlenmiştir (Şekil 3 ve 4). Ağaç halkalarındaki asimetri eksenine göre, hareket 160º yönünde meydana gelmiştir. Arazi verileri, topoğrafik haritalar, ortofoto ve uydu görüntüleri kullanılarak haritalanan kütle hareketinin uzun ekseni ile ağaç halkalarındaki yönler birbirleri ile uyumluluk göstermektedir.

4.2. Kütle Hareketinin Mekanizması

Kütle hareketinin gözlemlendiği Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu inşaatının 221+300–221+700 kilometreleri arasındaki kütle hareketinin mekanizmasının açıklanması amacıyla farklı tarihli uydu fotoğrafları, topoğrafik haritalar, arazi gözlemleri ve 8 adet araştırma sondajına yerleştirilen inklinometre ölçümleri değerlendirilmiştir. Karayolu inşaatının 221+300–221+700 kilometreleri arasının eski bir heyelan kütlesi üzerinde yer aldığı, Harita Genel Komutanlığı tarafından üretilen ve 1989 yılında basılan 1/25.000 ölçekli Alanya P29c4 paftasında görülmektedir. Söz konusu alandaki eş yükselti eğrileri iç bükey ve dış bükey bir konum sergilemekte olup, düz bir alandan geçen eski yolun bu kesiminde, kütle hareketinin hareket yönünde küçük bir dış bükey yapı oluşmuştur (Şekil 3). 10 m çözünürlüklü sayısal arazi modelinde de yolun kütle hareketinin gövdesinden geçtiği, yolun kuzey kesiminde topoğrafyanın dikleştiği ve yüzey morfolojisinde bir çukurlaşmanın oluştuğu belirlenmiştir. Arazi çalışmaları ile farklı tarihlere ait uydu görüntüleri, topoğrafik harita ve ortofotodan yararlanılarak kütle hareketi 1/1.000 ölçekli olarak haritalanarak mühendislik jeolojisi haritası oluşturulmuş ve arazi ve sondaj verileri kullanılarak enine jeolojik kesitler alınmıştır (Şekil 2 ve 3). Kütle hareketinin kayma derinliğini ve türünü belirlemek amacıyla açılmış olan 8 adet araştırma sondajına inklinometre tesisi kurularak deformasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5, Çizelge 2). Ekim 2012 ile Mayıs 2013 tarihleri arasında her bir kuyuda 50 cm'de iki eksen yönünde gerçekleştirilen deformasyon ölçümlerine göre tüm sondaj kuyularında bir hareketin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Kütle hareketinin gözlendiği alandaki jeolojik profil, yol ekseni ve inklinometre kuyularının ilişkisi.

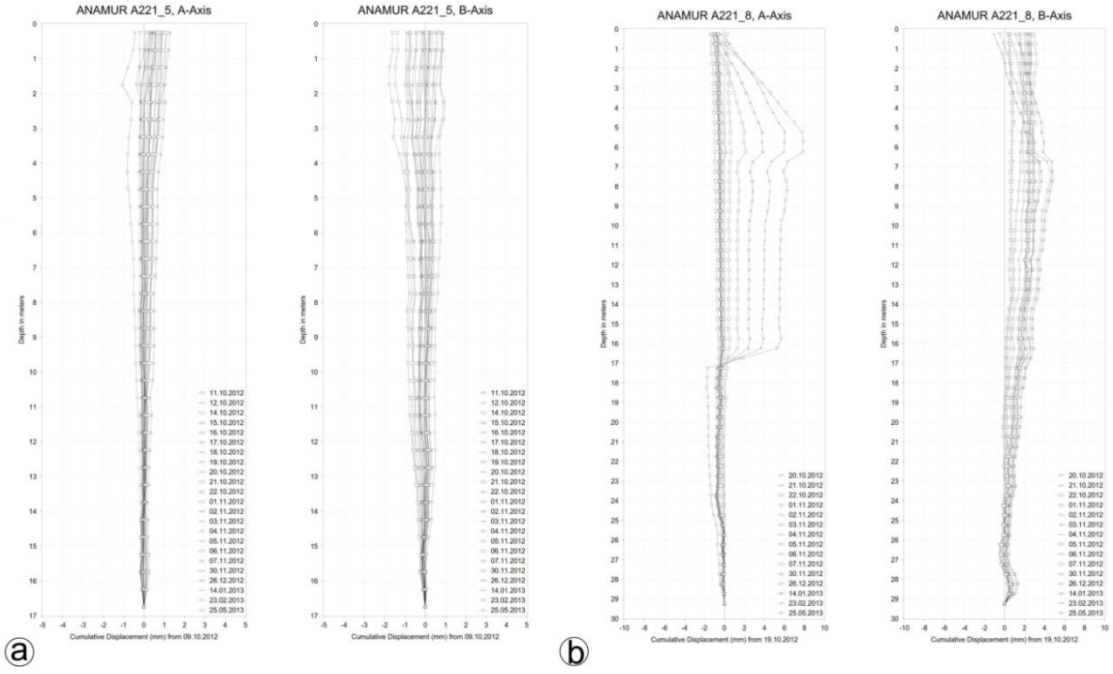
Çizelge 2. Araştırma sondajlarındaki inklinometre okumaları (Yüksel Proje, 2014)

Sondaj No.	İnklinometreTesis Derinliği (m)	Kayma Hareketi			
		Ölçüm Süresi (gün)	Kayma Derinliği (m)	Kayma Miktarı (mm)	Hareket Hızı (mm/gün)
A221-1i*	36,0	54	6,20	48,10	0,57
A221-2i**	39,0	134	30,50	48,41	0,36
A221-3i	34,5	231	-	-	-
A221-4i	33,0	222	-	-	-
A221-5i	16,5	226	-	-	-
A221-6i	33,0	219	-	-	-
A221-7i	33,0	219	11,13	13,7	0,06
A221-8i	30,0	218	6,80 17,10	8,24 6,50	0,04 0,03

* İnklinometre kuyusunun 14 Ocak 2012 tarihli okumada kayma nedeniyle kesildiği belirlenmiştir.
** İnklinometre kuyusunun 25 Mayıs 2013 tarihli okumada kayma nedeniyle kesildiği belirlenmiştir.

A221-8i nolu sondaj kuyusunda gerçekleştirilen inklinometre okumalarına göre yüzeyden itibaren 6,80 m ve 17,10 m'lerde iki farklı hareketin olduğu; 6,80 m ve 17,10 m'ler arasındaki tüm kütlenin 17,10 m'den geçen bir düzlem üzerinde hareket ettiği belirlenmiştir (Şekil 6). Oluşan kütle hareketi, Tenzile formasyonuna ait yoğun eklemli metasilttaşlarının foliasyon düzlemleri üzerinde, 160º yönünde ve düzlemsel kayma şeklindedir. Arazi çalışmalarından ve inklinometre okumalarından, düzlemsel kayan bu kütle üzerinde yer alan yamaç molozu ve yapay dolguda da düzensiz ikincil kaymaların oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5).

Yeni yol çalışmalarının pasif kütle hareketinin merkezinde kuvvet artışı oluşturması, bol eklemli metasilttaşı-metakumtaşı birimlerinin foliasyon düzlemlerinin 30º ile güneydoğuya eğimli olması ve 2011 yılının Aralık ayında bölgede hâkim olan yağışların etkisiyle (DMİ, 2006) yeraltı suyu seviyesinin yükselmesi pasif haldeki kütle hareketinin tekrar aktif hale gelmesine neden olmuştur.



Şekil 6. A221-5i (a) ve A221-8i (b) sondaj kuyusuna ait inklinometre okumaları

5. SONUÇLAR

Yapım çalışmaları 2010 yılında başlayan Alanya-Anamur-Mersin Devlet Karayolu inşaatının 221+300– 221+700 kilometreleri arasında, 2011 yılının Aralık ayında oluşan kütle hareketinin türü ve kayma mekanizmasının ortaya konması amacıyla arazi ve büro çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ışığında;

1) 2011 yılında oluşan kütle hareketinin yerinin eski bir heyelan alanı olduğu, topoğrafik harita, farklı tarihlere ait uydu görüntüsü ve ormanlık alandaki ağaçlarda gözlenen deformasyonlardan yararlanılarak ortaya konmuştur.

2) İnceleme alanında, Prekambriyen yaşlı başlıca metasilttaşı ve metabazitlerden oluşan Tenzile formasyonunun, mermer mercekli kuvarsit, mavimsi gri, sarımsı kahve yer yer kurşuni yeşil renkli talklaşmış metasilttaşı ve şeyleri yer almaktadır. Oluşan kütle hareketi, bol eklemli ve metamorfik nitelikli litolojinin foliasyon düzlemleri boyunca gelişmiştir.

3) Kütle hareketinin türünün ve derinliğinin belirlenmesi amacıyla 8 farklı noktada toplam 262,5 m uzunluğunda karotlu araştırma sondajları açılmış ve inklinometre tesisleri kurularak gerçekleştirilen deformasyon ölçümleri sonucunda, kütle hareketinin düzlemsel olduğu belirlenmiştir.

4) Deformasyon hareketlerini değerlendirmek amacıyla yerleştirilmiş olan inklinometre tesislerinin bazılarının heyelan nedeniyle deforme olmasından dolayı, kütle hareketinin halen devam ettiği sonucuna varılmıştır.

5) Yeni yol çalışmasının eski heyelan üzerinde oluşturduğu kuvvet artışı ve 2011 yılının Aralık ayında bölgede hâkim olan yağışlar, yeraltısuyu seviyesinin artmasına ve pasif haldeki kütle hareketinin tekrar aktif hale gelmesine neden olmuştur.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar; çalışmalar sırasında gösterdikleri kolaylık ve destek için Ergünler Yol Yapı Ltd. çalışanlarına; Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı'na ve Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

DMİ, 2006. Mersin meteoroloji raporu, Mersin.

İnan, S. ve İnan, N., 2012. Silifke'den Anamur'a jeolojik bir rota. 65. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri Kitabı, Ankara, s. 332-333.

Usta, D., 2001. Anamur-Bozyazı Dolayının Jeolojisi: Alanya P 29-c2-c3-c4 paftaları. MTA, Rapor No: 10485, Ankara.

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides analysis and control. TRB, National Research Council, Washington D.C., 12-33.

Yüksel Proje, 2013. Erdemli – Silifke – Taşucu – 13.Bölge Hududu Yolu Anamur-Kaledran arası 220+560-221+700 kesimi stabilite sorunları jeoteknik araştırma raporu, Ankara, 412s.

Yüksel Proje, 2014. Erdemli – Silifke – Taşucu – 13.Bölge Hududu Yolu Anamur-Kaledran arası KM:221+300 -221+700 kesimi geoteknik proje raporu, Ankara, 176s.

Zaruba, Q. ve Mencl, V., 1969. Landslides andTheir Control. Elsevier, Amsterdam.

Ihlara Vadisi (Aksaray) Boyunca Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi

Assesment of Rock Falls Along the Ihlara Valley (Aksaray)

M. Taşpınar[1,*], A. Yalçın[1]

[1] *Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Aksaray*
*(*muzeyyentaspinar@aksaray.edu.tr)*

ÖZ: Ihlara Vadisi'nin turistik bir bölge olması ve her yıl yüz binlerce turistin vadiyi ziyaret etmesi sebebiyle kütle hareketlerinden kaynaklanacak tehlikelerin önlenmesi, hiç istenmeyen can kayıpları ve yaralanmaların olmaması adına çok büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, süreksizlik özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde belirlenmesi için; yüzlek taraması ve hat etütleri yapılarak süreksizliklerin türü, durumu, aralığı, açıklığı, yönelimi, devamlılığı, eklem sıklığı takım sayısı, dolgu malzemesi, pürüzlülük ve dalgalılığı, su sızıntıları ve blok boyutları ile ilgili veriler toplanmıştır. Yerinde dayanım deneyleri, düşme analizlerinde kullanmak üzere geri verme katsayıları ile kaya bloklarının sürtünme açılarının belirlenmesi için blok düşürme ve eğimlendirme deneyleri yapılmıştır. Ihlara Vadisi boyunca Kızılkaya ignimbiritlerinden oluşan yamaçlarda meydana gelen kaya düşmesi iki boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiş ve farklı blok boyutlarına göre değişik kaya düşme senaryoları oluşturulmuştur. Blok düşürme analizlerinden elde edilen; blokların gidebildikleri en uzak mesafe, yatay hız ve toplam kinetik enerji miktarları yorumlanarak, kaya düşmelerinden etkilenebilecek alanlar belirlenmiş ve tehlikeli bölgeler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ihlara Vadisi, Kaya Düşmesi, İki Boyutlu Modelleme

ABSTRACT: *Since the Ihlara Valley is a tourist attraction territory and hundreds of thousands of tourists visiting the valley each year, preventing the hazards caused by mass movements is significant. Thus undesirable life losses and injuries will not occur. In this study, for the purpose of determining detailed joint features like type, condition, spacing, persistan, orientation, density and number of joints, filling material, roughness and waviness of the joint surface, water leakage and block dimensions data were collected. In-situ strength tests were carried out to adjust the cofficient of restitutions to use in the rockfall analysis, rock falling and tilt tests to assess the friction angle of the slopes. Rock falls of the Kızılkaya ignimbrite expected through the Ihlara Valley were modelled via two dimensional rock fall analysis and different falling scenarios were created considering different block size. Probable impacted territories are assigned by interpreting the endpoints of the blocks, horizontal velocity and total kinetic energy values obtained from the analysis and risk territories were determined.*

Keywords: *Ihlara Valley, Rock Fall, Two Dimensional Modelling*

1. GİRİŞ

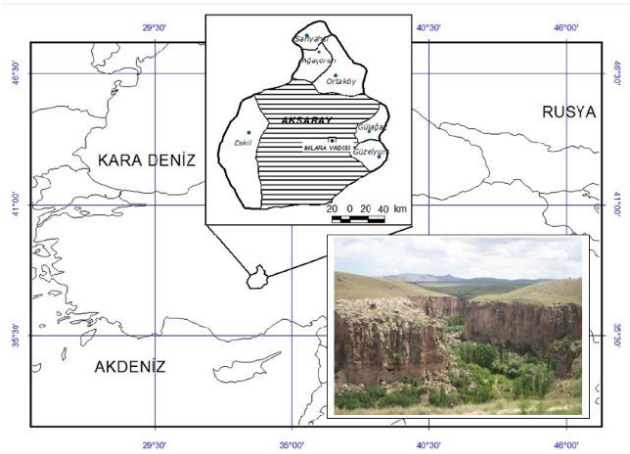
Doğal afetler, jeolojik ve meteorolojik sebeplere bağlı olarak meydana gelen, çoğunlukla insan kontrolü dışında gerçekleşen, can ve mal kaybına sebep olan tehlikeli ve genellikle büyük çaplı doğal olaylardır. Türkiye'de genel olarak jeolojik ve iklimsel özelliklerin yanı sıra jeomorfolojik özellikler de doğal afetlerin oluşmasında etkin rol oynamaktadır. Genel adıyla kütle hareketleri; doğal afetlerin en çok can ve mal kaybına ve hasarlara yol açan türüdür. Ülkemizde meydan gelen doğal afetlerin %45'i, afetzedelerin ise %21'i heyelan kaynaklıdır. Bununla birlikte olay sayısı ve verdiği zarar göz önüne alındığında kaya düşme ve devrilmelerinin sebep olduğu kayıp ve hasarlar da azımsanamayacak derecede önem arz etmektedir. Kaya düşmelerinin doğal afetler içindeki oranı %10 olup, etkilenen afetzedelerin oranı ise %7'dir (AFAD, 2008).

Kaya düşmeleri ve devrilmeleri, dik kazı şevlerinden, deniz, göl, vadi kenarlarındaki falez ve dik yamaçlardan, yer altı kazı ve mağara tavanlarından değişik büyüklükteki kaya ya da toprak parçalarının yerçekimi ve çeşitli etkilerle aşağıya düşmesi ve devrilmesi olayıdır. Farklı litolojilerde

değişik şekil ve etkilerle meydana gelen kaya düşme ve devrilmeleri; jeolojik ve jeomorfolojik özelliklerinden dolayı Kapadokya bölgesinde sıklıkla görülmektedir (Zorlu vd., 2011). Kapadokya bölgesi'ndeki Ihlara Vadisi de; üstte yüksek dayanıma sahip ignimbiritler, altta ise daha yumuşak ve aşınmaya eğimli tüflerin bulunmasından dolayı kaya düşme ve devrilmeleri açısından yüksek derecede risk taşıyan bir bölgedir.

Kapadokya'nın giriş kapısı niteliğindeki Ihlara Vadisi (Şekil 1) , içerisinde yaklaşık 5000 adet ev ve kayadan oyma mekan 105 adet tarihi kilise bulundurmaktadır. Ayrıca vadi yıllık ortalama 400.000 yerli ve yabancı turistin ziyaret ettiği bir cazibe merkezidir. Vadi, Konya Kültür ve Tabiat Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 10.10.1991 gün, 1150 sayılı kararı ile I. II. ve III. derece arkeolojik ve doğal sit alanı olarak ilan edilmiştir. Burası aynı zamanda 22.10.1990 tarih ve 90/ 1117 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile özel çevre koruma bölgesi olarak ilan edilmiştir. Ayrıca Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü Ihlara Vadisi'nin UNESCO Dünya Mirası Geçici Listesi'ne önerilmesi çalışmalarına da başlamıştır. Bu kapsamda da vadinin ziyarete açık kesimlerinde can ve mal güvenliği ile ilgili problemlerin olup olmadığı, vadinin doğallığının korunması ile birikte sayısal haritaların temini gibi bu çalışmada ortaya konulacak veriler UNESCO Dünya Mirası Geçici Listesi çalışmaları için gerekli bilgilerden bazılarıdır.

Dolayısıyla bu yönde yapılacak olan mühendislik çalışmaları gerek yerleşim yerlerini gerek insan yaşamını ve gerekse bölgenin turizm potansiyelini ve doğal miras alanlarını korumak ve gelecek nesillere taşımak açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, vadi boyunca yapılan arazi çalışmalarıyla süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya blokları belirlenmiştir. Bu kapsamda ve meydana gelebilecek olası kaya düşmeleri tespit edilerek yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler ışığında Rocfall v4.0 (Rocscience, 2002) programı kullanılarak düşmelerin iki boyutlu modellemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre düşme ve devrilme tehlikesi olan alanlar belirlenerek, belirlenen tehlike durumlarına göre çözüm önerileri sunulmuştur.



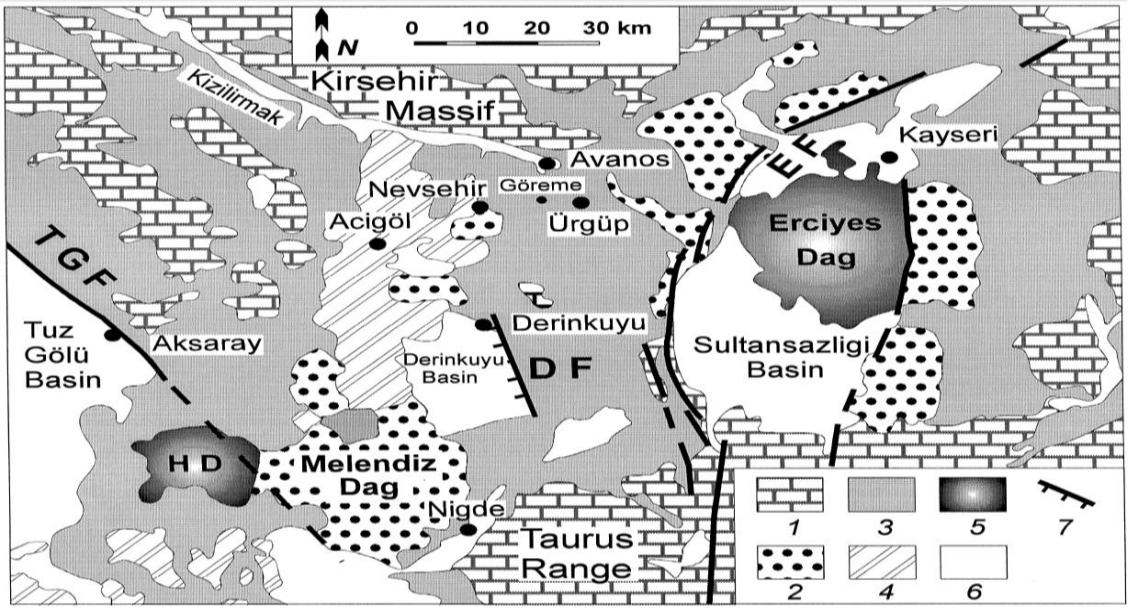
Şekil 1. Çalışma alanın konumu

2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL JEOLOJİSİ

Bölge jeolojik olarak, Kapadokya Bölgesi'ndeki Erciyes, Hasandağı ve Göllüdağ volkanlarının etkisiyle oluşmuş ve bu volkanların püskürmesi Üst Miyosen'de (10 milyon yıl önce) başlayıp, Pliyosen'e (2 milyon yıl önce) kadar devam etmiştir. Neojen gölleri altındaki yanardağlardan çıkan lavlar, plâto, göller ve akarsular üzerinde 100 - 150 m kalınlığında, farklı sertlikler halinde tüf seviyesini oluşturmuştur. Bu tabakanın bünyesinde tüften başka tüfit, ignimbirit tüf, lahar, volkan külü, kil, kumtaşı, marn, aglomera ve bazalt gibi jeolojik kayaçlar bulunmaktadır (Şekil 2). Çalışma alanında ise bu birimlerden Kızılkaya ignimbiritleri ve Selime tüfleri geniş alanları kaplamaktadır.

2.1. Kızılkaya İgnimbiriti

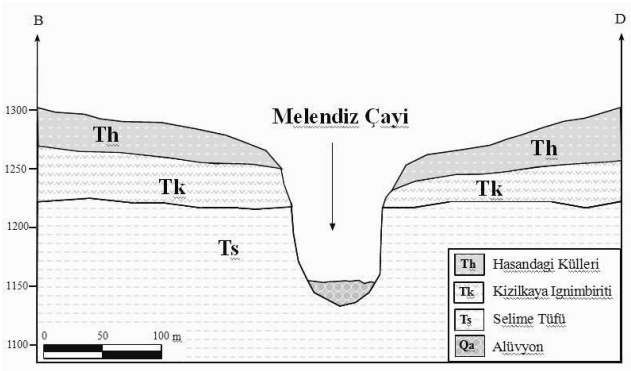
Kızılkaya ignimbiritlerinin tip yeri Kızılkaya ve çevresidir. Çalışma alanında da sıkça rastlanan birim, Taşkestik Tepe, Kanlıkaya Tepe, Ortasey Tepe, Boztepe ve Kayabaş Tepe, Akhisar ve Boğazköy yörelerinde yüzeylenmiştir (Temel vd.,1998). Bu ignimbirit genel olarak beyaz ve açık gri dış görünüme sahip olmakla birlikte, ayrışma yüzeyleri pembemsi renk almıştır. Riyodasit ile andezitik bileşimli olan birim, düşey yönde gelişen soğuma çatlakları nedeniyle sütunsu bir yapı gösterir. Taban seviyesinde boyutları 30- 40 cm'ye varan pürüzlü ve sık dokulu süngertaşı parçaları içerir. Üst kesimlere doğru süngertaşı parçalarının oranı azalır, gevşek dokulu ve homojen görünümlü bir hal alır. Birim genç tektonikten etkilenmiş olup, KB-GD gidişli Tuz Gölü Fayı'nın doğrultusuna paralel konumlu eğim atımlı normal faylarla kesilmiştir. Fay düzlemi B-GB yönünde eğimlidir. Kızılkaya ignimbiritinde düşey yönlü gelişen soğuma çatlakları altta daha duraysız birimlerin varlığının da etkisiyle zaman zaman kaya bloklarının düşmesine sebep olmuştur. Kaya düşmesi tehlikesi günümüzde de söz konusudur. Kızılkaya ignimbiritlerinin yaşı K/Ar yöntemi ile 4.9-5.5 milyon yıl olarak saptanmıştır (Batum, 1975).



Şekil 2. Kapadokya bölgesinin genel jeoloji haritası (1; Temel kayaları, 2; Miyosen-Pliyosen volkanik karmaşığı (bazalt-riyolit), 3; ignimbiritler ve karasal çökeller, 4; Kuvaterner volkanikleri (maar, domlar, lav akıntıları, cüruf konileri, riyolit ve bazaltlar), 5; Büyük Kuvaterner volkanikleri, 6; Alüvyonlar, Fay) (Temel vd., 1998'den alınmıştır)

2.2. Selime Tüfü

Kuzeybatıda Kızılkaya çevresinden başlayarak doğuya doğru dar alanlarda gözlenen birim genellikle pembe-beyaz renkteki tüflerle temsil edilir. Tüfler Neojen yaşlı birimler içerisinde peribacaları oluşturmuştur. Bu peribacaları uzun mesafeler boyunca kesiksiz devam etmekte ve birimi karakterize etmektedir. Kalınlıkları birkaç metreden 100m'ye kadar değişmektedir (Şekil 3). Kuzeyde Göstük Köyü çevresinde (0.5- 1 m) kalınlıkları çok azdır. Tüfler üzerine gelen Kızılkaya ignimbiritleri ile birlikte aşındıkları için masa şekilli tepeler meydana gelmiştir. Yaprakhisar ve Acıgöl mevkilerinde daha yaygın gözlenen peribacaları Kızılkaya ignimbiritlerinin koruyucu etkisiyle oluşmuştur. Kırık düzlemler boyunca ve soğuma çatlaklarından sızan suların sebep olduğu aşındırma sonucu bloklar piramit şeklini almıştır. Birim, Kızılkaya ignimbiriti tarafından uyumlu olarak örtülüp Uzunkaya formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmekte ve yaşı ise Alt Pliyosen olarak belirtilmektedir (Pasquare vd., 1988).

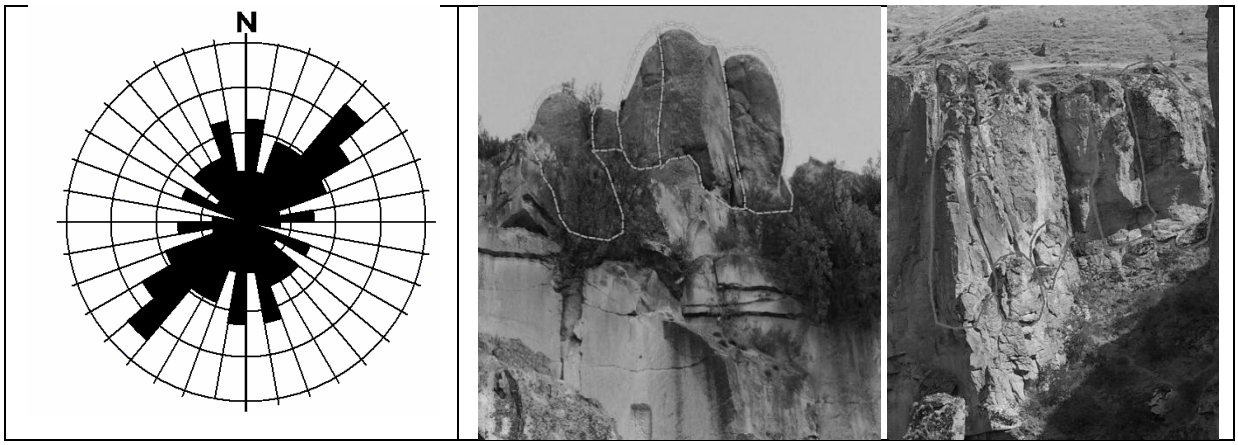


Şekil 3. Ihlara vadisi genelleştirilmiş jeoloji kesiti

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

3.1. Süreksizliklerin Karakterizasyonu

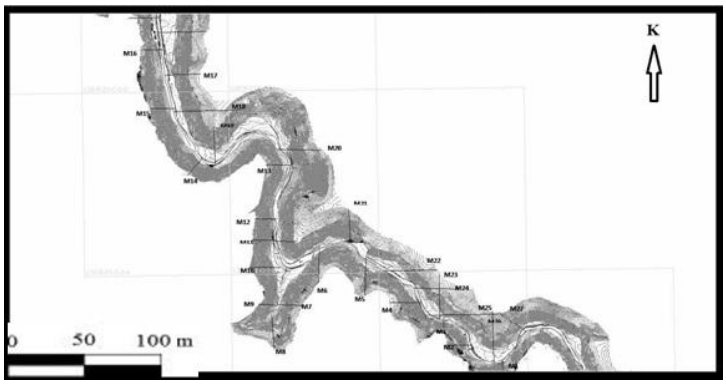
Ihlara Vadisi boyunca meydana gelmiş ve gelebilecek kaya düşmeleri başlıca tabanda gevşek Selime tüfü ve bu birimi üzerleyen Kızılkaya ignimbiritlerinin litolojisi ve süreksizliklerin kontrolünde gerçekleşmektedir. Süreksizlik çalışmaları yüzlek tarama ve hat etüdü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarla blok boyutları, süreksizliklerin türü, konumu, açıklığı, devamlılığı, dolgu malzemesinin türü, bozunmanın derecesi, yüzey pürüzlülüğü ve su durumu ile ilgili bilgiler toplanmıştır (Şekil 4). Hakim süreksizliklerin KB-KD doğrultulu ve dike yakın eğimli olduğu tespit edilmiştir.



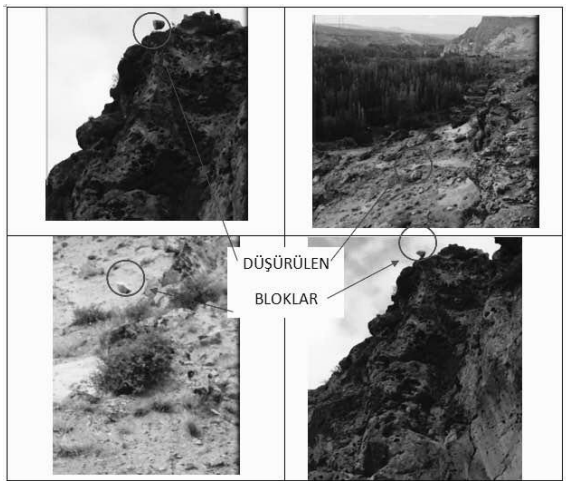
Şekil 4. Hakim süreksizliklerin durumları ve düşme tehlikesi olan bloklar

3.2. Blok Düşürme Gözlemleri

Arazi çalışmaları kapsamında inceleme alanı içerisinde farklı lokasyonlarda (Şekil 5) blok düşürme deneyleri yapılarak video kaydı yapılmıştır (Şekil 6). Boyutları kaydedilen blokların ağırlıkları, düşme mesafeleri, çarpma hızları, kinetik enerjileri vb. veriler videolar yardımıyla elde edilmiştir ve Rocfall v4.0 programıyla yapılan modellemelerin verdiği sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. Modellenen vadi yamaçlarının en kesit güzegahları ve blok düşürme gözlemlerinin yapıldığı yerler



Şekil 6. Blok düşürme deneyleri

3.3. Eğimlendirme Deneyi

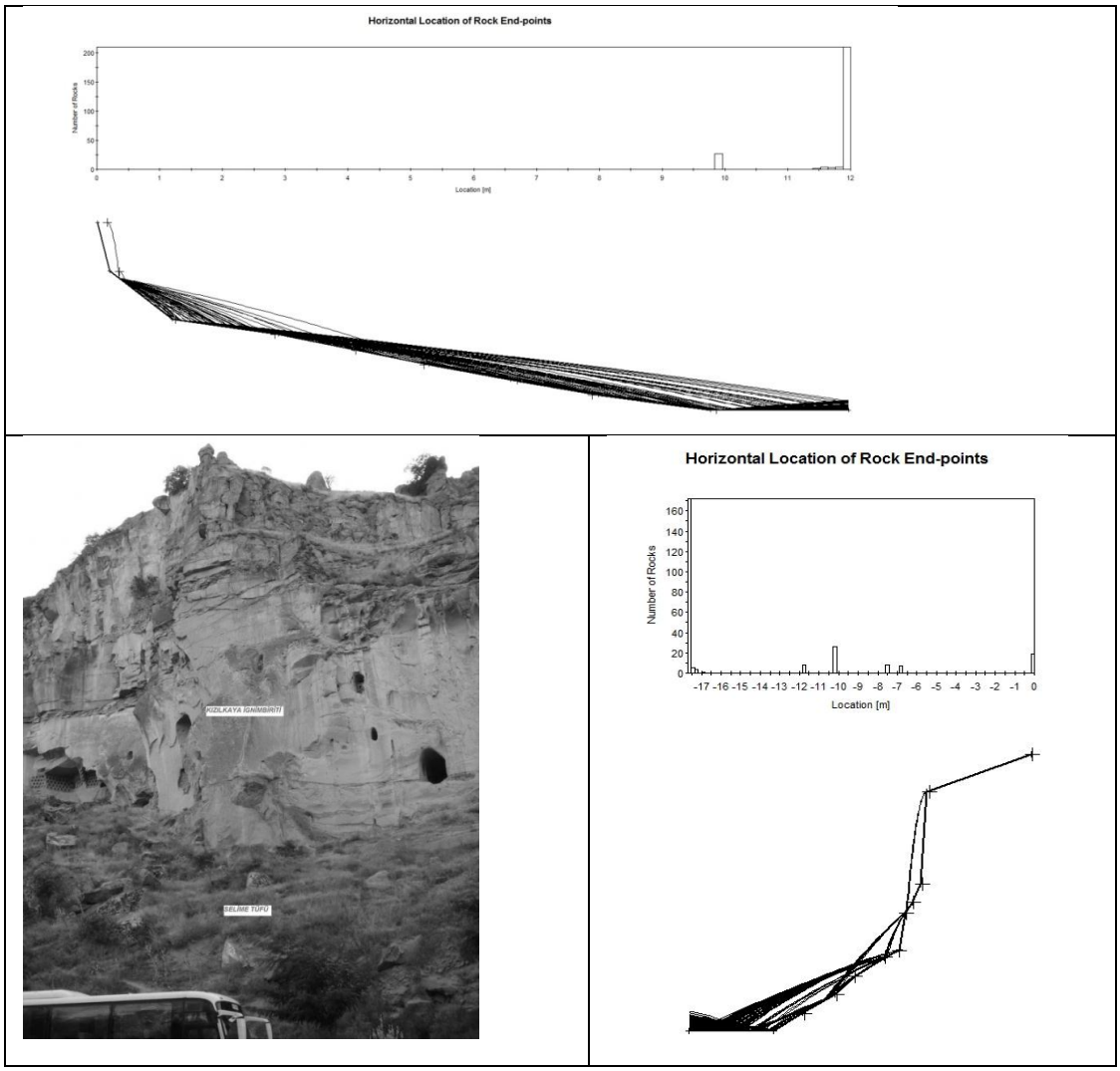
Blok modellemesi yapılacak lokasyonlardan alınmış kaya örnekleri, laboratuvarda elmas testereyle kesilerek düz yüzeyler elde edilmiş, 1m uzunluğunda tahta bir düzeneğe yerleştirilen tabanı düzlenmiş bir kaya bloğu üzerinde kaydırılmış ve düşmeye başladığı andan itibaren tahta düzeneğin yatay düzleme mesafesi ölçülmüş, trigonometrik hesaplamalar sonucu içsel sürtünme açısının 29-36 derece arasında değiştiği bulunmuştur (Şekil 7).

Test No	İçsel Sürtünme Açısı (Φ)
1	30.2
2	31.8
3	36.2
4	33.0
5	33.7
6	29.6
7	36.0
8	29.4
9	34.8
10	34.3

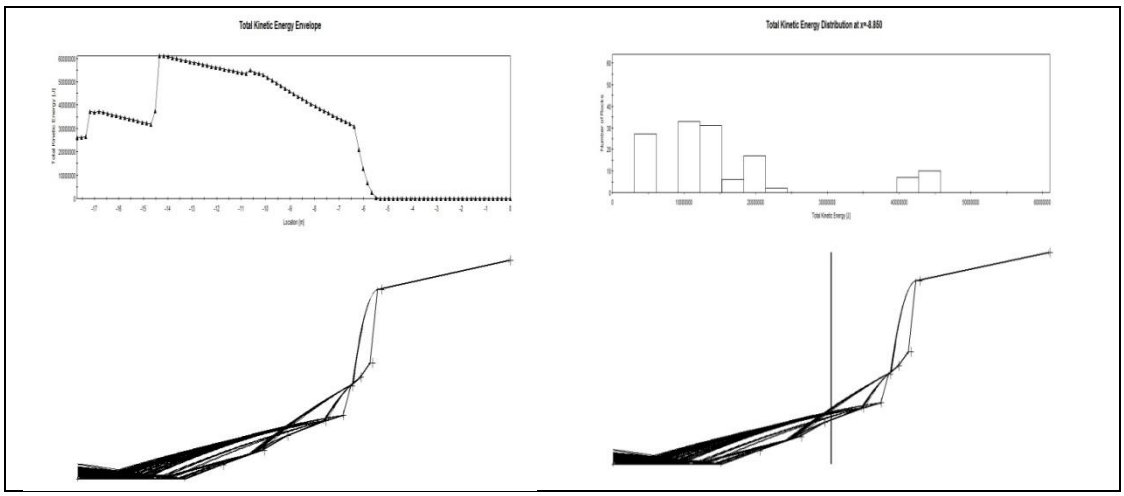
Şekil 7. Tilt deneyi ve sonuçları

Çizelge1. Kaya düşmesi analizlerinde kullanılan parametreler

Parametre	Değer
Min. hız kesme	0.1 m/sn
Kayacın yoğunluğu	1932 kg/m^3
Normal geri verme katsayısı (R_n)	0.75
Teğetsel geri verme katsayısı(R_t)	0.98
İçsel sürtünme açısı (Φ)	35°
Standart sapma (St)	2
Yüzey pürüzlülüğü	2



Şekil 8a. Kaya bloklarının gidebileceği en uzak mesafenin tespit edilmesi



Şekil 8b. Kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri, toplam kinetik enerjileri ve bu parametrelerin Dağılımı

4. SONUÇLAR

Vadi boyunca 32 farklı noktada çalışma yapılmış, bunlardan 10 farklı özellik gösteren lokasyondan alınan örneklerden elde edilen veriler kullanılarak kaya düşme modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmalarında, vadi boyunca düşme tehlikesine sahip bloklar tespit edilmiştir. Kaya bloklarının boyutları, ağırlığı, normal ve teğetsel geri verme katsayıları ve içsel sürtünme açıları tespit edilerek modellemelerle bu blokların gidebilecekleri en uzak mesafeler, sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerjileri ve bu parametrelerin dağılımı belirlenmiştir (Şekil 8 a,b). Sayısal modellemesi yapılan kaya blokları, Ihlara Vadisinin dik topoğrafyasından dolayı genelde vadi içine kadar ulaşmaktadır. Vadi içerisinde turist yoğunluğunun fazlalığı ve yürüyüş güzergahlarının da genelde dik yamaç eteklerinde olması tehlikeyi daha da artırmaktadır. Dolayısıyla düşme tehlikesi olan bloklara yönelik iyileştirme çalışmalarının yapılması çok büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda düşme tehlikesi olan blokların düşürülmesi, uygun olanların çelik halatlarla ve/veya kaya saplamalarıyla tutturulması ve çelik ağ gerilmesi gibi önlemlerin alınması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

AFAD, 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri.

Batum, İ., 1975. Petrografhische und geochemisce under sunchungenin den vulkangeibeten Göllüdağ and Acıgöl (Zentraloratolie, Turkei). Doktora Tezi, Albert-Luawinas Üniv., Friburg, Almanya.

Pasquare, G., Poli, S., Vezzoli, L., Zanchi, A., 1988. Continental arc volcanism and tectonics setting in Central Anatolia, Turkey. Tectonophysics, 146, 217–230.

Rocscience, 2002. Rocfall-computer program for risk analysis of falling rocks on steep slopes. Version 4.0, Toronto.

Temel, A., Gundogdu, M.N., Ground, A., Le Pennec, J.L., 1998. Tuffs of Cappadocia (Central Anatolia; Turkey): petrology and geochemistry Journal of Volcanology and Geothermal Research, 85, 447– 471.

Zorlu, K., Tunusluoglu, M.C., Gorum, T., Nefeslioglu, H.A., Yalcin, A., Turer, D., Gokceoglu, C., 2011. Land form effect on rock fall and hazard mapping in Cappadocia (Turkey). Environmental Earth Science, 62(8), 1685-1693.

Doğu Akdeniz Bölgesinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi

Landslide Susceptibility Assessment of the Eastern Mediterranean Region Using Artificial Neural Network Method

S. Tekin[1,*], T. Çan[1], T. Mazman[1], T. Y. Duman[2]

[1] Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı, Adana
[2] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı 06800 Çankaya/Ankara
*(*senemtekin01@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Doğu Akdeniz bölgesi içerisinde yeralan Karaman, Mersin, Adana, Osmaniye ve Hatay il sınırlarını kapsayan toplam 50641km^2'lik bir alanda, yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak heyelan duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. MTA tarafından hazırlanan Türkiye Heyelan Envanter veritabanına göre çalışma alanında heyelan alanı 549 km^2 olan 1451 adet heyelan haritalanmıştır. Duyarlılık değerlendirmelerinde heyelanları hazırlayıcı faktörler olarak litoloji gruplarının yanısıra, 300 m mekansal çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli, yamaç eğimi, kesit, düzlem ve teğetsel yamaç eğrilikleri, pürüzlülük indeksi, eğim-yamaç yönelimi oranı, yüzey röliyef oranı olmak üzere, toplam 9 adet değişken kullanılmıştır. Elde edilen duyarlılık haritalarının performans değerlendirmeleri başarı-tahmin eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre analiz, test ve doğrulama veri setlerinde heyelanların % 84-86'sının, orta–çok yüksek duyarlı alanlarda yeraldığı gözlenmiştir. Yüksek ve çok yüksek duyarlı alanların çalışma alanının % 17'sine karşılık geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Envanter, Heyelan Duyarlılığı, Yapay Sinir Ağları, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Doğu Akdeniz

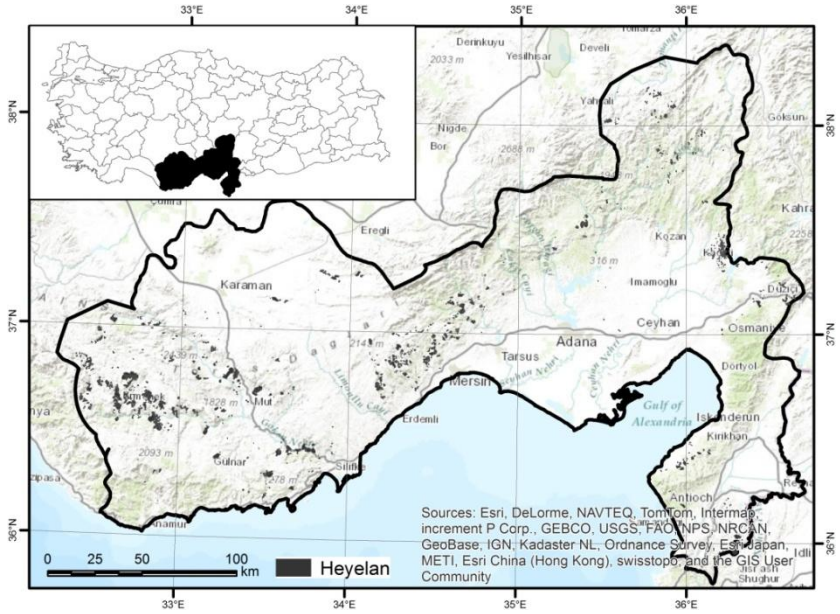
ABSTRACT: *In this study, landslide susceptibility assessment using artificial neural network method was implemented in an area of 50641km^2 corresponding to Karaman, Mersin, Adana, Osmaniye and Hatay administrative divisions located in the eastern Mediterranean region. According to the Turkish Landslide Inventory database prepared by MTA, 1451 landslides covering 549 km^2 were identified in the study area. A total of nine independent variables for the landslide conditioning factors were used in the susceptibility assessments, being as lithological groups, digital elevation model, slope, profile, plan, and tangent curvatures, roughness index, slope/aspect ratio, surface relief ratio. The prediction-success rate curves were considered during the performance evaluations of the landslide susceptibility maps. Accordingly, 84-86 % of the landslides were found in the medium to high susceptible zones for the analysis, test and validation data sets. It has found that the percentage of the high and very high landslides susceptibility zones corresponds 17 % of the entire study area.*

Keywords: *Landslide Inventory, Landslide Susceptibility, Artificial Neural Network, Geographical Information Systems, Eastern Mediterranean.*

1. GİRİŞ

Ülkemizde heyelanların mekansal dağılımı ile bunları kontrol eden çevresel faktörlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla,MTA Genel Müdürlüğü tarafından "Türkiye Heyelan Envanter Haritası" projesi kapsamında sayısal heyelan veritabanı oluşturulmuştur (Duman vd., 2005; Çan ve Duman 2008; Duman vd., 2009a-e; Duman vd., 2011; Çan vd., 2013). Mevcut veri tabanı heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılmasında öncelikli hedef bölgelerin belirlenmesinde önemli katkı sağlamakla birlikte, heyelan duyarlılık, olası tehlike ve risk değerlendirme çalışmalarının tamamında en önemli girdi parametresini oluşturmaktadır.

Heyelan envanter veri tabanına göre Doğu Akdeniz bölgesi içinde yer alan Karaman, Mersin, Adana, Osmaniye ve Hatay il sınırlarınında içinde bulunduğu 50641 km^2'lik alanda, toplam alanı 549 km^2 olan 1451 adet heyelan belirlenmiştir (Duman vd., 2009a-e). Bölgede 1950-2007 yılları arasında yerleşim birimlerini etkileyen 1090 adet heyelan olayı rapor edilmiş olup, toplamda 6935 adet konut olumsuz etkilenmiştir (Gökçe vd., 2008; Duman vd., 2009a-e). Bu çalışmada ilk olarak heyelanların mekansal dağılımını kontrol eden hazırlayıcı ve tetikleyici çevresel faktörler değerlendirilmiştir. Hazırlanan veri tabanı %70 analiz, %15 test ve %15 doğrulama veri seti olarak üç bölüme ayrılarak(YSA) yöntemi kullanılarak heyelan duyarlılık analizleri yapılmıştır. Heyelan duyarlılık haritasının tutarlılığı başarı-tahmin eğrileri ile kontrol edilmiş olup, oldukça yüksek performans sonuçları elde edilmiştir.



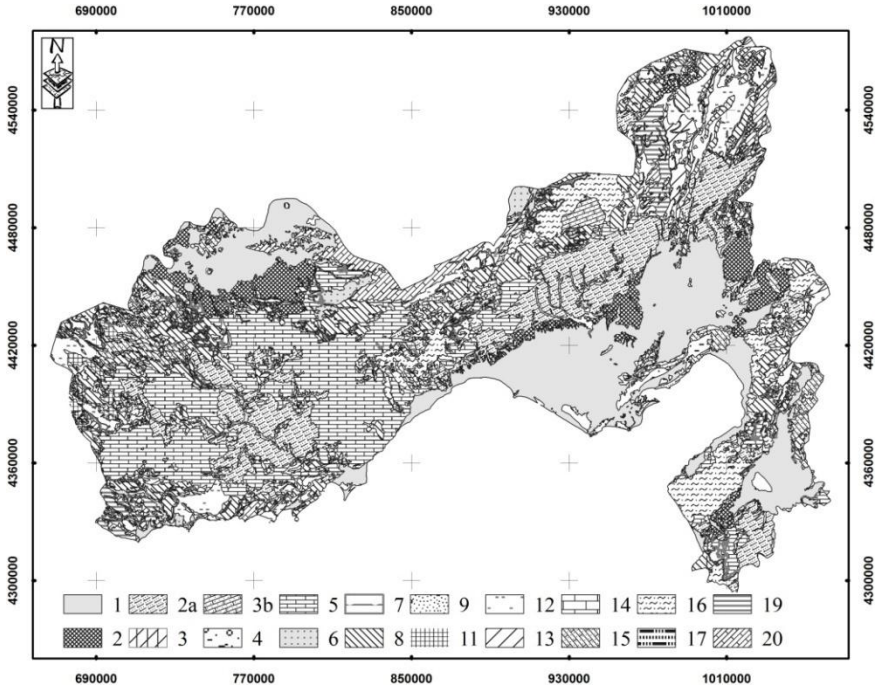
Şekil 1. Çalışma alanı içerisindeki heyelanların mekansal dağılımı.

2. HAZIRLAYICI FAKTÖRLER

Heyelanlar, başta jeoloji olmak üzere, çok çeşitli morfolojik ve fiziksel faktörlerin etkisi altında gelişmektedir. Çalışma alanı, jeolojik olarak; Orta ve Doğu Toroslara ait çok sayıda tektonik birlik (Özgül 1976), Adana, İskenderun, Mut ve Karsantı havzaları ile Karaman, Çukurova ve Amik ovalarının oluşturduğu geniş alüvyon düzlüklerinden oluşmakta, 1:500,000 ölçekli Türkiye jeoloji haritasında Konya, Adana, Kayseri, Sivas Hatay (Acarlar vd., 2002; Bilgiç, 2002; Şenel, 2002; Ulu, 2002a,b) paftalarının sınırları içinde yeralmaktadır. Heyelanların bölgesel jeoloji içerisinde sorgulanmasında karşılaşılan güçlükler nedeniyle, Duman vd. (2009a-e) tarafından jeolojik birimler benzer köken, yaş ve ortam gibi temel özellikleri dikkate alınarak 20 litoloji grubu altında toplanmıştır. Bu çalışmada da aynı litoloji grupları kullanılmıştır (Şekil 2). Çalışma alanındaki litoloji grupları içerisinde, Kuvaterner birimleri (Grup 1), Miyosen-karasal kırıntılı ve karbonatlar (Grup 2), Üst Paleosen-Miyosen-neritik kireçtaşları (Grup 5), Orta Kambriyen-Paleosen- pelajik kireçtaşları (Grup 8) ve Mesozoyik-ofiyolitik kayaçları (Grup 16) tüm litoloji gruplarının % 77'sini oluşturmaktadır. Bu birimlerden Grup 2 ve Grup 16 heyelanla en duyarlı birimleri oluşturmaktadır.

Çalışma alanında yüksek röliyef gruplarını Toros ve Amanos dağları oluşturmaktadır. Yükseklik değerleri deniz seviyesinden başlayıp Bolkar dağlarında olmak üzere en yüksek 3490 m'ye ulaşmaktadır. Sayısal yükseklik modeli (SYM) olarak 30 m mekansal çözünürlüğe sahip Gelişmiş Uzay Termal Yayılma ve Yansıma Radyometre uydusu (ASTER GDEM) kullanılmıştır (Şekil 3a).

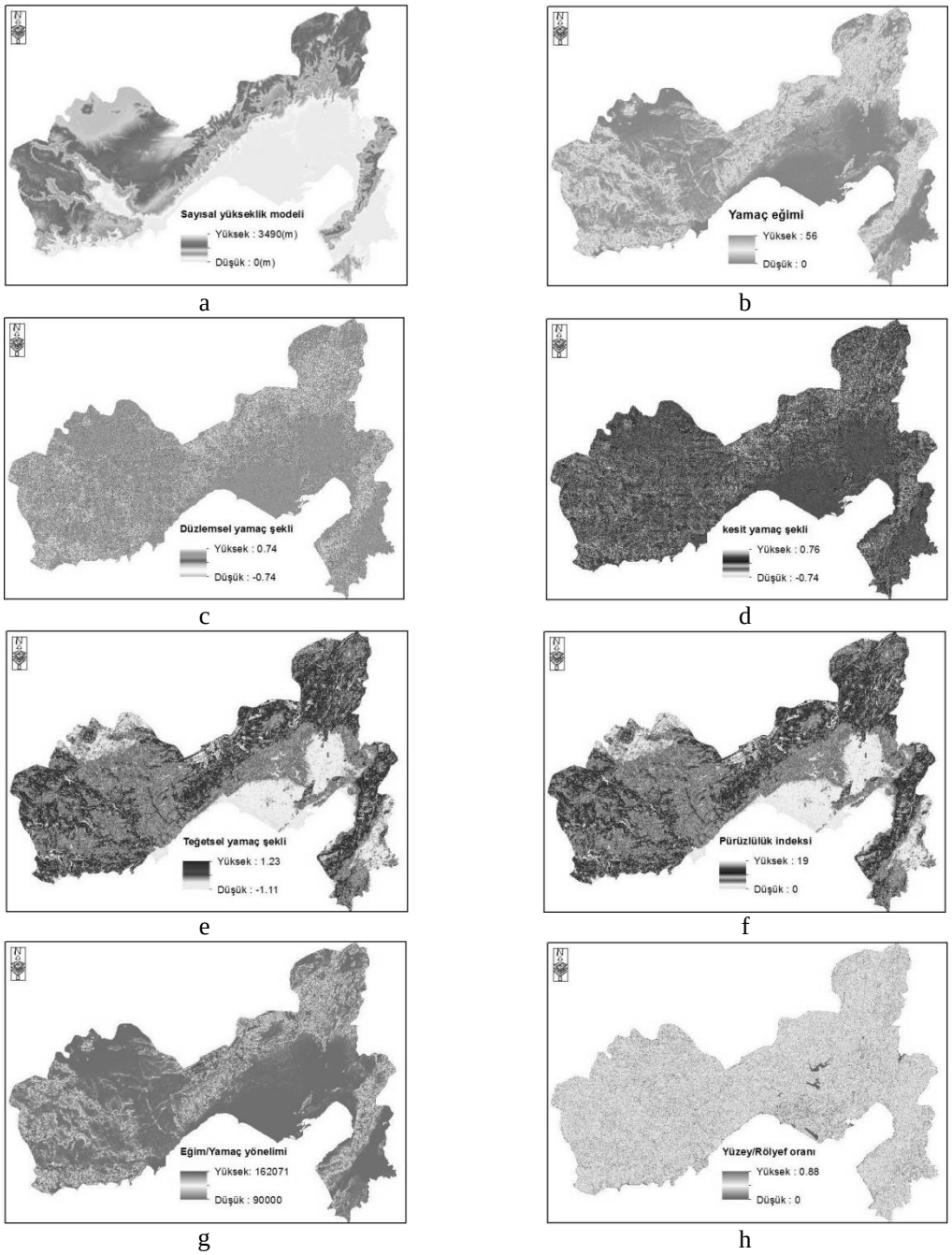
Ancak, çalışma alanının büyüklüğü göz önünde bulundurularak SYM 300x300m piksel çözünürlüğüne dönüştürülmüştür. Çalışma alanında yamaç eğimleri Toros ve Amanos dağları eteklerinden itibaren zirvelere doğru göreceli olarak artmakta ve en yüksek 56°'ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 3b).



Şekil 2. Çalışma alanın basitleştirilmiş litoloji grupları haritası. (Duman vd. 2009a-e). 1- Pliyosen-Kuvaterner çökelleri, 2- Miyosen-Pliyosen-Ayrılmamış karasal kırıntılılar, 2a- Miyosen Ayrılmamış karasal kırıntılı ve karbonatlar, 3- Üst Eosen-Pliyosen-Ayrılmamış evaporitli çökel kayalar, 3b- Üst Eosen-Alt Miyosen-Karasal kırıntılılar, 4- Paleosen-Pliyosen Karasal kırıntılılar ve karbonatlar 5- Üst Paleosen-Alt Pliyosen-Neritik kireçtaşları, 6- Üst Paleosen-Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar, 7- Üst Kretase-Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar, 8- Orta Kambriyen-Paleosen- pelajik kireçtaşları, 9- Orta Triyas -Eosen-Volkanik ve çökel kayalar, 11- Alt Kretase-Üst Jura- Karbonat ve kırıntılılar, 12- Alt Kambriyen-Permo-Triyas-Karbonat ve kırıntılılar, 13- Prekambriyen-Alt Liyas-Karbonat ve kırıntılılar, 14- Paleosen -Kuvaterner-Ayrılmamış volkanikler, 15- Alt Jura-Kuvaterner-Riyodasit, bazalt, andezit, spilit vb., 16- Mesozoyik-Ofiyolit, 17- Prekambriyen-Miyosen-Granitoyidler, 19- Prekambriyen-Eosen-Metamorfik kayalar, 20- Prekambriyen-Kretase-Mermer, kalkşist, rekristalize kireçtaşı.

Heyelanları hazırlayıcı faktörler olarak ayrıca, kesit, düzlem ve teğetsel yamaç eğriselliği, pürüzlülük indeksi, eğim/yamaç yönelimi ile yüzey/röliyef oranı haritaları da SYM'den türetilmiştir. Yamaç eğrisellikleri; iç bükey ve dış bükey yamaç şekilleri hidrolojik akış durumunu kontrol etmesi bakımından oldukça önemlidir. Yamaç eğrisellikleri değerlendirildiği doğrultuya göre kesit, düzlem ve teğetsel eğrilik olarak üçe ayrılmaktadır (Wilson ve Gallant, 2000). Bunlardan düzlem yamaç eğriselliği,belirli bir yükseklik boyunca yamaç yöneliminin değişimi olarak tanımlanmaktadır(Şekil 3c). Azalan eğim yönünde akış çizgisindeki eğim değişim oranı olan kesit yamaç eğriselliği şekil 3d'de, düzlem yamaç şekli değerinin yamaç eğimi değeri ile çarpılmasından elde edilen teğetsel yamaç eğriliği haritası ise şekil 3e'de verilmiştir. Pürüzlülük indeksi hesaplamalarında 5x5 piksellik pencereler kullanılmış ve her bir hücredeki yükseklik değerinin karekökü ile komşu hücreler arasındaki yükseklik farklarının çarpılmasıyla elde edilmiştir (Riley vd., 1999). Pürüzlülük indeksi değerlerleri engebeli alanlarda ve sırtlar boyunca yüksek değerlere ulaşmaktadır (Şekil 3f). Eğim/Yamaç yönelimi parametresi, her bir pikselin eğim değeri ile yamaçların yönlerinin 0-360^{o} arasında doğrusal olarak sahip oldukları değerlerin oranlanmasıyla hesaplanmış olup; yamaçların iç kesimlerinde yüksek değerler düz alanlarda ise düşük değerler vermektedir (Şekil 3g).

Yükseklik değerlerinin röliyef değerlerinin oranlanmasıyla oluşturulan yüzey/röliyef değerlerinin yüksek olduğu alanlarda heyelanlar görülmektedir (Şekil 3h).



Şekil 3. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli (a), yamaç eğimi (b), düzlemsel (c), kesit (d) ve teğetsel (e), yamaç eğrilikleri, pürüzlülük indeksi (f), eğim/yamaç yönelimi oranı (g), yüzey/röliyef oranı (h) haritaları.

3. HEYELAN ENVANTERİ

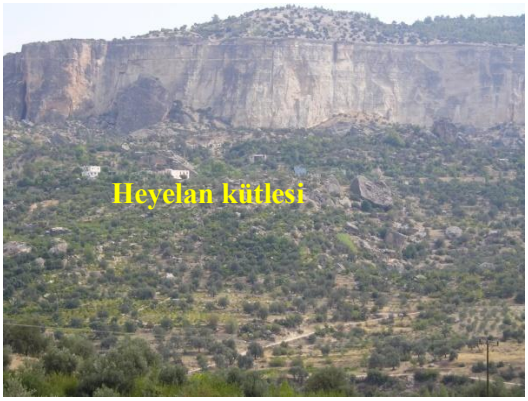
Çalışma alanı heyelan envanteri, Duman vd., (2009a-e) tarafından hazırlanmıştır (bkz. Şekil 1, Çizelge 1). Buna göre çalışma alanında heyelanlar Göksü Nehri havzası boyunca Miyosen kırıntılıları (Şekil 4a-b), Mersin bölgesinde derin yarılımlı vadiler boyunca yüzeyleyen ofiyolit birimleri içerisinde(Şekil 4c), Adana ve Osmaniye bölgelerinde Miyosen ve Pliyosen yaşlı kırıntılı birimlerde yoğunluk göstermektedir. Doğu Akdeniz bölgesinde heyelanların oluşum frekansları Karadeniz ve Doğu Anadolu bölgesine oranla daha düşüktür.

Küçük ölçekli heyelanların zaman içinde erozyon, bitki örtüsü değişimi veya diğer çevresel faktörler altında yok oldukları ya da tanımlanmasının güç olduğu bilinmektedir. Bölgesel ölçekte heyelanlar aşırı yağış olayları sonucu meydana gelmektedir. Doğu Akdeniz bölgesinde Mersin ve Adana meteoroloji istasyonlarından elde edilen uzun yıllar yıllık ortalama yağış değerleri yaklaşık 600 mm'dir. Aylık en fazla yağış ortalama 100 mm ile Aralık ve Ocak aylarında gözlenmektedir. Bununla birlikte, heyelanları tetikleyen yağış değerlerinde aylık yağışların 600-700 mm'ye ulaştığı gözlenmiştir (Çan vd., 2009). Çan vd. (2008) yapmış olduğu çalışmaya göre bölgesel ölçekli heyelanlar 3 günlük birikimli yağış değerlerinin 300mm'nin üzerinde olduğu durumlarda tetiklenmektedir. Bu yağış değerlerinin tekrarlanma periyodu yaklaşık olarak 50 yıl olarak bulunmuştur (Çan vd., 2009). Çalışma alanının heyelan envanter haritasının tamamlılık değerlendirmesi, Malamud vd. (2004) tarafından önerilen frekans büyüklük ilişkileri kullanılarak Çan vd. (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. Buna göre bölgede geçmişte meydana geldiği düşünülen toplam heyelan alanı kestirilmiş olup, mevcut heyelan envanter haritasının bölgede daha önce oluştuğu düşünülen heyelanların alansal olarak % 14' ne karşılık geldiği belirlenmiştir. Küçük ölçekli heyelanların zamanla doğal çevresel faktörler ve arazi kullanım değişiklikleri sonucu kaybolması yanısıra bölgedeki heyelan frekansının düşük, tekrarlanma aralığının uzun olmasından dolayı bölgede yapılacak heyelan duyarlılık haritasının büyük önem taşıdığı düşünülmektedir.

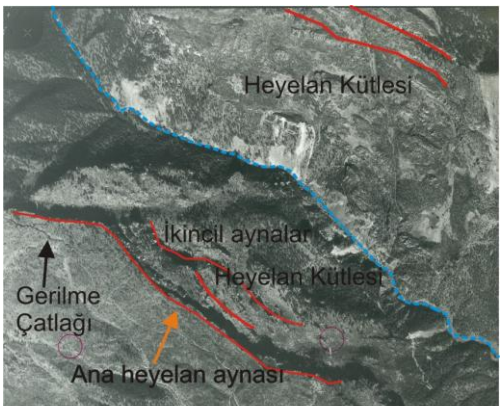
Çizelge 1. Çalışma alanındaki heyelanların tanımlayıcı istatistiksel değerleri.

	Kayma (Aktif değil)	Kayma (Aktif)	Akma
Adet	842	584	25
Ortalama (km^2)	0.53	0.16	0.12
Maks. (km^2)	11.56	3.55	0.61
Min. (km^2)	0.01	0.004	0.015
Toplam alan (km^2)	451.33	94.8	3.03

a



b

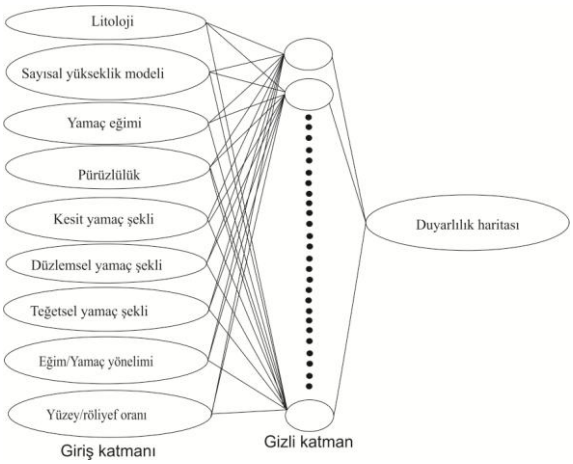


c

Şekil 4. Göksü Nehri havzasında Miyosen kırıntılıları (a, b) ve Mersin ofiyolitik melanj birimleri (c) içerisindeki büyük ölçekli derin heyelanlar.

4. HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ

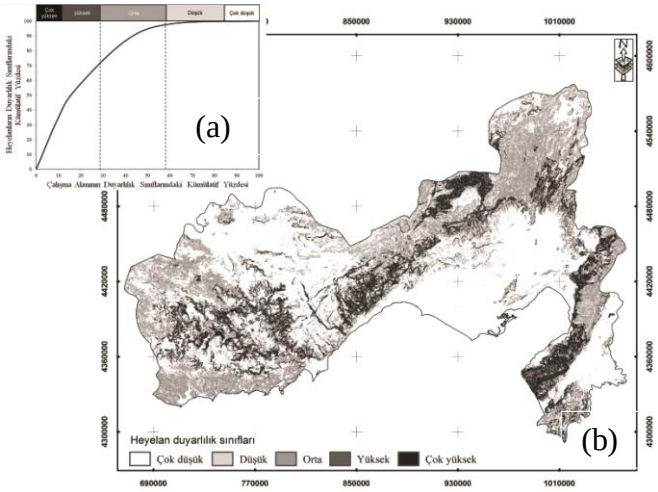
Heyelanların mekansal olarak gelecekte hangi bölgelerde meydana gelebileceğini gösteren heyelan duyarlılık haritaları, heyelan envanter haritaları ve heyelanları hazırlayıcı çevresel faktörler göz önünde bulundurularak hazırlanmaktadır. Heyelan duyarlılık değerlendirmeleriyle ilgili çok sayıda yaklaşım bulunmakta olup genelde niteliksel ve niceliksel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Corominas vd., 2014). Bu metotlardan niteliksel yöntemler genelde tecrübeye dayalı arazide yapılan jeomorfolojik gözlemler ve değerlendirmeler sonucu sezgisel olarak veya indeks ve parametre haritalarının çakıştırılması yöntemlerini içermektedir. Bu çalışmada niceliksel yöntemlerden; veri-güdümlü yöntem olan YSA yöntemi kullanılmıştır. YSA, biyolojik sinir sisteminden esinlenerek geliştirilen ve paralel yapıya sahip matematiksel modelleme yöntemidir. Genel olarak YSA, tek katmanlı ya da çok katmanlı olarak düzenlenebilen ve paralel çalışan çok sayıda doğrusal olmayan yapay hücreden meydana gelen bir sistem olarak tanımlanabilir (Ayalew vd., 2005). YSA'nın temel işlem elemanı olan hücre doğrusal olmadığından, hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA da doğrusal değildir ve bu özellik bütün ağa yayılmış durumdadır. Bu özelliği ile YSA, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde en önemli yöntemlerden biri olmuştur. YSA son yıllarda yapılan heyelan duyarlılık çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. YSA ileri beslemeli, geri beslemeli ve radyal tabanlı sinir ağlarından oluşmaktadır (Polykretis vd., 2015). İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları (İBYSA), nöron modeli oluşturulan katmanların ardışık biçimde bir araya getirilmesi sonucu kurulabilir. İBYSA, giriş, çıkış ve gizli katman olmak üzere en az üç katmandan oluşmakta ve giriş/çıkış katmanlarındaki nöron sayısı, problem üzerindeki etkili parametreler dikkate alınarak belirlenmektedir. Giriş ve çıkış katmanları arasında gizli katmanlar bulunur ve bu katmanlardaki nöronlar, doğrusal olmayan davranışlarından dolayı, YSA'nın doğrusal olmayan davranışının kaynağını teşkil ederler. Bu çalışmada kullanılan parametreler ve YSA modelinin şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. İleri beslemeli yapay sinir ağ yapısı.

Buna göre ilk olarak çalışmada kullanılan 300x300 m mekansal çözünürlüğe sahip çevresel değişkenler 0-1 arasında doğrusal yöntem kullanılarak normalize edilmiştir. CBS ortamında model yapılandırma teknikleri ile heyelan envanter haritası çakıştırılarak veriseti oluşturulmuştur. Çalışma alanı toplam 563257 piksel ile temsil edilirken, kayma türü heyelanlardan etkilenmiş alanlar toplam 6081 pikseldir. Veri seti rastgele seçim yöntemiyle % 70 analiz, % 15 test ve % 15 doğrulama veri seti olmak üzere üçe ayrılmıştır. YSA modellemelerinde gizli katman saysının belirlenmesinde değişik yaklaşımlar önerilmiştir (Basheer ve Hajmeer, 2000; Yeşilnacar ve Topal, 2005; Karsoliya, 2012). Bu çalışmada, Karsoliya (2012) tarafından önerilen giriş katmanı sayısının üçte ikisi ile iki katı arasında değişen gizli katman sayıları denenerek, en iyi sonucun elde edildiği 15 gizli katman ile sonuç duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.Elde edilen duyarlılık haritalarının performans değerlendirmeleri başarı-tahmin eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.Elde edilen duyarlılık haritası

çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 6). Buna göre; heyelanların; % 2'si çok düşük, % 11'i düşük, % 33'ü orta, % 20'si yüksek ve % 32'si çok yüksek ve çalışma alanın; % 39'u çok düşük, % 21'i düşük, % 23'ü orta, % 8'i yüksek ve % 9'u çok yüksek duyarlı sınıf aralıklarında bulunmaktadır.



Şekil 6. Çalışma alanına ait başarı tahmin eğrisi(a) ve heyelan duyarlılık haritası (b).

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, Doğu Akdeniz bölgesi içerisinde yeralan Karaman, Mersin, Adana, Osmaniye ve Hatay il sınırlarını kapsayan toplam 50641 km^2'lik bir alanda yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 300 m mekansal çözünürlüğe sahip piksel haritalama birimi kullanılmasına karşın, duyarlılık haritasında mevcut heyelanların % 50'sinden fazlasının çalışma alanının % 17'sine karşılık gelen yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlarda bulunduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen verilerin, bölgesel ölçekte heyelan olaylarını kontrol eden çevresel değişkenler ile heyelanlar arasındaki ilişkinin belirlenmesinde ve heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılmasına yönelik yapılacak çalışmalarda önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Acarlar, M., Acarlar, S., Adır, M., Akpınar, A., Akarsu, B., 2002. 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Kayseri paftası, MTA, No: 9, Ankara.

Ayalew, L, Yamagishi, H., Hideaki, M., Takami, K., 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. Engineering Geology, 81(4), 432-445.

Basheer, I.A., Hajmeer, M., 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. Journal of Microbiological Methods, 43, 3–31.

Bilgiç, T., 2002. 1:500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası Sivas Paftası. MTA, No: 10, Ankara.

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L.Malet, J.P.Fotopoulou, S.Catani, F.Van Den Eeckhaut, M.Mavrouli, O.Agliardi, F.Pitilakis, K., Winter, M.G.Pastor, M., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 209-263.

Çan, T., Duman, T.Y, Çil, E., Mazman, T., 2009. Mersin merkez ve Erdemli ilçeleri kuzeyinin coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan envanter, duyarlılık, olası tehlike ve risk değerlendirmesi.Tübitak-Çaydag:107y138, Adana.

Çan, T., Duman, T.Y., 2008. General evaluation of historical landslide inventory of Turkey. Proceedings in Symposium of Paleoenvironmental Reconstruction and Material Circulation by Water System. Abstracts book, pp.6-8. Hakozaki Campus Kyushu Univ., Fukuoka Japan.

Çan, T., Duman, T.Y., Çil, E., Mazman, T., 2008. Heyelan olası tehlike çalışmalarında tarihsel ve olay heyelan envanter haritalamaları ve bunların istatistiksel değerlendirilmesi: Mersin Merkez ve Erdemli ilçeleri örneği, Mersin Semp. Bildiriler Kitabı. 2796-2803, Mersin.

Çan, T., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çörekçioğlu, Ş., Karakaya-Gülmez, F, Elmacı, H., Olgun, Ş., Hamzaçebi, S. Emre, Ö., 2013. Türkiye heyelan veri tabanı. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2013, No: 217, Ankara.

Çan, T., Mazman, T., Tekin, S., Duman, T.Y., 2015. Doğu Akdeniz Bölgesi tarihsel heyelan envanterinin frekans büyüklük dağılımlarına göre tamamlılık değerlendirmesi. 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri Kitabı, Ankara,110-112.

Duman, T.Y., Çan, T., 2009. Spatial Analysis of general landslide distributions in Turkey. 6th Annual Meeting AOGS, Abstracts, Singapore.

Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Durmaz, S., Elmacı, H., ve Çörekçioğlu, Ş., 2009e. Türkiye heyelan envanteri haritası-1/500000 ölçekli Sivas paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-17, Ankara, 21 s.

Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz S., ve Çörekçioğlu, Ş., 2009d. Türkiye heyelan envanteri haritası-1/500000 ölçekli Kayseri paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-18, Ankara, 20 s.

Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz S., ve Çörekçioğlu, Ş., 2009c. Türkiye heyelan envanteri haritası-1/500000 ölçekli Konya paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-22, Ankara, .22 s.

Duman, T.Y., Çan, T., Olgun, Ş., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz, S., ve Çörekçioğlu, Ş., 2009b. Türkiye heyelan envanteri haritası-1/500000 ölçekli Adana paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-23, Ankara, 19 s.

Duman, T.Y., Çan, T., Olgun, Ş., Nefeslioğlu, H.A., Durmaz, S., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Çörekçioğlu, Ş., 2009a. Türkiye heyelan envanteri haritası-1/500000 ölçekli Hatay paftası. MTA Özel Yayınlar Serisi-24, Ankara, 23 s.

Ferlisi, S., Tofani, V., Hervas, J., Smith, J.T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 209-263.

Gökçe O., Özden, Ş., Demir, A., 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı. Afet Bilgileri Envanteri, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Karsoliya, S., 2012. Approximating number of hidden layer neurons inmultiple hidden layer BPNN architecture.International Journal of Engineering Trends and Technology, 3(6), 714-717.

Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzettı F., Reichenbach P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. Earth Surface Processes and Landforms, 29(6), 687–711.

Özgül N., 1976. Torosların bazı temel jeolojik özellikleri. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 19, 65-78.

Polykretis, C., Ferentinou, M., Chalkias, C., 2015. A comparative study of landslide susceptibility mapping using landslide susceptibility index and artificial neural networks in the Krios River and Krathis River catchments (northern Peloponnesus, Greece). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(1), 27-45.

Riley, S.J, DeGloria S.D., Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. Intermountain Journal of Sciences, 5, 1-4.

Şenel, M., 2002. 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Konya paftası. MTA, No: 14, Ankara.

Ulu, Ü., 2002b. 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Hatay paftası. MTA, No: 16, Ankara.

Ulu, Ü., 2002a. 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Adana paftası. MTA, No: 15, Ankara.

Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000. Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley and Sons, New York.

Yesilnacar, E., Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). Engineering Geology, 79, 251–266.

Trabzon-Uzungöl Beldesindeki Eski Heyelan Alanının Zemin Yapısının ve Dinamik Özelliklerinin Sığ Sismik Yöntemlerle Araştırılması

Investigation of the Soil Structure and Dynamic Characteristics of the Old Landslide in the Trabzon-Uzungöl District by Shallow Seismic Method

G. Vanlı Şenkaya[1], H. Karslı[1,*], M. Şenkaya[1], R. Güney[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon (*hkarsli@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışma, Trabzon-Uzungöl beldesinde eski bir heyelan sonucu oluşmuş ve üzerinde yerleşim olan alanlarda, zemine ait dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması ve heyelan akma bölgesinin taban topoğrafyasını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda 16 profilde sismik kırılma, aktif (MASW) ve pasif kaynaklı (ReMi) yüzey dalgası, 3 profilde sismik yansıma verisi ve çoklu elektrot özdirenç verisi toplanmıştır. Sismik kırılma verilerinden ilk varış tomografisi yöntemiyle ile P-dalgası, çok kanallı yüzey dalgalarının dispersiyon eğrilerinden S-dalgası hız-derinlik profilleri ve iki-boyutlu (2-B) hız kesitleri elde edilmiştir. Bulgular, alanda önceki yıllarda yapılmış sondajlardan elde edilen jeoloji kesitleriyle teyit edilmiştir. İlk 30 m için P-dalgası hızının 428-2578 m/s, ve S-dalgası hızının (V_{s30}) 323-530 m/s aralığında, heyelanın akma bölgesinin taban topoğrafyasınının yaklaşık düzlemsel ve derinliğinin ortalama 13.5-15 m arasında olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada; zemin yapısının ve özelliklerinin belirlemesinde sismik yöntemlerin birlikte kullanılmasının katkıları gösterilmiş olup, Uzungöl'de planlanan mühendislik projelerinin güvenli ve çevreye zarar vermeden yapılması için bilimsel bir altlık oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uzungöl, Heyelan, MASW, İlk Varış Tomografisi, ReMi

ABSTRACT: *This study was carried out to calculate the soil dynamic parametersin the settled areas which were formed by an old landslide in Uzungöl, Trabzon and to define the topography of the landslide failure surface. In this context, seismic refraction in 16 profiles, active (MASW), active (MASW) and passive (ReMi) surface wave, seismic reflection dat in 3 profiles and multi-electrot electrical resistivity data in a profile were acquisited. 1D profiles and 2D sections of P-wave and S-wave velocity-depth were obtained by using seismic refration first arrival tomography and inversion of surface wave dispersion curves, respectively. Findings were verified by geological sections obtained from drillings done in previous years. P-wave velocity for the first 30m depth is 428-2578 m/sec and S-wave velocity (Vs30) 323-530 m/sec. Also, it is indicated that the topography of landslide failure surface is nearly translational and the depth is average 13.5-15m. Consequently, in this study, the contributions of using seismic methods together has been presented. Therefore, a scientific infrastructure has been formed to carry out the engineering projects planned for Uzungöl settletment safely and without damaging the environment.*

Keywords: *Uzungöl, Landslides, MASW, First Arrival Tomography, ReMi*

1. GİRİŞ

Jeoteknik açıdan zemin dinamik-elastik özelliklerinin ve temel kaya topoğrafyasının detaylı olarak belirlenmesi, mühendislik çalışmalarında ve imar planlamalarında doğru yapılaşma ve yapı güvenliği açısından son derece önemli bir amaçtır (García vd., 2008). Mühendislik çalışmalarında gerek statik ve gerekse dinamik yüklemeler altında kalan zeminin mekanik davranışının karakterize edilmesi, yerleşim alanları için son derece önemli olmaya ve dolayısıyla yerin sığ derinliklerinin sismik özelliklerinin araştırılması da son yıllarda daha fazla önem kazanmıştır (Kanbur vd., 2011). Özellikle, yüzeyden 30 m derinliğe kadar zemin sıkılık-gevşeklik profilinin ve temel kaya topoğrafyasının tam olarak görüntülenmesi yer bilimciler tarafından ihtiyaç duyulan temel bilgilerdir (Poormirzaee ve Moghadam, 2014).

Bu kapsamda, klasik sismik yansıma ve sismik kırılma tekniklerinin yanı sıra, P-dalgası sismik kırılma verilerinden ilk varış tomografisi, yüzey dalgaları analizine dayanan aktif kaynaklı Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (MASW) ve pasif kaynakların kullanıldığı kırılma mikrotremoru (ReMi) gibi teknikler son yıllarda önemli kullanım alanı bulmuştur. MASW tekniği yerin 1-B'lu kayma dalgası hız yapısını güvenilir olarak elde etmede ve yerin sıkılık-katılık değişimin belirlenmesinde yaygın kullanılan bir teknik iken (Xia vd., 1999a), P-dalgası ilk varış tomografisi yerin hem düşey ve yanal P-dalgası hız değişimini hem de temel topoğrafyasını ortaya çıkarmada son derece faydalıdır (Azwin vd., 2013). Bununla birlikte, sığ sismik yansıma tekniği yerin sığ stratigrafik istiflenme ve yanal süreksizlik gibi yapısal özelliklerin haritalanmasında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Steeples ve Miller, 1998; Yılmaz, 2001).

Bu çalışmada; sismik yansıma, MASW ve P-dalgası ilk varış tomografisi teknikleri kullanılarak, Uzungöl mevcut ve yeni yerleşim alanlarını kapsayan profillerde sığ yer altı yapısı ve elasto-dinamik zemin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Trabzon-Uzungöl havzası eski bir heyelan sonucu oluşmuş olup (Alkan, 1996; Altundağ, 2008), yerleşim alanları gölün çevresinde bu eski heyelanla ve güncel olarak aşırı dik dağ yamaçlarından ve çevredeki derelerden taşınarak birikmiş kalın alüvyon malzemesi üzerinde yer almaktadır. Bununla birlikte; bu malzemelerin kalınlığı, tabakalanma durumu sıkılığı, malzeme türü ve üzerinde yer aldığı temel kaya topoğrafyası hakkında tam olarak jeo-mühendislik bilgileri mevcut değildir. Bu kapsamda Uzungöl çevresinde 16 profilde sismik kırılma, aktif ve pasif yüzey dalgası verisi, bu profillerin 3'ünde ayrıca sismik yansıma ve özdirenç verisi toplanmıştır. Yansıma verilerinin toplandığı 3 profil için yüzey dalgası alanlarının ters çözümünden 2-B'lu S-dalgası hız kesitleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçların birlikte yorumlanmasıyla çalışma alandaki zeminin yanal ve düşey yönlerdeki değişimleri, sismik hız yapısı, temel kaya topoğrafyası, zeminin dinamik elastik parametreleri, zemin hakim salınım periyodu ve zemin büyütme değerleri görüntülenebilen maksimum derinliğe kadar belirlenmiştir.

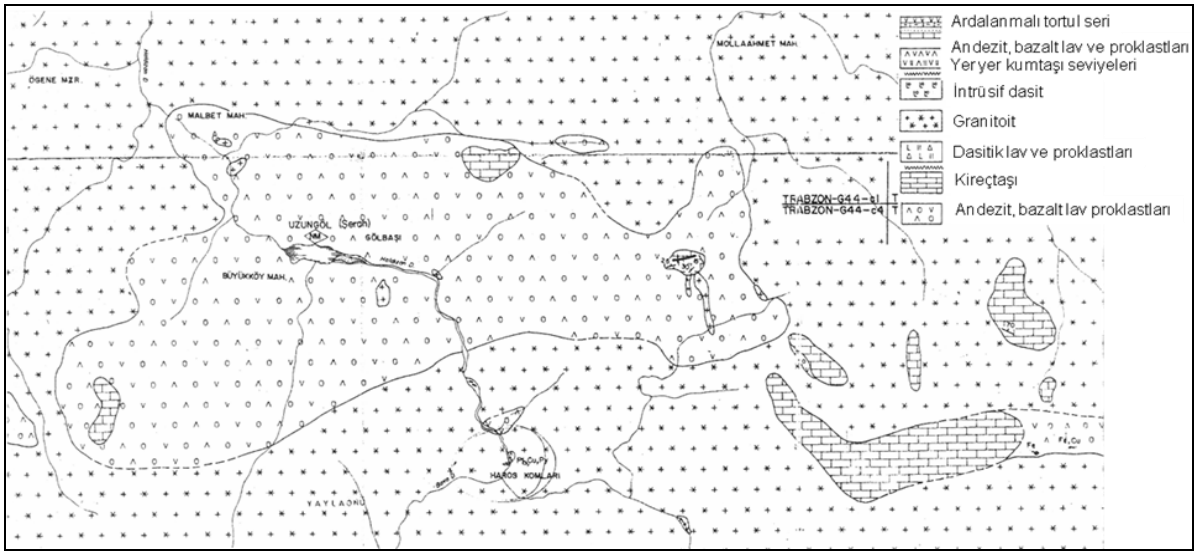
2. ÇALIŞMA ALANI KONUMU VE JEOLOJİSİ

Uzungöl;Trabzon'a 99 km uzaklıkta, deniz seviyesinden 1100 m yükseklikte, Türkiye'nin yağmur ormanlarının bulunduğu, Doğu Pontid tektonik kuşağı içinde bulunan Soğanlı ve Kaçkar sıradağlarının birleşim yerinde yüksek dağlarla çevrili derin bir vadi içinde yer alır (Şekil 1).

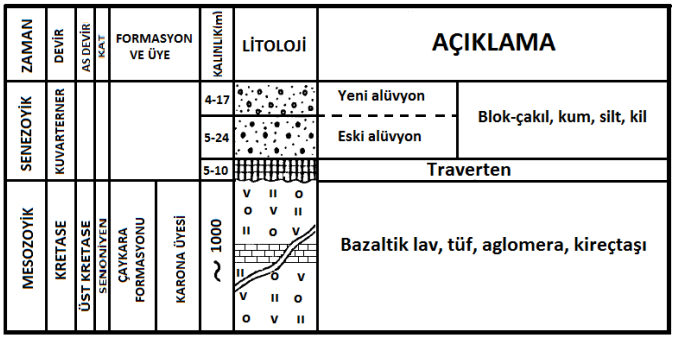
Şekil 1. Çalışma alanının yer buldurusu (Google Earth)

Çalışma alanını da içine alan genel jeoloji haritası Şekil 2'de verilmiştir. Buna göre, bölgede gözlenen en yaşlı kayaçların Mesozoyik dönemine ait olmakla birlikte, Tersiyer dönemli oluşumlar da fazlasıyla çevrede göze çarpmaktadır. Jura-Alt Kretase yaşlı andezit, bazalt-lav ve piroklastları Uzungöl'ün yakın çevresinde geniş bir yayılım alanına sahiptir (Yeşilyurt, 2002). Bulut (1989), Çambaşı ve Uzungöl beldeleri çevresinde çalışma alanını da kapsayan çalışmasında bölgedeki birimleri yaşlıdan gence doğru; Çambaşı Formasyonu, Ataköy Formasyonu, Taşkıran Granitoyidi, Çaykara Formasyonu, Lüger Travertenleri, alüvyonlar ve yamaç döküntüleri olarak ayırmıştır. Çaykara Formasyonu üç üyeye ayrılmış olup, bunlar alttan üste doğru Hadi, Şahinkaya ve Karona üyeleridir. Bununla birlikte,

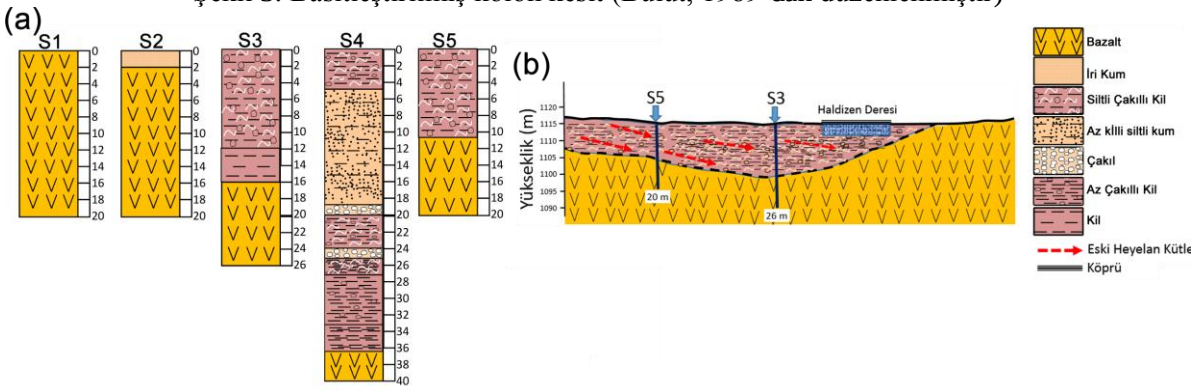
Araz (1996) Uzungöl ve çevresinde yüzeylenen bazaltların, sert sıkı ve dayanımlı olduğunu, buna karşın alüvyon birimlerin ise göl çevresinde yer yer 10-15 m kalınlığa ulaştığı ve büyük bloklar içeren, çakıllı-kumlu bir karaktere olduğunu belirtmektedir. Çalışma alanına ait basitleştirilmiş jeolojik kolon kesit Bulut (1989) referans alınarak yeniden düzenlenmiş ve Şekil 3'de verilmiştir. Ayrıca, DSİ (1982) tarafından beş ayrı lokasyonda yapılan sondajlara ait kolon kesitleri ve S3-S5 sondaj lokasyonlarını da gösteren A-A' kesiti Şekil 4a ve 4b'de verilmiştir. Kolon kesit bilgilerine göre, zeminin genel olarak 10-15 m kalınlığında (S3 ve S5'e göre) kumlu-siltli ve killi birimlerden, temel kaya ise bazaltlardan oluştuğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2. Trabzon-Çaykara-Uzungöl (Şerah) yöresinin jeolojik haritası (MTA, 1985)



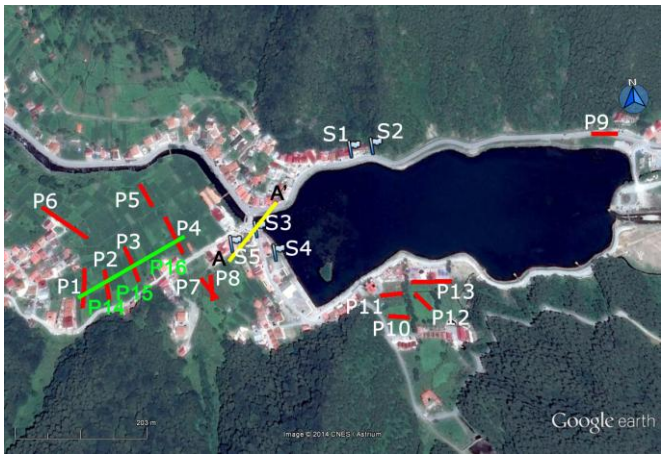
Şekil 3. Basitleştirilmiş kolon kesit (Bulut, 1989'dan düzenlenmiştir)



Şekil 4. DSİ (1982) tarafından yapılmış sondajlardan elde edilen (a) sondaj logları, (b) A-A' kesiti

3. JEOFİZİK VERİ TOPLAMA VE DEĞERLENDİRME

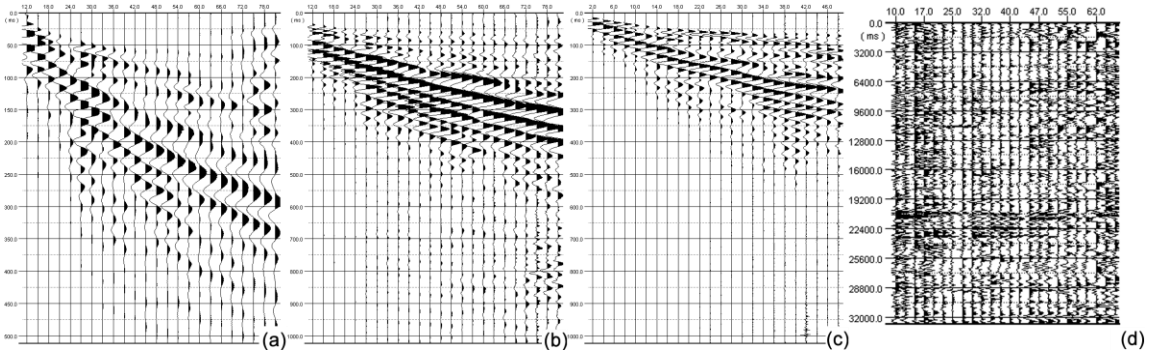
Çalışma alanında yapılan ön incelemelerden edinilen bilgiler, belde sakinleri ile yapılan görüşmeler ve alandaki ekili araziler göz önüne alınarak, ölçüm profilleri Şekil 5'deki gibi belirlenmiştir. Profillerin büyük çoğunluğu beldenin güneybatısında konumlandırılmıştır.



Şekil 5. Ölçüm profillerinin çalışma alanındaki konumları

Ölçümlerde, 24 kanallı araştırma sismografı kullanılarak, 16 farklı profilde sismik kırılma, aktif ve pasif yüzey dalgası ve üç profilde (Profil 1, 3 ve 6) sismik yansıma verileri, Profil 14, 15 ve 16 üzerinde çoklu elektrot sistemi ile özdirenç verileri toplanmıştır. Toplanan sismik kırılma verilerinin ilk varış tomografisi ile değerlendirilmesi için, mümkün olduğunca fazla atış yapılarak (en az 5 atış), çalışma alanının iyi örneklenmesi sağlanmış ve 2-B'lu hız alanı kesitlerinin güvenirliliği arttırılmıştır. Bununla birlikte tomografik çözümler, geleneksel gecikme zamanı yöntemlerine göre, hem ana kayaya kadar olan hız değişimlerini hem de ana kaya topoğrafyasının belirlenmesinde daha güvenilir ve detaylı sonuçlar verir. Aktif ve pasif kaynaklı yüzey dalgası verilerinin analizleri ise, ortamın 1-B'lu S-dalga hızı yapısının derinlik boyunca elde edilmesini sağlar. Sismik yansıma verileri ardışık ilerletilen serimler boyunca toplandığı için, bu verilerin yüzey dalgası alanlarından elde edilen 1b'lu S-dalgası hız kesitleri birleştirilerek ölçüm profiline ait 2-B'lu n S-dalgası hız kesiti oluşturulabilir. Veri toplama süresince örnekleme zamanı ve kayıt süreleri sırasıyla, kırılma verileri için 0.25 ms, 0.5 s (Şekil 6a), yüzey dalgaları için 1.0 ms, 1.0 s (Şekil 6b) ve yansıma verileri (Şekil 6c) için ise 0.25ms, 1.0 s olarak belirlenmiştir. Kayıt sürelerinde yapılan bu değişimlerin amacı, hedeflenen dalga alanlarının en iyi şekilde kayıt edilebilmesidir. Genel olarak yüzey dalgaları, cisim dalgalarına göre daha düşük frekans ve yüksek genliklerle karakterize edilirler. Ayrıca, düşük doğal frekansa sahip alıcılarla toplanan veriler, yüksek frekanslı alıcılarla toplanan verilerden daha büyük dalga boyları içerir (Şekil 6b-c). Bu nedenle, kırılma ve yüzey dalgalarının kayıtlarında 4.5Hz ve yansıma kayıtları için 40Hz'li alıcılar kullanılmıştır. Diğer taraftan, mikrotremor kayıtlarının kaynağı çevresel gürültüler olduğundan, hem düşük frekans hem de düşük genlik içeren kayıtların karakteristiği ve görüntüsü diğer sismik verilerden oldukça farklıdır (Şekil 6d). Sismik yansıma verilerinin atış sayısı ve geometrisi ise, mümkün olan en fazla yığma sayısının elde edilmesine göre şekillendirilmiştir. Çalışma boyunca, kaynak olarak 10 kg'lık balyoz ve 30 cm yarıçaplı ve 5 cm kalınlıklı kırılgan olmayan plastik tabla kullanılmıştır. Sismik sinyalin sinyal/gürültü oranının yükseltilmesi için ise, her bir veri 3 düşey yığma ile toplanmış ve veri toplama sırasında herhangi bir süzgeç uygulanmamıştır.

Sismik kırılma verileri ilk varış işaretlemeleri yapıldıktan ilk varış tomografisi programı SeiOpt (Pullammanappallil ve Louie, 1997) ile değerlendirilirken, aktif çok kanallı yüzey dalgası verileri KrıSıs (Kritikakis ve Vafidis, 2011) yazılımı ile değerlendirilmiştir. Sismik yansıma verilerinin değerlendirilmesinde ise ProMax (URL-1) yazılımı kullanılmıştır.



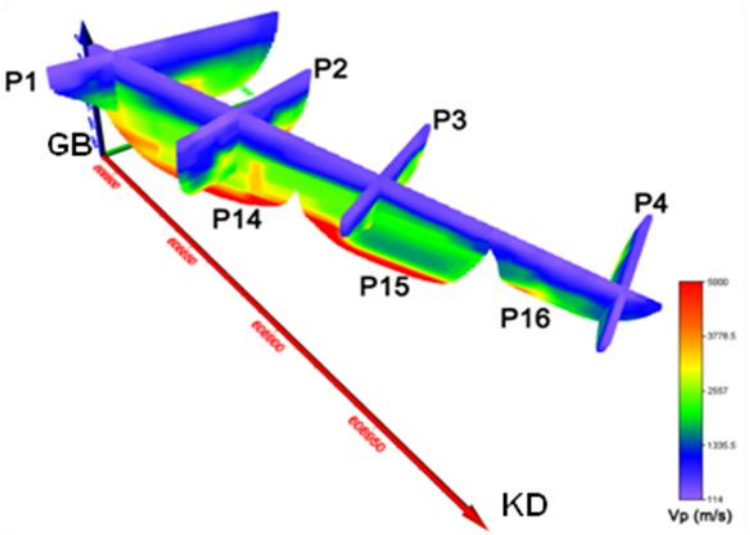
Şekil 6. Sismik kayıtlardan örnekler:(a) sismik kırılma verisi, (b) çok kanallı yüzey dalgası verisi (c) sismik yansıma verisi, (d) kırılma mikrotremor verisi.

Bu çalışmada, zemin araştırmalarında etkin ve yaygın kullanıma sahip diğer bir jeofizik yöntem olan elektirik özdirenç tomografi yöntemi de, sismikten elde edilen sonuçları desteklemek için kullanılmıştır. Yöntem, yere verilen akımın yer içinde yayılırken yer içi malzemelerinin elektrik akımına karşı direnç özelliklerine göre oluşan potansiyel farkın değişiminin ve dolayısıyla görünür özdirencin ölçülmesi esası üzerine geliştirilen bir yöntemdir. Özellikle yeraltısuyu, nemlilik, tuzluluk, boşluk ve ayrışma derecelerinin belirlenmesinde çok etkin ve yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu kapsamda 14, 15 ve 16 no.lu sismik profiller üzerinde ve P1, P2 ve P3 no.lu sismik profilleri yaklaşık dik yönde kesen (toplam 200 m uzunlukta tek bir profil) Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipol-Dipol ve Gradyent dizilimleri için elektrik özdirenç tomografi verileri 5 m elektrot aralığı ile toplanmış ve RESD2INV (Griffiths ve Barker, 1993) yazılımı ile değerlendirilmiştir. Böylece elde edilen sonuçlar elektrik özdirenç tomografisi sonuçlarıyla ortamdaki yeraltı su içeriği, litolojik değişim ve olası kayma yüzeyinin yorumu açısından sismik sonuçlarla korelasyonu sağlanmıştır.

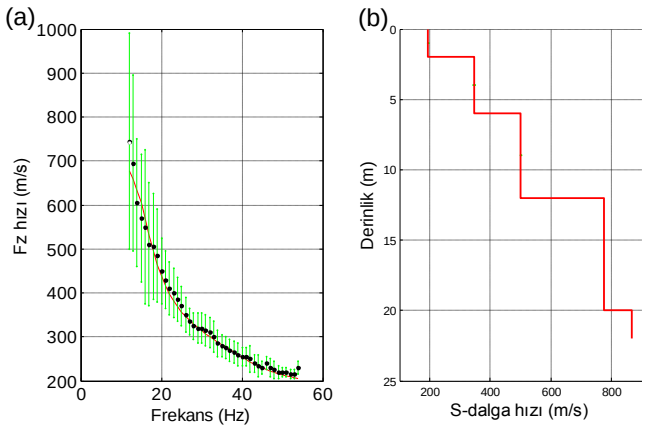
Çalışma sahasında en büyük alanı örnekleyen kesim birbirine paralel dört uzun profilin (P1, P2, P3 ve P4) ve bunları eğim boyunca dik yönde kesen toplam yaklaşık 224 m'lik bir alanı tanımlayan P14, P15 ve P16 no.lu profillerin bulunduğu alandır (Şekil 5). Bu 7 profil için elde edilen 2-B'lu hız alan kesitlerinin birleştirilerek, tüm alanı daha iyi görüntüleyen sonuç Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre ana kaya üzerinde malzeme kalınlığı eğim boyunca artmaktadır. Çalışma sahasında yüzeyde görülen ve tarıma elverişli toprağın P-dalga hızı yaklaşık 300 m/s olup, kalınlığı ortalama 5 m civarındadır (Şekil 7'de mor renkli birimler) ve bu değer tüm profillerde aynı dağılımı göstermektedir. Kalınlığı sürekli değişen ve tüm çalışma sahasında düzensizlik gösteren birimler ise, Şekil 7 de mavi ve yeşil renklerle gösterilen, P-dalga hızları sırasıyla en fazla 1300 ve 2300 m/s olan birimlerdir. Bu birimlerden daha sığ olanın (mavi birim) yüzey malzemesiyle yaklaşık aynı karakterde ancak daha sıkı bir birim olduğu, diğerinin ise (yeşil birim) profillere yakın konumlarda yapılan S3 ve S5 sondajlarında görülen siltli-çakıllı kil olduğu düşünülmektedir. Yaklaşık 3000-3200 m/s ile gösterilen sarı ve kırmızı renkler ise, bazaltlardan oluşan ana kayayı temsil etmektedir.

Her bir profil için atış kayıtlarından dispersiyon eğrileri (Şekil 8a) ve bu dispersiyon eğrilerinin ters çözümünden 1-B'lu S-dalgası hızının derinlikle değişimi (Şekil 8b) hesaplanmıştır. Tüm profiller için elde edilen 1-B'lu S-dalga hızı profillerinin, yüksek oranda tomografi kesitlerindeki tabaka süreksizlikleri ve hızları bakımından uyum içinde olduğu görülmüştür (Şekil 8). Şekil 9, P1 profili için elde edilen tomografi kesiti ve 1-B'lu S-dalga hızı profilinin karşılaştırmasını göstermektedir. Buna göre, her iki sonuç zemin karakteri açısından birbirini yüksek derecede desteklemektedir. Çok kanallı yüzey dalgası verilerinin bazı şartlar (yeterli serim boyuna ulaşılamaması, kaynak yetersizliği vb.) altında istenilen derinlikten bilgi sağlamaması haline, aynı profiller üzerinde toplanan kırılma-mikrotremor verileri kullanılmıştır. Bu veriler, aktif kaynaklı verilere göre daha düşük frekanslı dalgalar içerdiğinde teorik olarak daha derinden bilgi taşırlar. Dolayısıyla sığ 1-B'lu S-dalgası hızı kesitlerinin elde edildiği durumlarda tamamlayıcı bir rol üstlenirler (Şekil 10). 1-B'lu S-dalga hızı kesitlerinin eğim boyunca birleştirilmesiyle oluşturulan 2-B'lu S-dalga hız kesiti de, tomografi

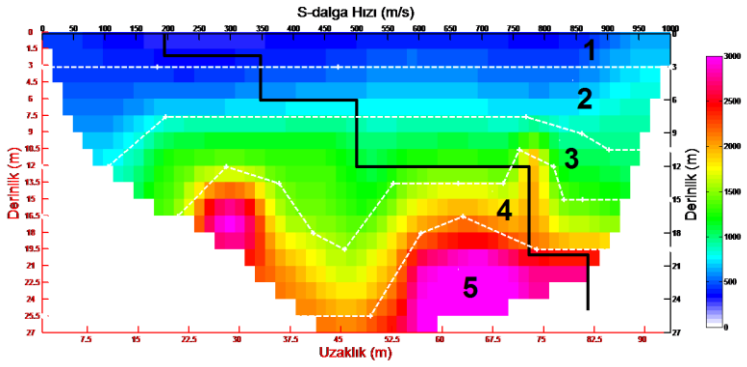
kesitlerini doğrular nitelikte, geçirimli, gevşek malzeme kalınlığının eğim aşağı arttığını göstermektedir (Şekil 11). Eğim yönünde yaklaşık 200 m'lik bir alanı temsil eden ve P14, P15 ve P16 profillerinde toplanan özdirenç verilerinden elde edilen 2-B'lu elektrik tomografi kesiti ise, geçirimli malzeme kalınlığını ve ortamdaki nemliliği açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 12).



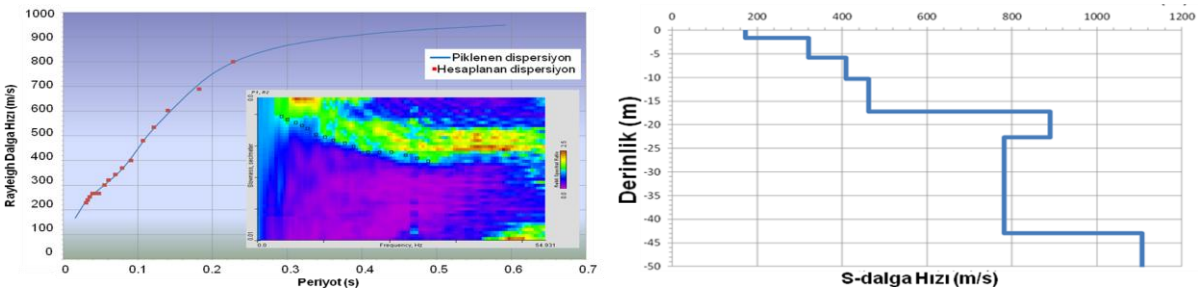
Şekil 7. P1, P2, P3, P4 ve P14, P15, P16 profilleri için elde edilen P-dalgası ilk varış tomografi kesiti.



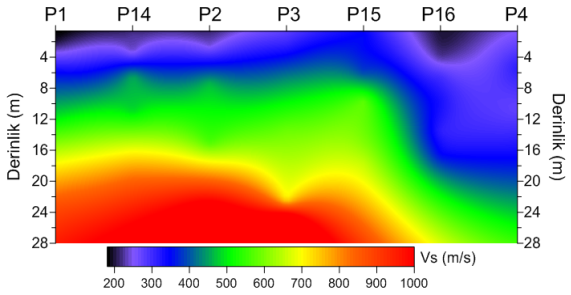
Şekil 8. P1 profiline ait MASW verisinden elde edilen 1-B'lu S-dalga hız değişimi.



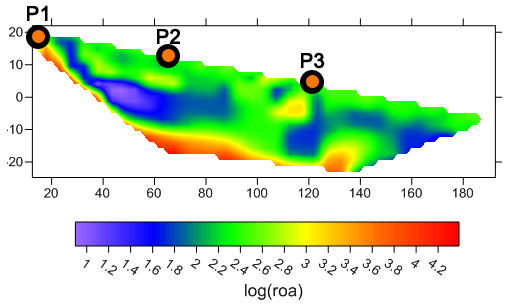
Şekil 9. Profil 1 için P-dalgası 2-B'lu tomografik hız kesiti ve 1-B'lu S-dalga hız profili (siyah kalın çizgi; litolojik birimler rakamlarla belirtilmiştir)



Şekil 10. Profil 1 için ReMi verisinden elde edilen dispersiyon eğrisi ve 1-B'lu S-dalga hız profili.



Şekil 11. P1-P4 ve P14-P16 profillerinden elde edilen 1-B'lu S-dalga hızı profillerinin, eğim yönünde birleştirilmesiyle oluşturulan 2-B'lu S-dalga hız kesiti



Şekil 12. P14, P15 ve P16 profillerinde dipol-dipol elektrik özdirenç verilerinin ters çözümü ile elde edilen tomografi kesiti.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Uzungöl beldesi yerleşim alanlarının zemin yapısı ve özellikleri aktif ve pasif sismik ve destek amaçlı elektrik özdirenç tomografisi yöntemleriyle incelenmiştir. Buna göre, tomografik kesitte belirlenen ilk 3 birimin (killi-çakıllı-siltli) eski bir heyelanla ilişkili malzemeler oldukları düşünülmektedir. Bu birimler; hem 1-B'lu hem de 2-B'lu S-dalga hızı kesitlerinde de görülmektedir. Çalışma alanında temel kaya derinliği üst kesimlerde 13.5-15 m arasında iken, göle yakın bölgelerde bu değer 25-30 m'ye kadar çıkmaktadır. Bununla birlikte, hem sismik kesitler hem de elektrik tomografi kesiti, heyelan sonucu akan malzemenin yaklaşık düzlemsel bir topoğrafya üzerinde yayıldığına işaret etmektedir. Tüm profiller için elde edilen P- ve S-dalga hızları kullanılarak hesaplanan V_{s30} değerlerinin, temel kaya derinliğinin 13.5-15 m olduğu bölgelerde ortalama 530 m/s, göl kenarında temel kayanın daha derinde görüldüğü alanlarda ise 323 m/s'lere düştüğü görülmüştür. Yüzeyden itibaren 30 m'lik derinlik için, zemin hakim salınım periyotu 0.22 s ve büyütme değeri 1.56 olarak hesaplanmıştır. Tüm değerler göz önüne alındığında, Uzungöl civarındaki hakim zemin sınıflamasının sırasıyla Eurocode8 (CEN, 2004) ve NEHRP'e (BSSC, 1997) göre daha yüksek kotlarda (çalışma alanın GB kısmı) sert zemin-ayrışmış kaya, düşük kotlar (göle yakın kısımlar) için ise yumuşak zemin-katı toprak olduğu söylenebilir. Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne (TDY, 2007) göre ise, yüksek kotlar B grubu zemin sınıfına, düşük kotlarda ise C sınıfı ile temsil edilmektedir. V_{s30}

hızları arasındaki bu fark zeminin dinamik yükler altında davranışını ve dolayısıyla zemin-yapı etkileşimini olumsuz yönde etkileyeceğinden, daha güvenli yapı projelerinin bu değerler göz önüne alınarak tasarımlanması önem arz etmektedir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: 11512). Yazarlar, çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı Dr. Satish Pullammanappallil ve Dr. George Kritikakis'e teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Alkan, S.,1996, Uzungöl'e taşınan yığıntı materyalin tespiti ve taşınan materyal ile gölün dolmasını engelleyen önlemler üzerine bir araştırma. Yüksek lisans tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.

Altundağ, D., 2008, Holosende Uzungöl ve su toplama havzasında oluşan çevresel değişimler. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.

Araz, N., 1996, Uzungöl Tabiat Parkı'nın kaynak değerine yönelik araştırmalar. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.

Azwin, I.N., Saad, R., Nordiana, M., 2013, Applying the seismic refraction tomography for site characterization. APCBEE Procedia, 5, 227-231.

BSSC (Building Seismic Safety Council), 1997. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures: Part 1, Provisions (FEMA 302). Building Seismic Safety Council, p. 334.

Bulut, F., 1989, Çambaşı (Trabzon-Çaykara) barajı ve Uzungöl hidroelektrik santral yerlerinin mühendislik jeolojisi açısından incelenmesi. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon.

CEN, 2004. Eurocode 8-design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules. (December 2004) Seismic Actions and Rules for Buildings. European Standard EN 1998-1. European Committee for Standardization, Brussels.

DSİ, 1982. Of Solaklı projesi Uzungöl 1 ünitesi mühendislik jeolojisi raporu (planlama aşaması), Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğü, Trabzon, Turkey.

García-Perez, A., Luzón, F., Navarro, M.J., Pérez-Ruiz, A., 2008. Determination of elastic properties of shallow sedimentary deposits applying a spatial autocorrelation method. Geomorphology: 93,74-88.

Griffiths, D. H., Barker, R. D, 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 29, 211-226.

Kanbur, M., Silahtar, A., Özsoy, C., 2011. Sığ Sismik Yansıma, MASW ve ReMi Yöntemleri ile sığ yapıların incelenmesi: Isparta yerleşim merkezi kuzeyi Pliyo-Kuvaterner çökel yapı örneği, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15-3, 224-232.

Kritakis, G.S., Vafidis, A., 2011, Different alternatives of surface waves data inversion, applications on environmental and geotechnical case studies. 6th Congress of Balkan Geophysical Society, P05 Budapest, Hungary.

MTA, 1985. Trabzon Çaykara Uzungöl (Şerah) yöresinin jeolojik haritası. MTA, Trabzon.

Poormirzaee, R., Moghadam, R.H., 2014. Determination of S-Wave structure via refraction microtremor technique in urban area: a case study. Journal of Tethys, 2(4), 347-356.

Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave. Geophysics, 64(3), 691-700.

Steeples, D.W., Miller, R.D.,1998, Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys. Geophysics, 63, 1213–1224.

TDY (Türk Deprem Yönetmeliği), 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında esaslar. AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Yeşilyurt, C., 2002, Uzungöl yöresi rekreasyon kaynaklarının coğrafi yönden değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi. Çanakkale.

Yılmaz, O., 2001, Seismic data analysis: I-Processing, inversion and interpretation of seismic data: SEG, Tulsa.

URL-1: https://www.landmarksoftware.com.

Bölgesel Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi: Kuzey Türkiye

Small Scale Landslide Susceptibility Assessment: Northern Turkey

T. Çan[1,*], T. Y. Duman[2]

[1] Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01330 Balcalı, Adana
[2] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı 06800 Çankaya/Ankara
([*] tolgacan@cukurova.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada, Türkiye'nin kuzeyinde 222,000 km^2'lik bir alanın heyelan duyarlılık değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Ulusal heyelan veritabanına göre çalışma alanında, toplam heyelan alanı 8692km^2 olan, 53060 adet heyelan bulunmaktadır. Çalışma alanı son derece büyük olmasına karşılık duyarlılık analizleri, mantıksal regresyon yöntemi kullanılarak tekbir aşamada ve toplam heyelanların %92'sini oluşturan derin heyelanlar için gerçekleştirilmiştir. Haritalama birimi olarak 250m mekansal çözünürlüğe sahip pikseller, heyelanları hazırlayıcı faktörler olarak, bölgesel jeoloji ve sayısal yükseklik modelinden üretilen değişkenler kullanılmıştır. Duyarlılık haritalarının performans değerlendirmesine göre yüksek ve çok yüksek duyarlı alanlar çalışma alanının %21-23'ne karşılık gelmekte ve toplam heyelanların %62-63'ünükapsamaktadır. Sonuç olarak analizlerde kullanılan heyelan veri seti ve çevresel değişkenlerin doğruluğu ve güvenilirliği ile çok geniş bir alanda niceliksel yöntem kullanılarak uygun heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Envanter, Heyelan Duyarlılık, Mantıksal Regresyon

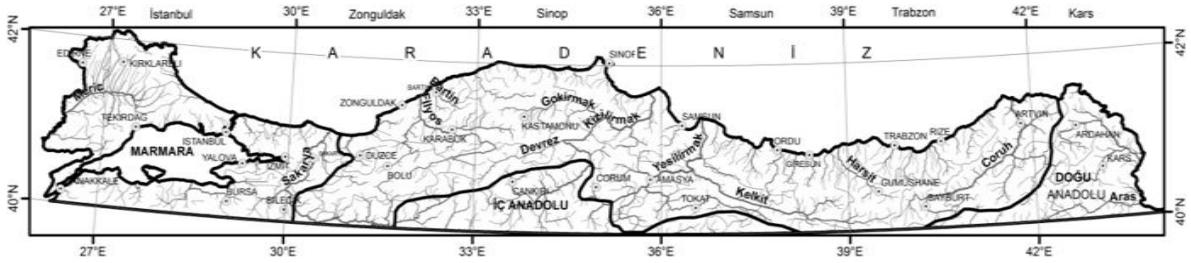
ABSTRACT: *In this study landslide susceptibility assessmentwere performed in Northern Turkey covering an area of 222,000 km^2. According to the national landslide database 53060 landslides were identified covering 8692 km^2. Although the study area is extremly large, landslide susceptibility assessments using logistic regression method, were achieved in single stage for the deep seated landslides which constitute 92 % of entire landslides. The spatial resolution of 250m pixels were used as mapping units and regional geology with variables produced from digital elevation models were considered as landslide conditioning factors.The validation of the susceptibility models comparing with the landslide inventory revealed that the high and very high susceptible zones correspond to 21-23 % of the study area including 62-63 % of the inventoried deep-seated landslides.The results suggest that the substantial accuracy and the reliability of the landslide database together with the considered conditioning factors are sufficient enough for quantitative zoning of landslide susceptibility in such a large region.*

Keywords:*Landslide Inventory, Landslide Susceptibility, Logistic Regression*

1. GİRİŞ

Bölgesel ölçekte heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılması heyelanların mekansal dağılımının ve bunları kontrol eden faktörlerin anlaşılmasını gerektirir. MTA Genel Müdürlüğü tarafından tamamlanan "Türkiye Heyelan Envanter Haritası" projesi kapsamında 1:25,000 ölçeğinde sayısal heyelan veri tabanı oluşturulmuş (Duman vd., 2005a), 1:500,000 ölçekli bölgesel (Duman vd., 2005b, Duman vd., 2006a, Duman vd., 2007abc, Duman vd., 2009) ve 1:1,500,000 ölçekli ulusal (Duman vd., 2011) heyelan envanter haritaları hazırlanmıştır.Ayrıca, heyelan veri tabanı MTA Genel Müdürlüğü web sayfasında, Yerbilimleri Portalı altında Web sunucusuna yüklenerek yasal uyarılar kapsamında tüm kullanıcıların hizmetine sunulmuştur (Çan vd., 2013). Heyelan envanter veritabanının doruluğu ve güvenilirliği, bu haritalar baz alınarak yapılan duyarlılık, olası tehlike ve risk değerlendirme çalışmalarına da doğrudan etki etmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin kuzeyinde 1:500,000 ölçekli İstanbul, Zonguldak, Sinop, Samsun, Trabzon ve Kars paftaları sınırlarını kapsayan toplam 222,000 km^2'lik bir alanın heyelan duyarlılık değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Çalışma alanı ülkemizin %29'una karşılık gelmekte olup mevcut heyelanların %50'den fazlasını içermektedir.

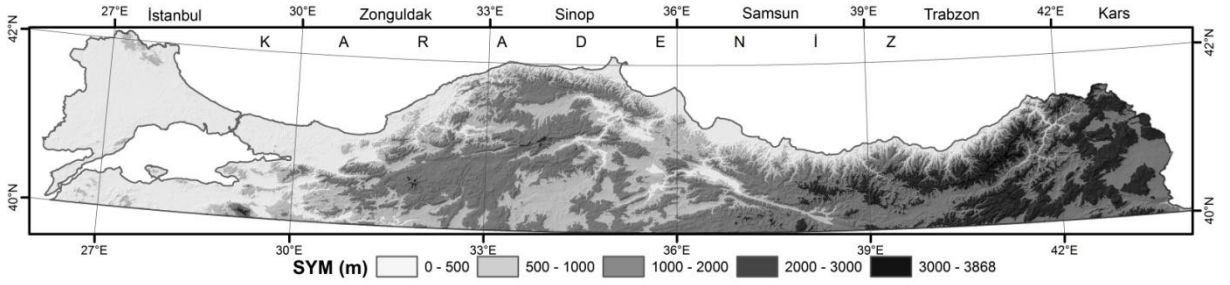
Çalışma alanı içerisinde çok sayıda heyelan duyarlılık çalışması yapılmıştır (örn. Aksoy ve Ercanoglu 2012; Alparslan 2011; Çan vd., 2005ab; Duman vd., 2006b; Eker vd., 2012; Ercanoglu 2005; Ercanoglu ve Gokceoglu 2004; Gorum vd., 2008; Mazman ve Çan, 2006, Nefeslioglu vd., 2010, 2012; Suzen ve Doyuran 2004; Suzen ve Kaya 2012; Yilmaz vd., 2012, Akgun ve Bulut 2007; Akgun vd., 2008; Karsli vd., 2009; Yalcin ve Bulut 2007; Yalcin vd., 2011). Bu çalışmaların büyük çoğunluğu birkaç on kilometre kareden, birkaç yüzkilometre kare arasındadır. En geniş alanlar Karsli vd., (2009) ve Yalcin vd., (2011) tarafından yapılmış olup sırasıyla 2500 ve 4660 km^2 lik alanlarda gerekleştirilmiştir. Ülkemizin kuzeyi, özellikle de Karadeniz bölgesi heyelandan olumsuz etkilenen bölgeler arasında ilk sırayı almaktadır. 1950-2008 yılları arasındaki dönemde Gökçe vd., (2008) tarafından yapılan heyelan arşiv verilerine göre ulusal düzeyde yerleşim birimlerinde etkili olan heyelan olaylarının % 65'i çalışma alanı içerisinde yeralmaktadır. Bu çalışmada bölgenin heyelan duyarlılık değerlendirmesi sadece derin heyelanlar için mantıksal regresyon yöntemi kullanılarak tek bir aşamada, alt bölgelere ayrılmadan gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının son derece büyük olmasına rağmen mevcut heyelan veri tabanı ve göz önünde bulundurulan çevresel değişkenler ile oldukça yüksek tutarlılığa sahip duyarlılık haritası elde edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı içindeki ana yerleşim birimleri, coğrafi bölge sınırları ve drenaj ağı sistemi.

2. ÇALIŞMA ALANI

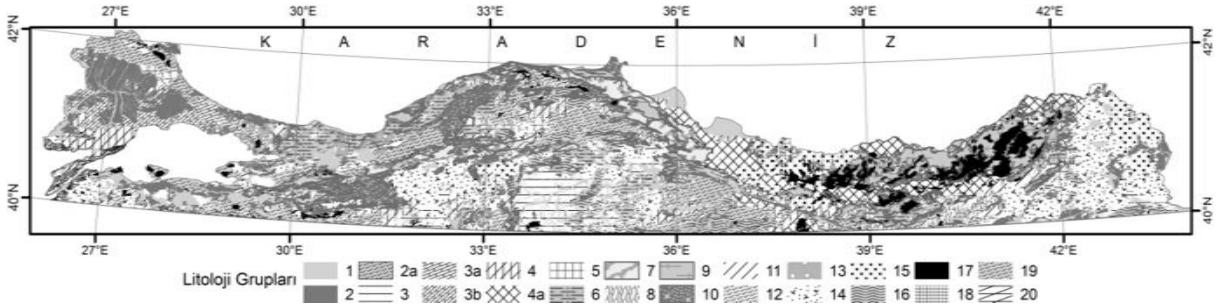
Çalışma alanı Marmara ve Karadeniz bögelerinin hemen tamamı ile kısmen İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri içerisinde yer almaktadır (bkz Şekil 1). Morfolojik olarak Karadeniz kıyısına paralel olarak uzanan bu alan, Kuzey Anadolu dağları ile temsil edilmekte ve yükseklik değerleri batıda Marmara Bölgesinden, doğu Karadeniz bölgesine doğru göreceli olarak artarak yaklaşık 3900 m'ye ulaşmaktadır (Şekil 2). Çalışma alanının % 50'si Sakarya, Filyos, Kızılırmak, Yeşilırmak ve Çoruh nehri havzaları içerisinde yer almaktadır. Söz konusu dağ kuşağı güney kesimlerinden itibaren bu nehirler ve yan kolları tarafından yükseklik farkı 1000 m'ye varan derin yarılımlı vadiler tarafından kesilerek Karadeniz'e drene olmaktadır.



Şekil 2. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli.

Coğrafi bölgeler bazında değerlendirildiğinde yıllık ortalama yağış 1175mm ile Karadeniz bölgesinde gözlenmektedir. Karadeniz bölgesini yaklaşık 700 mm ile Marmara bölgesi takip etmekte, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde ise ortalama yıllık yağış 420 mm dolaylarındadır (Ünal vd., 2013). Karadeniz bölgesinde kıyı kuşağı boyunca yağış değerleri artmakta ve doğuya doğru ortalama yıllık yağış 2000 mm'yi aşmaktadır. Bölgede heyelanların büyük çoğunluğu aşırı yağışlar sonucu tetiklenmektedir. Jeolojik olarak çalışma alanı Pontidler ana tektonik birliği ve örtü birimleri içinde

yer almaktadır. Pontidler, batı, orta ve doğu olmak üzere üçe ayrılmakta olup çok sayıda alt tektonik kuşaklar ile temsil edilmektedir(Yılmaz vd. 1997). Çalışma alanının tamamını kapsayan jeoloji haritası 1:500,000 ölçeğinde MTA Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmıştır (Akdeniz, 2002; Akdeniz ve Güven, 2002; Aksay vd., 2002; Hakyemez ve Papak, 2002; Türkecan ve Yurtsever, 2002; Uğuz vd., 2002). Heyelanların bölgesel jeoloji içerisinde değerlendirilmesine olanak sağlamak amacıyla birimler benzer köken, yaş ve ortam gibi temel özellikler göz önünde bulundurularak yirmi litoloji grubu (G) altında toplanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışma alanın basitleştirilmiş litoloji grupları haritası. (Duman vd.2005b, 2006a, 2007a-c, 2009). G1: Pliyosen-Kuvaterner çökelleri, G2: Miyosen-Pliyosen-Ayrılmamış karasal kırıntılılar, G2a: Miyosen Ayrılmamış karasal kırıntılı ve nadiren karbonatlar, G3: Üst Eosen-Pliyosen-Ayrılmamış evaporitli çökel kayalar,G3a: Paleosen-Alt Miyosen-Volkanik ve çökel kayalar, G3b: Üst Eosen-Alt Miyosen- Karasal kırıntılılar, G4: Paleosen-Pliyosen Karasal kırıntılılar ve karbonatlar, G4a: Eosen-Volkanik ve çökel kayalar, G4b: Eosen-Alt Miyosen-Kırıntılı ve karbonatlar, G5: Üst Paleosen-Alt Pliyosen-Neritik kireçtaşları, G6: Üst Paleosen- Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar, G7: Üst Kretase-Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar, G8: Orta Kambriyen-Paleosen- pelajik kireçtaşları, G9: Orta Triyas -Eosen-Volkanik ve çökel kayalar, G10: Kretase-Kırıntılı ve karbonatlar, G11: Alt Kretase-Üst Jura- Karbonat ve kırıntılılar, G12: Alt Kambriyen-Permo-Triyas-Karbonat ve kırıntılılar, G13: Prekambriyen-Alt Liyas-Karbonat ve kırıntılılar, G14: Paleosen -Kuvaterner-Ayrılmamış volkanikler, G15: Alt Jura-Kuvaterner-Riyodasit, bazalt, andezit, spilit vb.,G16: Mesozoyik-Ofiyolit, G17: Prekambriyen-Miyosen-Granitoyidler, G18: Kretase-Metagabro-amfibolit, G19: Prekambriyen-Eosen-Metamorfik kayalar, G20: Prekambriyen-Kretase-Mermer, kalkşist, rekristalize kireçtaşı.

3. HEYELAN ENVANTERİ

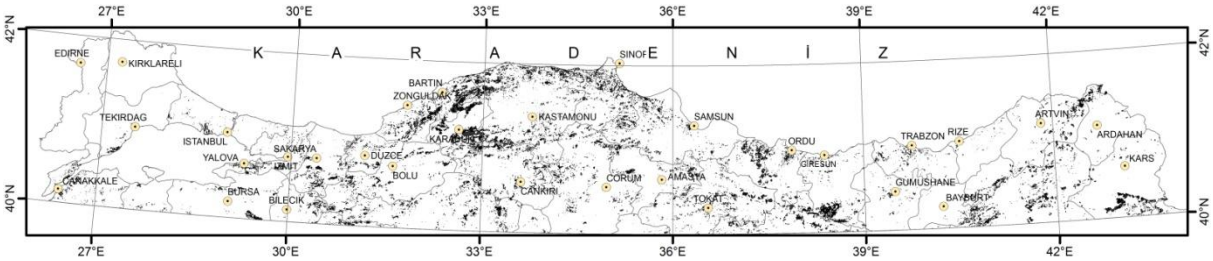
Envanter veri tabanında heyelanların sınıflandırılmasında Varnes (1978)'in sınıflaması esas alınarak, kütle hareketleri hareket tipine göre, akma, kayma ve karmaşık olarak sınıflandırılmıştır. Düşme ve devrilme tipi heyelanlar ölçek sınırlamalarından dolayı göz önünde bulundurulamamıştır. Ayrıca, heyelanlar görece derinliklerine göre de sınıflandırılmıştır. Buna göre, kayma yüzeyinin görece derinliği 5 m'den az olanlar sığ, 5 m'den fazla olanlar derin olarak farklı sembol ve renkler kullanılarak gösterilmiştir. Heyelanlar aktivitelerine göre ise aktif ve aktif olmayan şeklinde yine ikiye ayrılarak sınıflandırılmıştır. Aktif heyelanlar WP/WLI (1993) sınıflamasına göre halen hareket eden, aktif olmayanlar ise kalık heyelan sınıflarına karşılık gelmektedir. Heyelanlar poligon ve çizgi olmak üzere iki farklı sembol kullanılarak gösterilmiştir. Poligon sembolleri, 1:25,000 ölçekli haritada alansal olarak gösterilebilen heyelanlar için, küçük ölçekli akma türü heyelanlar için ise çizgisel semboller kullanılmıştır (Duman vd., 2005a).

Çalışma alanında toplam alanı 8,693 km^2 olan 36,986 adet heyelan haritalanmıştır(Duman vd.2005b, 2006a, 2007a-c, 2009). Bu heyelanların sayısal olarak % 93'ü, alansal olarak % 90'ı derin kayma türü heyelanlardan oluşturmaktadır (Çizelge 1, Şekil 4). Çizgisel olarak tanımlanan akma türü heyelanların sayısı ise 16,164'tür. Jeolojik açıdan bakıldığında,Miyosen-Pliyosen-Ayrılmamış karasal kırıntılılar (G2), Paleosen-Pliyosen Karasal kırıntılılar ve karbonatlar (G4), Üst Paleosen-Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar (G6), Üst Kretase-Eosen-Kırıntılı ve karbonatlar (G7), Kretase-Kırıntılı ve karbonatlar (G10) ve Paleosen -Kuvaterner-Ayrılmamış volkanikler (G14) toplam heyelanların % 60'a yakınını

içermekte olup heyelana en duyarlı birimleri oluşturmaktadır. Heyelanların mekansal olarak dağılımına bakıldığında orta ve batı karadeniz bölgesinde, Kelkit, Çoruh ve Aras havzaları içerisinde yoğunlaştığı görülmektedir. Doğu Karadeniz kıyı şeridi boyunca heyelan sıklığı diğer bölgelere oranla daha yüksek olmasına karşılık heyelanların genelde daha küçük ölçekli akma türü heyelanlardan oluşması ve bitki örtüsü ile diğer erozyonal süreçler nedeniyle uzun yıllar morfolojilerini koruyamamasından dolayı bu bölgelerde derin heyelan yoğun olarak gözlenmemektedir.

Çizelge1. Çalışma alanındaki heyelanların tanımlayıcı istatistik verileri.

	Kaymalar			Akmalar		
	Derin eski	Derin aktif	Sığ aktif	Aktif (Alansal)	Eski (Alansal)	Aktif (Çizgisel)
Adet	11930	22723	1021	1219	3	16164
Ortalama (km^2)	0.31	0.18	0.64	0.11	0.32	-
En büyük (km^2)	72.94	21.95	66.14	3.35	0.74	-
En küçük (km^2)	0.004	0.002	0.02	0.008	0.05	-
Toplam (km^2)	3752.45	4154.2	657.3	128.7	0.96	-



Şekil 4. Çalışma alanındaki derin heyelanların mekansal dağılımı.

4. HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ

Heyelan duyarlılık değerlendirmeleri ile ilgili çok sayıda yaklaşım bulunmakta olup genelde niteliksel ve niceliksel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Corominas vd., 2014). Bu çalışmada niceliksel yöntemlerden çok değişkenli istatistiksel yaklaşım yöntemlerinden biri olan mantiksal regresyon yöntemi kullanılmıştır.

Mantıksal regresyon, bağımlı değişkenin ikili gözlendiği durumlarda, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenlerin neden sonuç ilişkisini belirlemede kullanılan, bağımsız değişkenlere göre bağımlı değişkeninin beklenen değerlerinin Eşitlik 1'de verilen ilişkiye göre olasılık olarak elde edildiği bir regresyon yöntemidir (Kleinbaum ve Klein 2002).

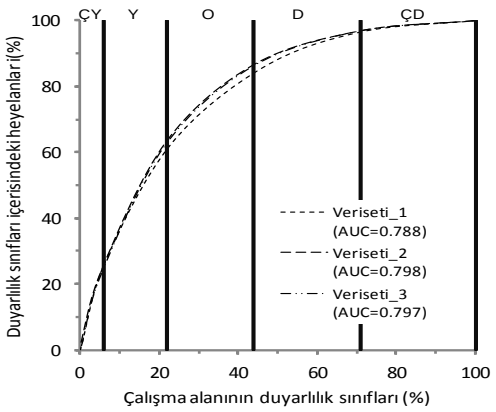
$$P(Y=1)=p=\frac{1}{1+e^{-(\alpha+\beta_1 x_1+\ldots\ldots\beta_n x_n)}} \qquad (1)$$

Eşitlikte, P (Y =1) veya p maksimum olabilirlik tahminine göre heyelan oluşma olasılığını, α mantıksal regresyon denklemindeki sabit, β_i ise x_i bağımsız değişkenine ait regresyon katsayısıdır. Heyelanları hazırlayıcı çevresel faktörler olarak sayısal yükseklik modeli (blz. Şekil 2) ve bu modelden üretilen yamaç eğimi, yamaç eğrisellikleri, nehir aşındırma gücü indisi, topoğrafik nemlilik indeksi, eğim yamaç yönelimi değişimi, pürüzlülük, engebelik, yamaç durumu, yüzey röliyef oranı, ortalama eğim, sıcaklık yük indisi, yüzey/alan oranı kullanılmıştır(Moore vd., 1991, Burrough ve McDonell 1998, Riley vd., 1999, Pike ve Wilson 1971, McCune ve Keon 2002, Berry 2002). Çalışma alanının jeoloji haritası (bkz. Şekil 3) raster formatına dönüştürülerek herbir litoloji grubu ikili değişken (1-0) olarak verisetine dahil edilmiştir. Mantıksal regresyon yönteminde kullanılan sürekli bağımsız değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistiksel bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir. Çalışma alanı 125,541 adet heyelanlı piksel olmak üzere toplamda 3,551,983 adet piksel ile temsil edilmektedir. İstatistiksel analizlerde heyelan sayısına eşit sayıda heyelandan etkilenmemiş pikseller rastgele seçim yöntemi ile seçilerek üç farklı veri seti oluşturulmuştur.

Herbir veri setinde ileri aşamalı mantıksal regresyon yöntemi uygulanarak, çalışma alanının yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarının en az bu sınıflar içerisindeki mevcut heyelanların en fazla olduğu veri seti son duyarlılık haritası olarak belirlenmiştir. Herbir duyarlılık haritasının mevcut heyelan veritabanı ile karşılaştırılması sonucu elde edilen başarı eğrileri ve eğri altında kalan alanlar Şekil 5'te verilmiştir.

Çizelge 2. Duyarlılık analizlerinde kullanılan sürekli değişkenlere ait tanımlayıcı istatistiksel veriler.

Değişkenler	Min.	Mak.	Ort.	Medyan	Mod	Std.Sapma
Yükseklik	0.00	3868.07	1019.13	963.79	10.00	719.52
Yamaç eğimi	0.00	56.77	8.88	7.14	0.00	7.11
Nehir aşındırma gücü indisi	0.00	7.86	0.37	0.04	0.00	0.69
Topoğrafik nemlilik indisi	2.98	25.62	6.79	6.20	10.31	2.10
Teğetsel eğrilik	-1.54	1.65	0.00	0.00	0.00	0.15
Düzlemsel eğrilik	-1.23	0.93	0.00	0.00	0.00	0.09
Kesit eğriliği	-0.93	1.15	0.00	0.00	0.00	0.08
Engebelik	0.00	1.00	0.48	0.48	0.00	0.24
Ortalama eğim	0.00	45.66	8.88	7.71	0.00	6.32
Pürüzlülük	0.00	17.75	5.64	5.64	0.00	2.38
Eğim yamaç yön. dönüşümü (cos)	-1.01	0.99	0.01	0.00	0.00	0.15
Eğim yamaç yön. dönüşümü (sin)	-1.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.14
Eğim yamaç yön. dönüşümü (trans)	0.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.35
Yamaç eğiminin 2. türevi	0.00	5.78	0.52	0.39	0.00	0.45
Yamaç durum	-251.09	246.74	0.02	-0.15	0.00	24.23
Yüzey röliyef oranı	0.00	0.90	0.48	0.49	0.00	0.10
Sıcaklık indisi	2383.00	7040.00	2656.60	2557.00	2425.00	281.69
Yüzey alan oranı	62500.0	114060.0	63801.3	62988.5	62500.0	2000.4

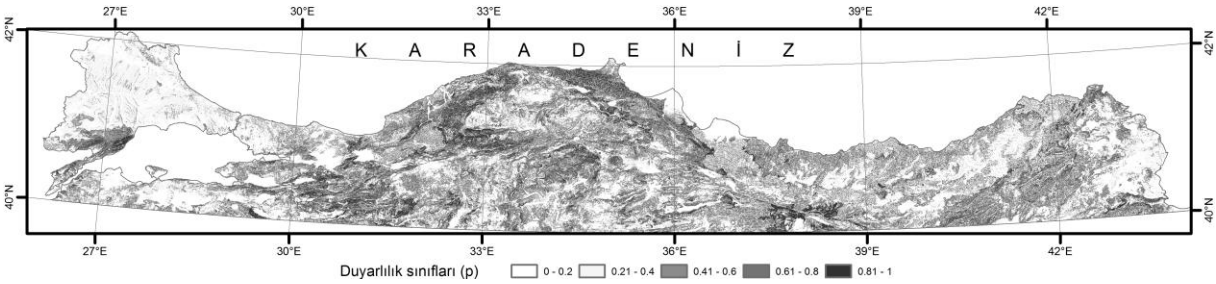


Şekil 5. Duyarlılık haritalarının başarı oranı eğrileri.

Duyarlılık haritalarının performansları birbirine çok yakın olup en yüksek eğri altında kalan alan (AUC) 0.798 ve heyelan yüzdesi iki nolu veri setinde elde edilmiştir. İki nolu verisetine ilişkin lojit dönüşümü uygulanmasıyla lineer mantiksal regresyon denklemi Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\text{Log } (p/1\text{-}p) =& -.000097x(\text{Yükseklik}) + 0.517x(\text{Eğim}) + 0.434x(\text{Nehir aşındırma gücü}) - \\ & 0.147x(\text{Topografik nemlilik indisi}) - 2.137x(\text{Kesit yamaç eğriliği}) \\ & + 0.145x(\text{Ortalama eğim}) - 0.535x(\text{Pürüzlülük}) - 0.384x(\text{Eğim yamaç} \\ & \text{yönelimi dönüşümü(trans)}) - 0.380x(\text{yamaç eğiminin 2. türevi}) - \\ & 0.021x(\text{Yamaç durumu}) - 0.0016x(\text{yüzeyalan oranı}) - .266x(G1) \\ & + 0.864x(G2) + 1.558x(G2a) + 0.988x(G3) + 1.017x(G4) - 0.737x(G4a) + \\ & 1.027x(G6) + 0.476x(G7) - 0.435x(G9) + 0.867x(G10) - 1.240x(G12) - \\ & 2.487x(G17) - 0.534x(G19) - 0.877x(G20) + 99.20 \end{aligned} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de sürekli veriler yanısıra çok sayıda litoloji gruplarının regresyon denkleminde yeraldığı görülmektedir. Litoloji gruplarından G2, G3, G4, G6, G7, G10 ile yamaç eğimi, ortalama eğim, nehir aşındırma gücü indislerinin heyelan oluşumuna pozitif yönde etki ettiği anlaşılmaktadır. Çalışma alanına ait en iyi tutarlılığı sergileyen heyelan duyarlılık haritası veri seti 2'de elde edilmiştir (Şekil 6). Duyarlılık sınıf aralıklarının seçimi sonuç duyarlılık haritası üzerindeönemli etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada çalışma alanındaki yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıfların en az, bu sınıflar içerisindeki heyelan oranlarının en fazla olduğu eşit aralıklı duyarlılık sınıfları tercih edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen duyarlılık haritasında yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıflar çalışma alanının %22'sine karşılık gelmekte olup, heyelanların % 63'ünü kapsamaktadır. Düşük ve çok düşük duyarlı alanlar çalışma alanının % 57'sine karşılık gelmekte olup heyelanların % 13'u bu sınıf aralıklarında bulunmaktadır.



Şekil 6. Veriseti 2'den elde edilen çalışma alanının heyelan duyarlılık haritası.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk olarak Türkiye'nin kuzeyinde 222.000 km^2'lik bir alanın tarihsel heyelan envanterveri tabanı değerlendirilmiştir. Çalışma alanında toplam alanı 8,693 km^2 olan 36,986 adet heyelan haritalanmış olup, heyelanların sayısal olarak % 93'ü, alansal olarak % 90'ı derin kayma türü heyelanlardan oluştuğu belirlenmiştir. Çalışma alanındaki heyelanların sınıflandırılması ve haritalanmasında izlenen standart yöntem ile göz önünde bulundurulan jeolojik ve jeomorfometrik değişkenler oldukça geniş bir bölgedeheyelan duyarlılık değerlendirmesi yapılmasını olanaklı hale getirmiştir. Elde edilen duyarlılık haritasında orta-çok yüksek duyarlı alanlar mevcut heyelanların % 87'lik bölümünü içermektedir. Sonuçlar analizlerde kullanılan heyelan veri seti ve çevresel değişkenlerin doğruluğu ve güvenilirliği ile çok geniş bir alanda niceliksel yöntem kullanılarak uygun heyelan duyarlılık haritasının hazırlanabileceğini göstermiştir.

6. KAYNAKLAR

Akdeniz, N., 2002. 1:500.000 ölçekli türkiye jeoloji haritası Kars paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No: 6, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.

Akdeniz, N., Güven, İ.H., 2002. 1:500.000 ölçekli türkiye jeoloji haritası Trabzon paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No: 5, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.

Akgun, A., Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. Environmental Geology, 51, 1377-1387.

Akgun, A., Dag, S., Bulut, F., 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. Environmental Geology, 54, 1127-1143.

Aksay, A., Pehlivan, Ş., Gedik, İ., Bilginer, E., Duru, M., Akbaş, B., Altun, İ., 2002. 1:500.000 ölçekli türkiye jeoloji haritası Zonguldak paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No: 2, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Aksoy, B., Ercanoglu, M., 2012. Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: An example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey). ComputersandGeosciences, 38, 87-98.

Alparslan, E., 2011. Landslidesusceptibilitymapping in Yalova, Turkey, by Remote Sensing and GIS. EnvironmentalandEngineeringGeoscience, 17, 255-265.

Berry, J.K., 2002. Use surface area for realistic calculations. Geoworld, 15(9), 20–1.

Burrough, P.A.,McDonell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford UniversityPress, New York..

Corominas, J.,Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervas, J., Smith, J.T., 2014. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 209-263.

Çan, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Duman, T.Y., 2005b. Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. Geomorphology, 72, 250-271.

Çan, T., Duman, T.Y., Nefeslioğlu, H.A., Durmaz, S. , Gökçeoğlu, C., Sonmez H., 2005a. Earthflows in a small catchment from Eastern Black Sea region (Turkey): Conditional (Environmental) factors and susceptibility assessments. Int. Symp. on Latest Natural Disaster-New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection. ProceedingsSofia.

Çan, T., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çörekçioğlu, Ş., Karakaya-Gülmez, F., Elmacı, H., Olgun, Ş., Hamzaçebi, S. Emre, Ö., 2013, Türkiye heyelan veri tabanı. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2013, Ankara.

Duman, T. Y., Emre, Ö., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Keçer, M., Doğan, A., Durmaz S., Ateş, Ş., 2005b. Türkiyeheyelan envanteri haritası-1:500.000 ölçekli Zonguldak Paftası, MTA Özel Yayınlar Serisi-4, Ankara.

Duman, T. Y., Çan, T., Emre, Ö., Keçer, M., Doğan, A., Ateş, Ş., Durmaz, S., 2005a. Landslide inventory ofnorth western Anatolia, Turkey. EngineeringGeology, 77, 99-114.

Duman, T.Y., Çan, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Sonmez, H., 2006b. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. Environmental Geology, 51, 241-256, doi: DOI 10.1007/s00254-006-0322-1.

Duman, T. Y., Nefeslioğlu, H.A., Çan, T., Ateş, Ş., Durmaz, S., Olgun, Ş., Hamzaçebi S., Keçer, M., 2006a.Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1:500.000 ölçekli İstanbul Paftası," MTA Özel Yayınlar Serisi-6, 25s., Ankara.

Duman, T. Y., Nefeslioğlu, H.A., Çan, T., Olgun, Ş., Durmaz, S., Hamzaçebi S., Çörekçioğlu, Ş., 2007c. Türkiye heyelan envanteri haritası-1:500.000 ölçekli Trabzon paftası, MTA Özel Yayınlar Serisi-9, Ankara.

Duman, T. Y., Durmaz, S., Çan, T., Olgun, Ş., Ateş, Ş., Keçer, M., Hamzaçebi, S., Nefeslioğlu H.A. Çörekçioğlu, Ş., 2007b. Türkiye heyelan envanteri haritası-1:500.000 ölçekli Samsun Paftası, MTA Özel Yayınlar Serisi-8, Ankara.

Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioğlu, H.A., Hamzaçebi, S., Durmaz, S., Emre, Ö., Ateş, Ş., Keçer M., Çörekçioğlu, Ş., 2007a. Türkiye heyelan envanteri haritası-1:500.000 ölçekli Sinop Paftası, MTA Özel Yayınlar Serisi-7, Ankara.

Duman, T.Y., Olgun, Ş., Çan, T., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz, S., Nefeslioğlu H.A., Çörekçioğlu, Ş., 2009. Türkiye heyelan envanteri haritası-1:500.000 ölçekli Kars paftası, MTA Özel Yayınlar Serisi-14, Ankara.

Duman, T.Y., Çan T.,Emre, Ö.,2011, 1/1.500.000 Türkiye heyelan envanteri haritası, MTA Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi-27, Ankara.

Eker, A.M., Dikmen, M., Cambazoglu, S., Duzgun, S.H.S.B., Akgun, H., 2012. Application of artificialneural network andlogisticregressionmethodstolandslidesusceptibilitymappingandcomparison of theresultsfortheUlus district, Bartin. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27, 163-173.

Ercanoglu, M., 2005. Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5.

Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). Engineering Geology, 75, 229-250.

Gökçe, O., Özden, Ş., Demir, A., 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı, Afet bilgileri envanteri. Afet İşleri Genel Müdürlüğü.

Görum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., 2008. Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). Natural Hazards, 46, 323-351.

Hakyemez, H.Y.,Papak, İ., 2002, 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Samsun paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No:4, MTA Genel Müdürlüğü.

Karsli, F., Atasoy, M., Yalcin, A., Reis, S., Demir, O.,Gokceoglu, C., 2009. Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey). EnvironmentalMonitoringandAssessment, 156, 241-255.

Kleinbaum, D.G., Klein, M., 2002. LogisticRegression, a Self-learningText, Springer, New York.

Mazman, T., Çan,T.,2006. Mantıksal regresyon yöntemi ile Kumluca havzası (Batı Karadeniz) Heyelan duyarlılık değerlendirmesi, Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Denizli.

Moore, I.D.,Grayson, R.B., Landson, A.R., 1991. Digitalterrainmodelling: a review of hydrological, geomorphological, andbiologicalapplications. Hydr. Processes, 5, 3–30.

Nefeslioglu, H.A., San, B.T., Gokceoglu, C., Duman, T.Y., 2012. An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping. International Journal of Applied Earth ObservationandGeoinformation, 14, 40-60.

Nefeslioglu, H.A., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A.S., Duman, T.Y., 2010. Assessment of landslidesusceptibilitybydecisiontrees in themetropolitanarea of Istanbul, Turkey. Mathematical Problems in Engineering, Doi 10.1155/2010/901095.

Pike, R.J.,Wilson, S.E.,1971. Elevation relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area altitude analysis. Bulletin of theGeologicalSociety of America, 82, 1079-1084.

Riley, S.J., DeGloria, S.D., Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. IntermountainJournal of Sciences, 5, 1-4.

Suzen, M.L., Doyuran, V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Engineering Geology, 71, 303-321.

Suzen, M.L., Kaya, B.S., 2012. Evaluation of environmental parameters in logistic regression models for landslide susceptibility mapping. International Journal of Digital Earth, 5, 338-355.

Uğuz, M. F., Sevin, M., Duru, M., 2002. 1:500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası Sinop paftası. Türkiye 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritaları, No:3, MTA Genel Müd. Ankara.

Ünal, Y., Kindap, T., Karaca, M., 2003. Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. International Journal of Climatology, 23, 1045-1055.

Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control.

WP/WLI (UNESCO Working Party on World Landslide Inventory) 1993. MultilingualLandslideGlossary. Bitech, Richmond, British Columbia.

Yalcin, A., Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). Natural Hazards, 41, 201-226.

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C., Yomralioglu, T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. Catena, 85, 274-287.

Yilmaz, C., Topal, T., Suzen, M.L., 2012. GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). EnvironmentalEarth Sciences, 65, 2161-2178.

Yilmaz, Y., Tüysüz, O., Yigitbas, E., Genç, S.C., Sengör, A.M.C., 1997. Geology and tectonic evolution of the Pontides. Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region: American Assoc. of Petroleum Geologists Mem., 183-226.

Cankurtaran Tüneli'nin Çıkış Bölümündeki Portal ve Yol Yarma Şevinin Duraylılık Analizleri

Stability Analyses of the Portal and Cut Slopes on the Exit Section of the Cankurtaran Tunnel

A. Kaya[1,*], F. Bulut[2]

[1] *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize*
[2] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon*
*(*ayberk.kaya@erdogan.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümünde açılan portal ve yol yarması şevinin duraylılığı kinematik, limit denge ve sayısal analiz yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Kaya şevleri, Esosen yaşlı Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltlarda açılmaktadır. Şevlerin duraylılık analizleri üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk önce, bazaltlardaki ana eklem setleri göz önüne alınarak şevler için kinematik analizler yapılmıştır. Kinematik analizler sonucunda yarma şevinde düzlemsel kayma türü bir yenilme olasılığının olduğu, portal şevinde ise süreksizliklere bağlı bir yenilmenin gerçekleşmeyeceği belirlenmiştir. Daha sonra, yapılan limit denge analizinde güvenlik katsayısının 1.81 olduğu ve yarma şevinde düzlemsel bir kaymanın gelişmeyeceği saptanmıştır. Son aşamada, şevlerde herhangi bir dairesel kaymanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemek için, tasarlanan şev geometrisi esas alınarak sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizlerde, sonlu eleman tabanlı Phase^2 programı kullanılmış ve güvenlik katsayıları portal şevi için 1.51, yarma şevi için ise 1.89 olarak belirlenmiştir. Duraylılık analizleri, portal ve yarma şevlerinin duyarsızlık tehlikesi taşımadığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Portal Şevi, Yol Yarma Şevi, Duraylılık Analizi, Güvenlik Katsayısı, Tünel

ABSTRACT: *In this study,the portal and cut slopes on the exit section of the Cankurtan Tunnel were investigated using the kinematic, limit equilibrium and numerical analyses. The rock slopes have been excavated in the basaltic rocks of the Eocene aged Kabaköy Formation. The stabilty analyses were carried out in three stages. Firstly, the kinematic analyses were performed taking into account the main joint sets for the slopes.The results of the kinematic analyses showed that the planar failure was possible along the cut slope and no failure is expected to occur on the portal slope. Secondly, after performing the limit equilibrium analysis,it was determined that the factor of safety is 1.81 and the planar type failure was not expected on the cut slope. In the final stage, the numerical analyses were performed using the finite element based Phase^2 programme to determine the possiblity of circular failure throughout the slopes. Based on the numerical analyses, the factor of safety walues were determined as 1.51 and 1.89 for the portal and cut slopes, respectively, and, no circular failure is possible. The stability analyses showed that there is no any instability problem on the rock slopes.*

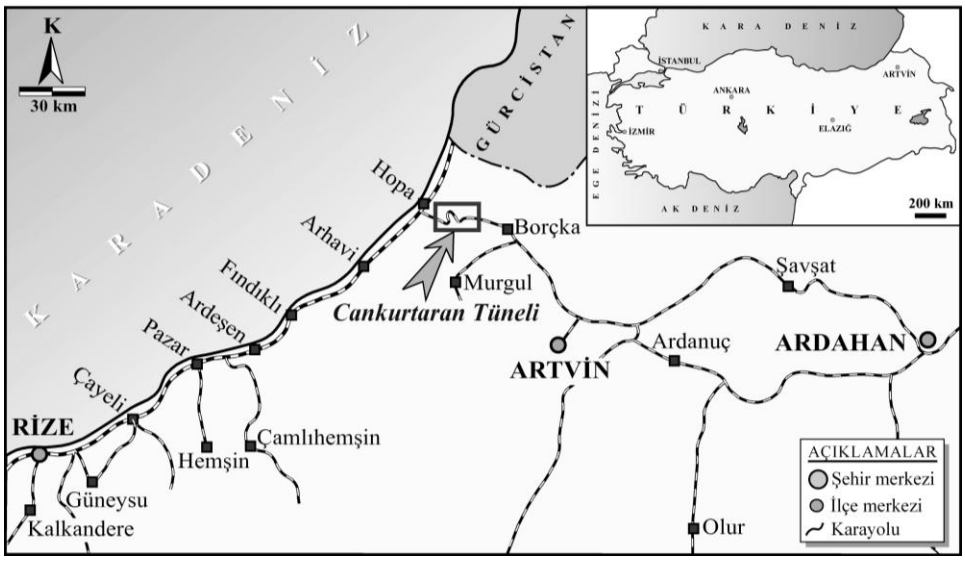
Keywords: *Portal Slope, Cut Slope, Stability Analyses, Factor Of Safety, Tunnel*

1. GİRİŞ

Kaya şevlerinin duraylılık problemlerinin çözümü, oluşturulacak şevin ve süreksizliklerle sınırlandırılmış blokların geometrisi, kaya kütlesinin ve malzemesinin özellikleri, süreksizliklerin ve şevin yönelimi, yeraltısuyu koşulu, süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı, dinamik yükler, kalıcı gerilmeler gibi çeşitli etmenlerin bilinmesine bağlıdır. Bu özellikler bilindiğinde kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak kaya şevlerinin duraylılık sorunları araştırılabilmektedir. Şevin ve süreksizliklerin konumları ile süreksizlik yüzeyinin sürtünme açısının kullanıldığı kinematik analizde, düzlemsel, kama tipi veya devrilme türü duraysızlıklar araştırılabilmektedir. Kinematik analiz sonucunda herhangi bir yenilme riski ortaya çıkarsa, limit denge analizleri ile olası tehlike incelenmektedir. Limit denge analizleri, yenilme düzlemi boyunca gelişen makaslama dayanımını,

boşluk suyu basıncını ve maksimum yatay yer ivmesi gibi dış kuvvetleri dikkate almaktadır. Limit denge analizleri şevlerin duraylılığının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan basit bir yöntem olmasına rağmen duraylılığın, kazı örselenmesi, süreksizlik yönelimleri gibi karmaşık mekanizmalar tarafından kontrol edildiği durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu durumda, kaya kütlesinin deformasyon ve kütle özelliklerinin de göz önünde bulundurulduğu Sonlu Elemanlar (FEM), Ayrık Elemanlar (DEM), Sonlu Farklar (FDM) ve Sınır Elemanlar (BEM) gibi sayısal analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada, 5.288 m uzunluğu ile açıldığında Türkiye'nin en uzun çift tüp tüneli olacak Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli'nin (Şekil 1) çıkış bölümünde açılan portal ve yol yarması şevinin duraylılığı kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak incelenmiştir. Çıkış bölümündeki portal ve yol yarma şevleri Esosen yaşlı Kabaköy Formasyonu'na ait bazaltlarda açılmaktadır. Yol yarması şevleri portal girişine yapılacak 7 no.lu köprüden sonra yolun sol yamacında kazılmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanının ait yer bulduru haritası.

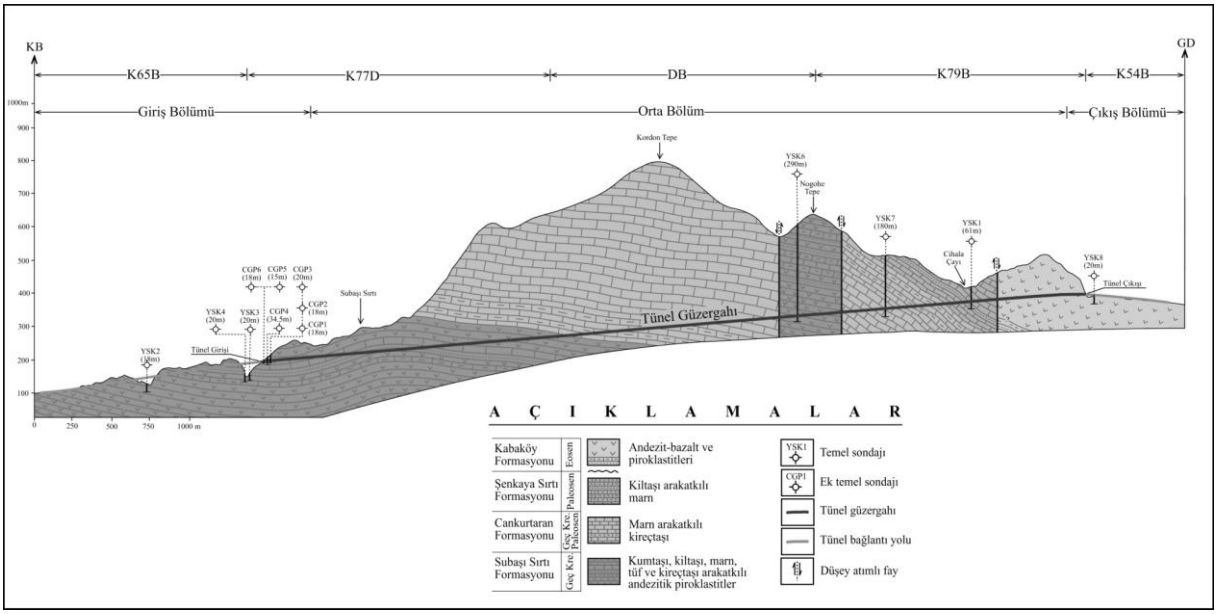
2. ÇALIŞMA ALANININ VE ÇEVRESİNİN JEOLOJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde, yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Subaşı Sırtı Formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Cankurtaran Formasyonu, Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı Formasyonu, Eosen yaşlı Kabaköy Formasyonu ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve yamaç molozları yüzeylemektedir (Çapkınoğlu, 1981; Güven, 1993).

Subaşı Sırtı Formasyonu, tabanda piroklastitlerle başlayıp kireçtaşı, marn, kumtaşı, tüf, silttaşı arakatkıları içeren ve tavana doğru tekrar piroklastit seviyesi ile son bulan bir volkano-tortul istif özelliğindedir. Birim, Cankurtaran Tüneli'nin giriş bölümünün yer aldığı Subaşı Köyü civarında genişçe yüzeylemektedir. Subaşı Sırtı Formasyonu'nun üzerine uyumlu olarak gelen Cankurtaran Formasyonu, tabanda ve tavanda ince tabakalanmalı marn ara seviyeleri içeren kireçtaşlarından, orta kısmında kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Birim, tünel güzergâhının orta kısmında yüzleme vermektedir. Şenkaya Sırtı Formasyonu, bordo, gri ve kirli sarı renkli marnlardan oluşmakta olup, yer yer ince tabakalanmalı kırmızı ve gri renkli kireçtaşı ile ince orta tabakalanmalı kiltaşı ara seviyeleri içermektedir. Çalışmanın konusunu oluşturan ve Paleosen yaşlı birimlerin üzerine taban konglomerası ile açısal uyumsuzlukla gelen Kabaköy Formasyonu ise, tabanda kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn tabakaları içeren andezit-bazalt ve piroklastitlerinden oluşmaktadır. Formasyonun tabanındaki tortul seviye, Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümünde gözlenemediğinden Şenkaya Sırtı Formasyonu ile Kabaköy Formasyonu arasındaki sınırın bu alanda faylı olduğu düşünülmektedir.

Bu bölgedeki bazaltlar, faylanmadan dolayı eklemli ve düşük dayanımlı bir yapı kazanmış ve yoğun bir biçimde kloritleşmiştir. Çalışma alanı içindeki akarsu vadilerinin hem dar hem de oldukça yüksek eğimli olmasından dolayı alüvyon oluşukları iri bloklu malzemeler şeklinde kendini göstermektedir. Tünel çıkış bölümünün bulunduğu Çifteköprü yöresindeki Cihala Çayı'nın birleştiği Çoruh Nehri boyunca, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yoğun şekilde gözlenmektedir. Yamaç molozları, çalışma alanı içindeki yamaç eteklerinde yer almakta olup, bunlar yamaçların bulunduğu alandaki kayaç türlerine göre köşeli, yassı ve bazıları küt köşeli, blok, çakıl, kum, silt ve killerden oluşmuşlardır. Silt ve kil miktarı, diğer elemanlara göre daha fazladır.

Cankurtaran Tünel güzergâhındaki birimlerin birleştirilmiş jeoloji kesiti üzerindeki görünümü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Cankurtaran tünel güzergâhındaki birimlerin birleştirilmiş jeolojik kesiti üzerindeki görünümü (Kaya, 2012).

3. BAZALTLARIN FİZİKO-MEKANİK VE ELASTİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, bazaltlardan alınan bloklardan laboratuvarda silindir şeklinde örnekler hazırlanmış ve kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Deneyler, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler esas alınarak yapılmıştır.

Bazaltların tek eksenli basınç dayanımını belirlemede nokta yükleme deneyinden yararlanılmıştır. Nokta yükleme deneyleri, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemde, kaya malzemesine ait nokta yükü dayanım indeksinin 20-25 katının tek eksenli basınç dayanımı değerine eşit olduğu belirtilmiştir. Bazaltlara ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri hesaplanırken güvenli tarafta kalmak amacıyla nokta yükü dayanım indeksi değerinin 20 katı alınmıştır. Elastisite modülü ise Sönmez vd. (2006) tarafından önerilen abakta tek eksenli basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri çakıştırılarak tahmin edilmiştir. Bazaltların taze ve eklem yüzeylerinde ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre L-tipi Schmidt sertlik çekici kullanılarak geri tepme sayısı ölçümleri alınmıştır. Ölçümler düşey tutuş açısına göre yapıldığı için belirlenen değerlere herhangi bir düzeltme uygulanmamıştır.

Bazaltların; birim hacim ağırlık (γ), nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), elastisite modülü (E_i) ve Schmidt sertlik çekici geri tepme sayısı (R) değerleri Çizelge 1'de özetle verilmiştir.

Çizelge 1. Bazaltlara ait fiziko-mekanik ve elastik özellikler.

Örnek sayısı	Ortalama	En büyük	En küçük	Std. Sp.
Birim hacim ağırlık (γ, kN/m^3)				
8	24.73	26.04	23.16	1.30
Nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$, MPa)				
38	3.05	11.91	1.29	2.25
Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}, MPa)				
-	60.98	238.26	25.83	44.94
Elastisite modülü (E_i, GPa)				
-	28	46	11	-
Schmidt sertlik çekici geri tepme sayısı (R)				
Taze yüzey: 44 Eklem yüzeyi: 36				

4. SÜREKSİZLİKLERİN ÖZELLİKLERİ

Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümündeki bazaltların içerdiği süreksizliklerin özelliklerini belirlemek için, YSK-8 numaralı temel sondajından ve yol şevlerinde yapılan hat etüdü çalışmalarından yararlanılmıştır. Süreksizliklerin özellikleri, ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütlere göre tanımlanmıştır. Hat etüdü çalışmaları ile süreksizliklere ait yönelim, ara uzaklık, açıklık, devamlılık, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı, bozunma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve yüzeylerindeki su durumu gibi özellikler tespit edilmiştir. Pürüzlü özellikte olan eklem yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri ise Barton ve Bandis (1990) tarafından önerilen yenilme ölçütü kullanılarak belirlenmiştir.

ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilen süreksizliklerin özellikleri ile literatürde tanımlanan yöntemlere göre belirlenen süreksizlik sıklığı (λ), kaya kalite göstergesi (RQD), hacimsel eklem sayısı (J_v), doruk sürtünme açısı (ϕ_d) ve doruk kohezyon (c_d) değerleri Çizelge 2'de özet olarak sunulmuştur.

5. BAZALTLARIN KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

Bazalt kaya kütlesine ait dinamik Poisson oranını belirlemek için elastik ses dalgasının boyuna (V_p) ve enine (V_s) yayılma hızlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla, belirlenen en uygun yerde 12 kanallı Geometrics marka ve ES3000 model araştırma sismografi kullanılarak sismik kırılma ölçümleri alınmıştır. Bowles (1988) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak Poisson oranı değeri belirlenmiştir. Hoek vd. (2002) tarafından önerilen eşitliklerle bazaltların tek eksenli basınç dayanımı ve kaya kütle sabitleri belirlenmiş, deformasyon modülü ise Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak tespit edilmiştir. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerini saptamak için Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmış ve GSI değeri 41 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, RocLab v1.0 (Rocscience, 2002) programından yararlanılarak bazaltlar için kaya malzemesi sabiti (m_i) 25 olarak seçilmiştir. Bazaltlarda mekanik kazı uygulanacağı varsayılmış ve örselenme faktörü (D) 0.7 olarak kabul edilmiştir.

Sayısal analizlerde kullanılmak amacıyla belirlenen dinamik Poisson oranı (υ), deformasyon modülü (E_m), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), kaya kütle sabitleri (m_b, s, a) ve hesaplamalarda kullanılan eşitlikler Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Bazaltlardaki süreksizliklerin özellikleri.

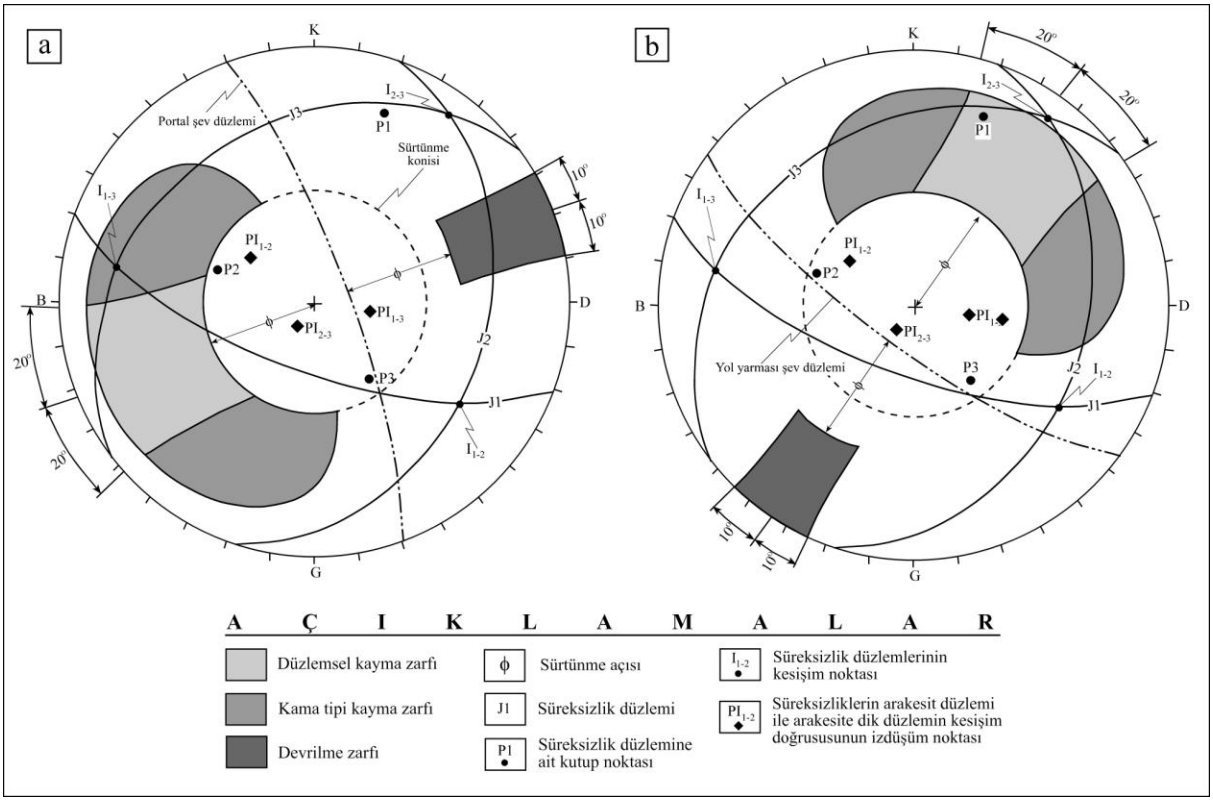
Süreksizlik türü	Eklem	Eklem	Eklem
Süreksizlik takımları	J1: 200/68	J2: 109/33	J3: 323/30
Süreksizlik ara uzaklığı (cm) Tanımlama (ISRM, 2007)	14.17 Yakın ara uzaklıklı	10.28 Yakın ara uzaklıklı	12.28 Yakın ara uzaklıklı
Süreksizlik açıklığı (mm) Tanımlama (ISRM, 2007)	2.67 Orta derecede geniş	2.67 Orta derecede geniş	2.67 Orta derecede geniş
Süreksizlik devamlılığı (m) Tanımlama (ISRM, 2007)	5.18 Orta derecede devamlı	5.18 Orta derecede devamlı	5.18 Orta derecede devamlı
Süreksizlik pürüzlülüğü (JRC) Tanımlama (ISRM, 2007)	8-10 Dalgalı pürüzlü	8-10 Dalgalı pürüzlü	8-10 Dalgalı pürüzlü
Süreksizliklerdeki dolgu malzemesinin özelliği	Silt+kil dolgu	Silt+kil dolgu	Silt+kil dolgu
Süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesi (ISRM, 2007)	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş
Süreksizlik yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 2007)	Çok az sızıntı gözleniyor	Çok az sızıntı gözleniyor	Çok az sızıntı gözleniyor
Süreksizlik sıklığı (λ, m^{-1}) Tanımlama (Franklin vd., 1971)		10 Kırıklı-çatlaklı	
Hacimsel eklem sayısı (J_v, eklem/m^3) Tanımlama (ISRM, 2007)		24.93 Küçük bloklar	
Kaya kalite göstergesi (RQD, %) Tanımlama (Deere, 1964)		73 Orta	
Doruk sürtünme açısı (ϕ_d, ^{o})		36	
Doruk kohezyon (c_d, kPa)		45	

Çizelge 3. Bazaltlara ait kaya kütle özellikleri ve bunların belirlenmesine yönelik araştırmacılar tarafından önerilen görgül eşitlikler.

Araştırmacı	Eşitlik	Not	Değerler
Bowles (1988)	$\nu = \left(Vp^2 - 2Vs^2\right) / 2\left(Vp^2 - Vs^2\right)$	V_p: 1492 m/sn V_s: 644 m/sn	0.39
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i \left(\frac{1-(D/2)}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}} \right)$	MPa	1725
Hoek vd. (2002)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$	MPa	0.77
	$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$	m_i: 25 D: 0.7	0.977
	$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$		0.0002
	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$		0.511

6. PORTAL VE YARMA ŞEVLERİNİN DURAYLILIK ANALİZLERİ

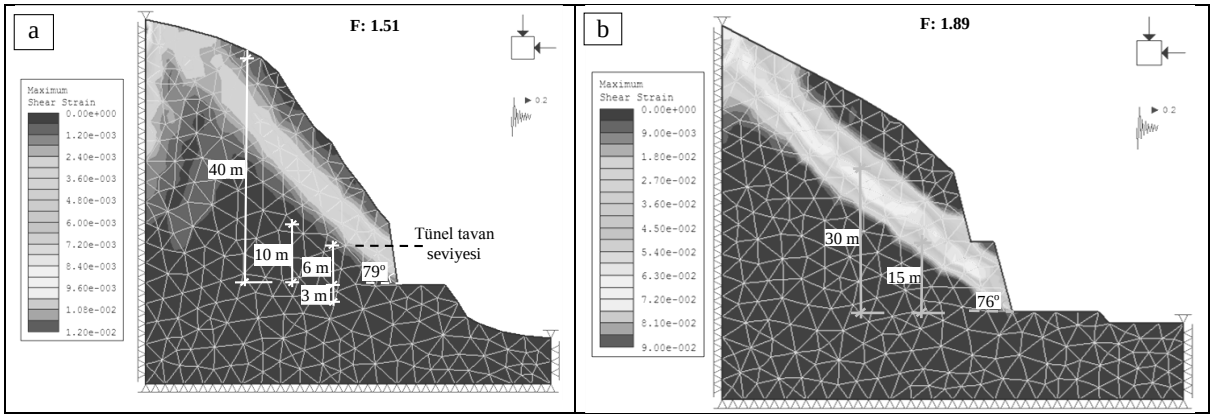
Bu çalışmada, Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümünde açılan portal ve yol yarması şevinin duraylılığı kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak incelenmiştir. Duraylılık analizleri üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk önce, kaya şevlerinin düzlemsel, kama tipi ve devrilme türü yenilmeler açısından duraylı veya duraysız olarak tanımlanması amacıyla yenilmelerin süreksizlikler tarafından kontrol edildiği varsayılarak kinematik analizler yapılmıştır. Kinematik analizlerde girdi parametresi olarak ana eklem takımlarının ve kaya şevlerinin yönelimi ve eklem yüzeylerine ait sürtünme açısı değeri (ϕ_d: 36^o) kullanılmıştır. Çalışmada Wyllie ve Mah (2004) tarafından önerilen birleşik kinematik analiz yönteminden yararlanılmıştır. 070/79 yönelimli portal şevi ve 216/76 yönelimli yarma şevi için yapılan kinematik analizler sonunda çıkış bölümündeki yarması şevinde J1: 200/68 yönelimli eklem setinin düzlemsel bir kayma oluşturma olasılığının olduğu, portal yarma şevinin ise duraylı olduğu belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümündeki (a) portal ve (b) yol yarması şevinin kinematik analizi.

Daha sonra, yarma şevinde düzlemsel kayma oluşturma olasılığı olan J1: 200/68 yönelimli eklemin makaslama dayanımı parametreleri (ϕ_d: 36^o ve c_d: 45 kPa), kayması olası bloğun ağırlığı, şev geometrisi, deprem kaynaklı sismik yükler dikkate alınarak eklemlerin suyla dolu olduğu varsayılmış ve en kötü arazi koşullarına göre limit denge analizi yapılmıştır. Limit denge analizinde duraylılık, hareket ettirici kuvvet ve momentlerin harekete karşı koyan kuvvet ve momentlerin oranına dayanan güvenlik katsayısı (F) tarafından tanımlanmaktadır. Düzlemsel kaymanın limit denge analizi yapılırken Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen yöntemi temel alan RocPlane v2.0 (Rocscience, 2004) programından yararlanılmıştır. Analiz modeli oluşturulurken depremin etkisini dikkate almak için AFAD Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'na göre bölgede beklenen en büyük yatay yer ivmesi olan 0.20 g, sismik yük olarak modele eklenmiştir. Bu çalışmada şevlerin uzun süreli duraylılık durumları için yeterli güvenlik sayısı değeri 1.5 olarak seçilmiştir (Mines Branch, Canada, 1972).

Limit denge analizinde kullanılan kazı geometrisi Şekil 4b'de verilmiştir. Yapılan limit denge analizi sonucunda, güvenlik sayısının 1.81 olduğu ve düzlemsel kaymanın oluşmayacağı belirlenmiştir.
Son aşamada ise, incelenen kaya şevlerindeki dairesel kayma riski, FEM tabanlı Phase^2 v7.0 (Rocscience, 2008) programı kullanılarak araştırılmıştır. Oluşturulan modellerde Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak gerilme-deformasyon analizleri yapılmış ve plastik yenilmeler araştırılmıştır. Sayısal analizlerde yeraltısuyu ve sismik yükler de dikkate alınmış ve üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 3'te sunulmuştur. Şevlerin geometrisi, projede uygulanacak kazı tasarımına göre oluşturulmuştur. Yapılan sayısal analizler sonucunda portal ve yol yarması şevlerine ait güvenlik sayılarının sırasıyla 1.51 ve 1.89 olduğu (Şekil 4), ve dairesel kayma riskinin olmadığı saptanmıştır. Güvenlik sayılarındaki bu farklılık, şevlerinin farklı kazı geometrilerine ve yükseklilere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Cankurtaran Tüneli'nin çıkış bölümündeki (a) portal ve
(b) yol yarması şevinin sayısal analizi.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Cankurtaran (Hopa-Artvin) Tüneli'nin çıkış bölümündeki portal ve yol yarması şevinin duraylılığı sırasıyla kinematik, limit denge ve sayısal analizler yapılarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

a) Kinematik analizler sonucunda yarma şevindeki JI: 200/68 yönelimli eklem setinin düzlemsel bir kayma oluşturma olasılığının olduğu, portal şevinde ise süreksizlik kontrollü bir yenilmeyin beklenmediği belirlenmiştir.
b) Düzlemsel kaymanın gerçekleşme olasılığı, limit denge analizi ile incelendiğinde güvenlik katsayısının 1.81 gibi yüksek bir değerde ve uzun süreli duraylılık için kabul edilen 1.5 değerinden büyük olduğu saptanmıştır. Bu sonuca göre yarma şevinde düzlemsel kayma beklenilmemektedir.
c) Portal ve yol yarması şevlerinde gelişebilecek dairesel kayma türü duraysızlıkları belirlemek için yapılan sayısal analizler sonucunda portal şevi için güvenlik sayısı 1.51, yol yarması şevi için ise 1.89 olarak hesaplanmıştır. Kaya şevlerinde dairesel kayma türü bir yenilmenin gerçekleşme olasılığı yoktur.
d) Yapılan duraylılık analizleri sonucunda portal ve yol yarması şevlerinde hem süreksizlik kontrollü, hem de dairesel bir yenilmenin gerçekleşmeyeceği tespit edilmiştir. Bu nedenle, kaya şevlerinin desteklenmesine gerek yoktur.

8. KAYNAKLAR

Barton, N., Bandis, S.C., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 603-610.
Bowles, J.E., 1988. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill Book Company, New York.

Çapkınoğlu, Ş., 1981. Borçka-Çavuşlu (Hopa) arasının jeolojisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Deere, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposed. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1, 17-22.

Franklin, J.A., Broch, E., Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 80(A), 1-9.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin jeolojisi ve 1/250000 ölçekli komplikasyonu, MTA, Ankara.

Hoek, E., Diederichs, M., S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 203-215.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference, Toronto, Canada, 267-273.

Hoek. E., Bray. J.W., 1981. Rock Slope Engineering. Institution of Mining, Metallurgy, London.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, Kozan Ofset.

Kaya, A., 2012. Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergahının ve çevresinin jeoteknik açıdan incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

Mines Branch, Canada, 1972. Tentative design guide for mine waste embankments in Canada. Department of Energy, Mines and Resources, Canada.

Rocscience, 2002. RocLab v1.0 rock mass strength analysis using the generalized Hoek-Brown failure criterion. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.

Rocscience, 2004. RocPlane v2.0 surface planar failure analysis, Toronto, Ontario, Canada.

Rocscience, 2008. Phase^2 v7.0 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around the underground excavations. Geomechanics Software and Research, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.

Sönmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 26, 77-99.

Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: for ıntact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 224-235.

Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004. Rock Slope Engineering, Spon Press, NewYork.

Gebze-İzmir Otoyol Projesi Bursa-Susurluk Kesimindeki Yumuşak Killerin Prefabrik Düşey Dren Kullanılarak İyileştirilmesi

Improvement of Soft Clays in Bursa-Susurluk Section of the Gebze-İzmir Highway Project Using Prefabricated Vertical Drains

G. Çelik[1,*], M. Köse[2], A. Akbulut[3]

[1] *Yüksel Domaniç Müh. Ltd. Şti. Binsesin Sit. 1961. Cad. 1964. Sok. No: 21 Ümitköy/Ankara*
[2] *Kamu Özel Sektör Ortaklığı Bölge Müdürlüğü Armutköy Mah. 20. Cad. No: 22 Osmangazi/Bursa*
[3] *Gebze-İzmir Otoyolu İnşaatı (NÖMAYG) A.O. Yalova-İzmit Yolu Cad. Tersaneler Bölgesi Çavuşçiftliği Mevkii Altınova/Yalova*
*(*gozdecelik@ydomanic.com)*

ÖZ: Bu çalışmanın amacı, Gebze-İzmir Otoyol Projesi Bursa-Susurluk kesiminde Km: 140+400–Km: 140+550 ve Km: 145+400–Km: 145+550 arasındaki dolgu tabanlarında rastlanan kil tabakasındaki konsolidasyon oturmasının araştırılmasıdır. Çalışma alanındaki temel zemini ortalama 33.0 m kalınlığında yumuşak-orta katı kıvamdaki kil birimini içermektedir. Konsolidasyon parametreleri, sondajlardan elde edilen örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinden ve konik penetrasyon testlerinden (CPT) ampirik olarak elde edilmiştir. Oturma hesapları, Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon oturma teorisi kullanılarak yapılmıştır. Kabul edilebilir sınırlar üzerinde olan oturmaların, hızlarının arttırılması için prefabrik düşey drenler (fitil dren) kullanılması önerilmiştir. Bu uygulama ile limitlerin üzerinde hesaplanan oturma süresi, işveren tarafından 2.0 yıl olarak izin verilen oturma süresine düşürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bursa-Susurluk, Geoteknik, Konsolidasyon, Prefabrike Düşey Dren

ABSTRACT: *The aim of this study is to investigate the consolidation settlement ofthe clay deposits under embankments encountered in Bursa-Susurluk Section of the Gebze-İzmir Highway Project between the intervals of Km: 140+400–Km: 140+550 and Km: 145+400–Km: 145+550. The foundation soil of the studied area includes average 33.0 m thick deposit of soft to medium stiff clay. The consolidation parameters are obtained from laboratory experiments conducted on undisturbed samples and from cone penetration tests (CPT) empirically. The settlement calculations are conducted by Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. According to the geological section of the area, consolidation settlement problem is expected. In order to increase the rate of settlements, which are over the acceptable limits, the use of prefabricated vertical drains (wick drains) are proposed. The time of consolidation calculated over acceptable limit which is allowed as 2.0 years by the employer is decreased with this application.*

Keywords: *Bursa-Susurluk, Geotechnics, Consolidation, Prefabricated Vertical Drain*

1. GİRİŞ

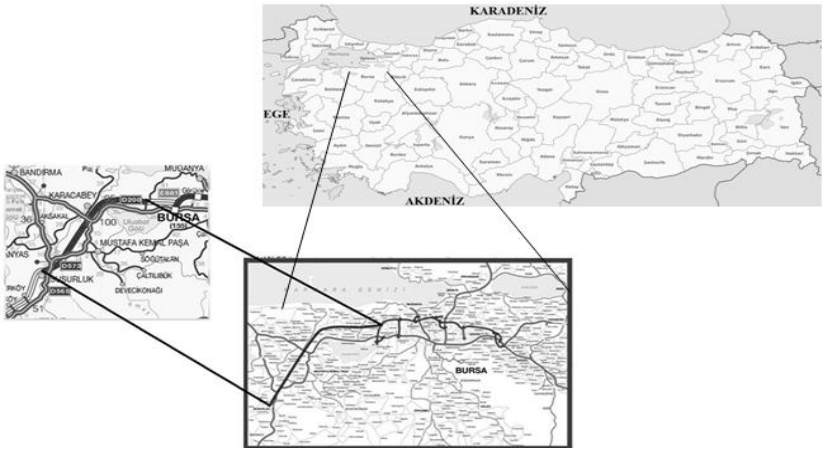
1.1 Amaç ve Kapsam

Gebze-İzmir Otoyolu Projesi, Otoyol Yatırım ve İşletme A.Ş. tarafından yürütülmekte olup, bu proje ile İstanbul-İzmir arası ulaşım süresinin 8-10 saatten 4-5 saate indirilmesi amaçlanmaktadır. Gebze-İzmir Otoyolu Bursa-Susurluk Kesimi,güzergahın Km: 104+535 ile Km: 178+927 arasında yer almakta olup, yaklaşık 78 kilometre uzunluğundadır.Bu kesimin Km: 137+800 ile Km: 176+060 arası Karacabey Ovası olarak tanımlanmıştır. Bu kesimde tasarlanan dolguların ortalama yüksekliği 11.0 m'dir ve dolgu taban zemini ortalama 33.0 m kalınlığındaki kil biriminden oluşmaktadır. Karayolları Araştırma Teknik Şartnamesi'ne(KGM, 2006) göre, uzun mesafede homojen devam eden dolgu tabanlarında kabul edilen oturma limiti 10.0 cm, köprü yaklaşım dolgularında ise 5.0 cm olarak önerilmiştir (KGM, 2006).

Ayrıca, iş veren tarafından dolgular tamamlandıktan sonra bekleme süresi maksimum 2.0 yıl olarak verilmiştir. Bu limitler göz önünde bulundurularak konsolidasyon oturma hesapları gerçekleştirilmiş ve bu hesaplamalarda konsolidasyon oturma problemi ile karşılaşılacağı belirlenmiştir. Söz konusu problemin çözümü için dolgu tabanlarında fitil dren uygulaması önerilmiştir.

1.2 Çalışma Alanın Konumu

Bursa-Susurluk kesimi Bursa ilinin kuzey batısından ve Uluabat Gölü'nün kuzeyinden başlayarak, Karacabey Ovası'ndan geçmekte ve Susurluk'ta sonlanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Bursa-Susurluk Otoyolu kesiminin konumu (KGM, 2007)

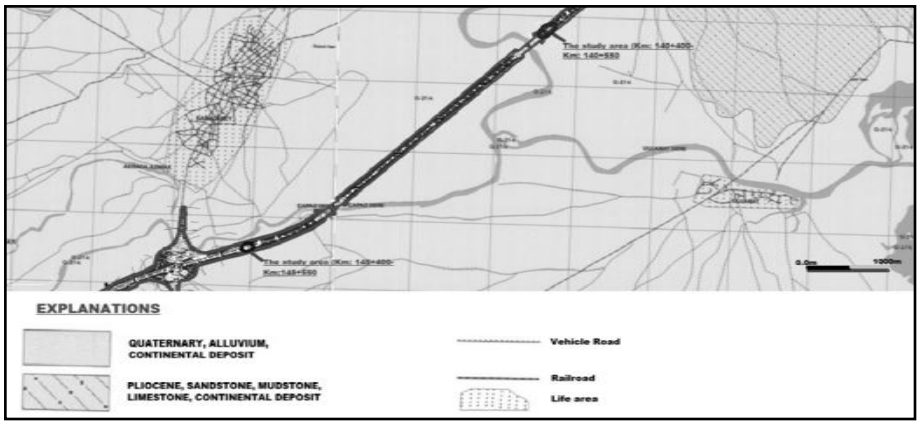
1.3 Metodoloji

Bu çalışmanın tamamlanmasında ilk olarak, Bursa-Susurluk kesiminin jeolojik yapısı, saha araştırma yöntemleri, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, konsolidasyon teorisi ve konsolidasyon oturmasının hesaplanma yöntemleri, zeminlerin iyileştirme yöntemleri ile ilgili araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra, çalışma alanının jeolojik-jeoteknik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla sondaj kuyuları açılmış ve konik penetrasyon testleri (CPT) gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları; birim hacim ağırlığının belirlenmesi, Atterberg limit testleri, tane boyu dağılımı ve konsolidasyon deneylerini kapsamaktadır. Üçüncü aşamayı takiben,analitik yöntemler kullanılarak konsolidasyon oturma hesapları yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise gerekli görülen yerlerde oturma süresinin kısaltılması için düşey dren (fitil dren) uygulaması önerilmiştir.

2.ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ

2.1 Genel Jeoloji

Güzergah boyunca, temeli Paleozoyik yaşlı Serkedere Metamorfitleri olarak isimlendirilen kayaçlar yer almaktadır. Bu temel üzerinde Kretase yaşlı İnatlar kireçtaşı olarak isimlendirilen kristalize kireçtaşları/mermerler bulunmaktadır. Mermerler yer yer mercek, bant ve örtü şeklindedir. Bölgede Miyosen-Pliyosen yaşlı Değirmendere Formasyonu ve Mudanköy Volkanitleri olarak adlandırılan çökel kayalarla volkanik kayalar bulunmaktadır. En üst seviyelerde ise güncel çökeller ve alüvyonlar bulunmaktadır(MTA, 2008) (Şekil 2).



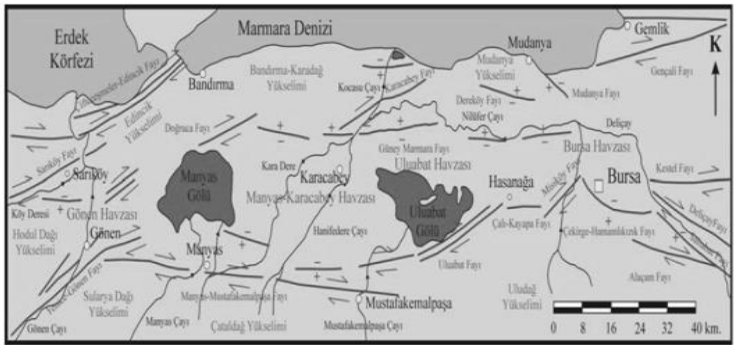
Şekil 2. Güzergahın jeolojik haritası (Bandırma H20-C1, Bandırma H20-C2 1/25 000) (MTA, 2008)

2.2Yapısal Jeoloji

Bursa bölgesi, Paleo-Tetis ve Neo-Tetis okyanuslarının kapanması sırasında gelişmiş olan tektonik olaylardan yoğun bir şekilde etkilenmiş, kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Bölge genel olarak Kuzey Anadolu Transform fayının etkisinde kalmış olup, batıya doğru bir sıkışma sonucu K-G doğrultulu bindirmeler ile D-B doğrultulu normal faylarla K-G yönünde açılmaya başlamıştır. Bölgedeki normal faylar genel olarak D-B veya KD-GB ile KB-GD olmak üzere iki sistemde gelişmiştir. Bölgedeki kıvrımlanma gösteren litolojiler D-B veya DKD-BGB yönlü antiklinal ve senklinal eksenlere sahiptir. Neojen yaşlı birimler, çoğunlukla yataydır. Mesozoyik ve Paleojen yaşlı birimler D-B yönlü kıvrım eksenlerine sahiptir (ÇŞB, 2010).

2.3 Depremsellik

Sismotektonik açıdan bakıldığında, Bursa şehrinin kurulu olduğu bölge Anadolu Plakası'nın en aktif fay sistemlerinden biri olan Kuzey Anadolu Fay Sistemi'nin Güney Marmara kolu ve Batı Anadolu Genişleme Tektonik Rejimi'nin kuzey sınırını teşkil eden alanda yer almaktadır (Selim vd., 2005). Kuzey Anadolu Fayı'nın güney koluna ait faylar Şekil 3'de sunulmuştur.



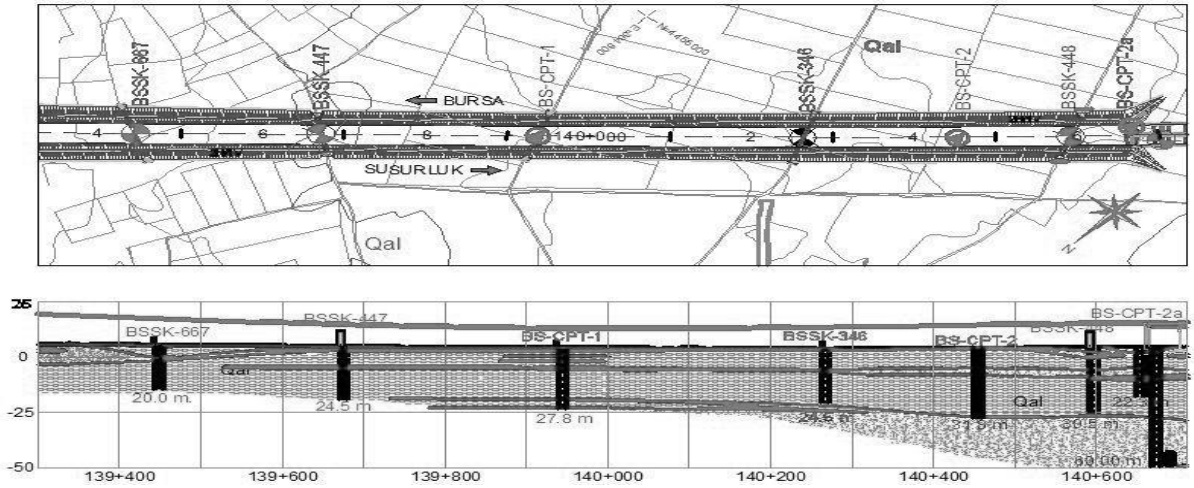
Şekil 3. Kuzey Anadolu Fayı'nın güney koluna ait faylar ve bölgede gelişen havzalar (Selim vd., 2005)

Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre çalışma güzergahı I. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. I. derecede deprem bölgeleri için etkin yer ivmesi 0.40g olarak alınmıştır. Güzergahın geçtiği bölgenin tamamı için Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından verilen danışmanlık hizmetlerine ait Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi (KGM, 2006)'de verilen "Şev Stabilite Analizlerine Esas Yatay Deprem Katsayıları Haritası"nda da öngörüldüğü üzere 0.20 katsayısının alınması önerilmiştir.

Km: 140+400-Km: 140+550 arası için temsili jeoteknik özellikler aşağıda sunulmuştur:
SPT N değeri: N: 5 – 35 darbe
CPT uç drenci: qc: 0.55-6.55 MPa
Zemin sınıfı: CH-CL-ML-SC-SM
LL: 28 – 93 (%)
PI: 16 – 66 (%)

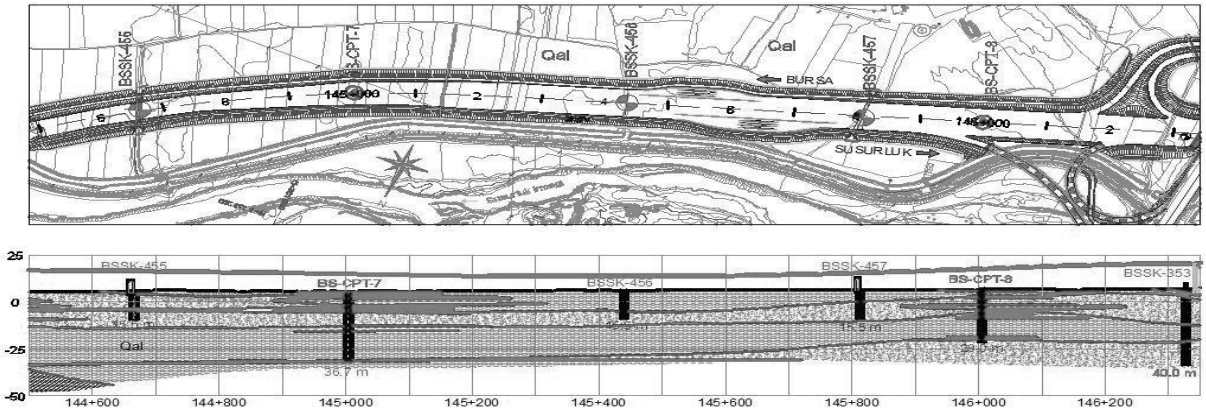
Km: 145+400-Km: 145+550 arası için temsili jeoteknik özellikler aşağıda sunulmuştur:
SPT N değeri: N: 9 – 46 darbe
CPT uç drenci: qc: 0.7-10.0 MPa
Zemin sınıfı: CH-CL-ML-SC-SM
LL: 18 – 86 (%)
PI: 5 – 68 (%)

Km:140+400-Km:140+550 arası mühendislik jeoloji haritası ve boy kesiti Şekil 4'te sunulmuştur:



Şekil 4. Bursa-Susurluk kesimi Km: 140+400 – Km: 140+550 arasının jeolojik plan-profili

Km:145+400-Km:145+550 arası mühendislik jeoloji haritası ve boy kesiti Şekil 5'de sunulmuştur:



Şekil 5. Bursa-Susurluk kesimi Km: 145+400 – Km: 145+550 arasının jeolojik plan-profili

Km: 140+400 – Km: 140+550 arasının değerlendirilmesi için BSSK 667, BSSK 447 ve BSSK 448 sondajlarının verilerinden, Km: 145+500 – Km: 145+550 arası için BSSK 346, BSSK 456 ve BSSK 457 sondajı verileri kullanılarak Km: sondajlarının verilerinden faydalanılmıştır. Konsolidasyon deney sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Konsolidasyon (ödometre) deney sonuçları özet tablosu

Sondaj/ Numune No	Hacimsel sıkışma (m_v) ve konsolidasyon katsayısı (c_v)	Basınç Aralığı (kN/m^2) 0-50	50-100	100-200	200-400
BSSK 667/UD1	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$3.0x10^{-4}$	$2.1x10^{-4}$	$1.6x10^{-4}$	$1.4x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0,37	0,06	0,02	0,02
BSSK 447/UD1	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$2.5x10^{-4}$	$3.1x10^{-4}$	$3.2x10^{-4}$	$1.6x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0,35	0,01	0,01	0,01
BSSK 447/UD3	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$5.2x10^{-4}$	$1.4x10^{-4}$	$0.9x10^{-4}$	$1.1x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0,04	0,33	0,15	0,01
BSSK 448/UD2	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$2.9x10^{-4}$	$3.1x10^{-4}$	$2.7x10^{-4}$	$2.1x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0.02	0.02	0.01	0.01
BSSK 448/UD3	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$3.7x10^{-4}$	$5.1x10^{-4}$	$3.9x10^{-4}$	$2.8x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0.04	0.07	0.03	0.02
BSSK 346/UD1	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$3.6x10^{-4}$	$2.0x10^{-4}$	$1.7x10^{-4}$	$1.1x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0,12	0,05	0,05	0,019
BSSK 456/UD1	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$3.5x10^{-4}$	$2.1x10^{-4}$	$1.6x10^{-4}$	$1.0x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0.15	0.05	0.05	0.04
BSSK 456/UD2	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$3.5x10^{-4}$	$2.1x10^{-4}$	$1.6x10^{-4}$	$1.0x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0.06	0.01	0.01	0.01
BSSK 457/UD1	Hacimsel sıkışma katsayısı, mv (m^2/kN)	$1.7x10^{-4}$	$2.1x10^{-4}$	$0.8x10^{-4}$	$0.4x10^{-4}$
	Konsolidasyon katsayısı, cv (mm^2/s)	0,35	0,04	0,03	0,02

3. KONSOLİDASYON OTURMA HESAPLARI

Oturma, uygulanan yüke bağlı olarak zemindeki sıkışma olarak tanımlanabilir. Oturma; ani oturma, ilksel oturma ve ikincil oturma bileşenlerinden oluşmaktadır. Zeminin deformasyon parametreleri ve dolgu yükü farklılık gösterdiğinden, oturmalar da farklılık gösterir ve bu farklı oturmalar yolda dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmalar yolda trafik güvenliğini ve sürüş kalitesini düşürür.

Bu nedenle Gebze-İzmir Otoyolu Bursa-Susurluk kesimi için oluşturulan idealize jeolojik profile göre, söz konusu kesimde dolgu imalatından sonra konsolidasyon oturma problemi ile karşılaşılması

kaçınılmazdır. Sıkışabilir olarak öngörülen kesimlerde konsolidasyon oturma hesapları yapılmıştır(Eş.1). Konsolidasyon parametreleri (m_v, C_c, C_s, c_v) sondajlardan alınan örselenmemiş numunelerde gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinden elde edilmiştir.

$$S_c = m_v * H * \Delta\sigma \qquad \text{(Craig,2004)} \tag{1}$$

Ayrıca,Das yaklaşımı (Eş. 2, Eş. 3 ve Eş. 4) da kullanılarak konsolidasyon oturma hesapları da gerçekleştirilmiştir.

Normal konsolide killerde oturma miktarının hesaplanması (Das, 2008):

$$Sp = \frac{CcH}{1+e_0}\log\left(\frac{\sigma'_0+\Delta p}{\sigma'_0}\right) \qquad \text{OCR} = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{vo}} \leq 1.0 \tag{2}$$

Aşırı konsolide killerde oturma miktarının hesaplanması (Eş. 4, 5) (Das, 2008):

$$Sp = \frac{CsH}{1+e_0}\log(\frac{\sigma'_0+\Delta p}{\sigma'_0}) \qquad (\sigma'_0 + \Delta p)<\sigma'_c \tag{3}$$

$$Sp = \frac{CsH}{1+e_0}\log(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}) + \frac{CcH}{1+e_0}\log(\frac{\sigma'_0+\Delta p}{\sigma'_c}) \qquad (\sigma'_0 + \Delta p)>\sigma'_c \tag{4}$$

Yukarıda sunulan yaklaşımlar kullanılarak 11.0 m dolgu yükü için konsolidasyon oturma hesaplamaları yapılmıştır. Oturma hesaplarında,kabul edilen limitler dışındaki oturma miktarları ve tamamlanma süreleri sırasıyla; Km: 140+400 ile Km: 140+550 arasında 67 cm/74 yıl ve Km: 145+400 ile Km: 145+550 arasında 110 cm/33 yıl olarak hesaplanmıştır. Oturma miktarları ve süreleri kabul edilebilir limitlerin üzerinde olduğundan, dolgu tabanlarında fitil dren uygulaması önerilmiştir. Farklı fitil dren karelajları (3.0mx3.0m, 2.0mx2.0m, 1.5mx1.5m) için oturma süreleri hesaplanmıştır.

4. PREFABRİKE DÜŞEY DREN

Düşey drenler konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak için birkaç yüzyıldan beri kullanılmaktadır (Sathananthan, 2005). Prefabrik düşey dren ilk kez 1920'lerde geliştirilmiş ve 1926'da Amerikalı mühendis Daniel J. Moran tarafından patenti alınmıştır (Johnson, 1970). Fitil drenler esnek, boyuna kanallar içeren, yüksek su akışı sağlayabilen, etrafı geotekstil ile sarılı polipropilen yapı elemanlarıdır.

Prefabrik düşen dren uygulamasından sonra, konsolidasyon oturma yüzdesi radyal konsolidasyon yüzdesi kullanılarak hesaplanır (Eş. 5) (Carillo, 1942).

(1-U)= (1-Uv)(1-Ur) (5)

$$U_h = 1 - \exp(\frac{-8T_h}{\mu}), \quad \mu = ln\frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s}lns - 0.75, n = \frac{d_e}{d_w}, \tag{6}$$

$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$, De= 1.13S (kare düzen için), De= 1.05S (üçgen düzen için) (7)

Aşağıda sunulan Çizelge 2'de Km: 140+400-Km: 140+550 ve Km: 145+400-Km: 145+550'de 2.0mx2.0m karelaj aralıklı, 26.0 m ve 36.0 m uzunluklarındaki fitil dren uygulaması için elde edilen konsolidasyon oturma süreleri ve yüzdeleri sunulmuştur.

3.0mx3.0m, 2.0mx2.0m ve 1.5mx1.5m karelaj aralıkları için tamamlanan konsolidasyon miktarları ve süreleri Çizelge 3 ve 4'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Km: 140+400-Km: 140+550 ve Km: 145+400-Km:145+550 aralıkları fitil dren uygulaması için oturma zamanın hesaplanması

Km: 140+400 – Km: 140+550	
Bekleme süresi (gün)	700.8
cv (m^2/gün)	0.0028
ch (m^2/gün)	0.0084
Düşey dren boyu (d) (m)	9.4
Bant dren genişliği (bd)(mm)	100
Bant dren kalınlığı (t)(mm)	4
Bant dren aralığı (s) (m)	2
Efektif dren çapı (de) (m)	0.07
N	34.07
F(n)	2.78
Tv	0.02
Uv	0.17
Tr	1.16
Ur	0.96
U	0.97

Km: 145+400 – Km: 145+550	
Bekleme süresi (gün)	335.8
cv (m^2/gün)	0.0041
ch (m^2/gün)	0.0123
Düşey dren boyu (d) (m)	7.6
Bant dren genişliği (bd)(mm)	100
Bant dren kalınlığı (t)(mm)	4
Bant dren aralığı (s) (m)	2
Efektif dren çapı (de) (m)	0.07
N	34.07
F(n)	2.78
Tv	0.02
Uv	0.17
Tr	0.81
Ur	0.90
U	0.92

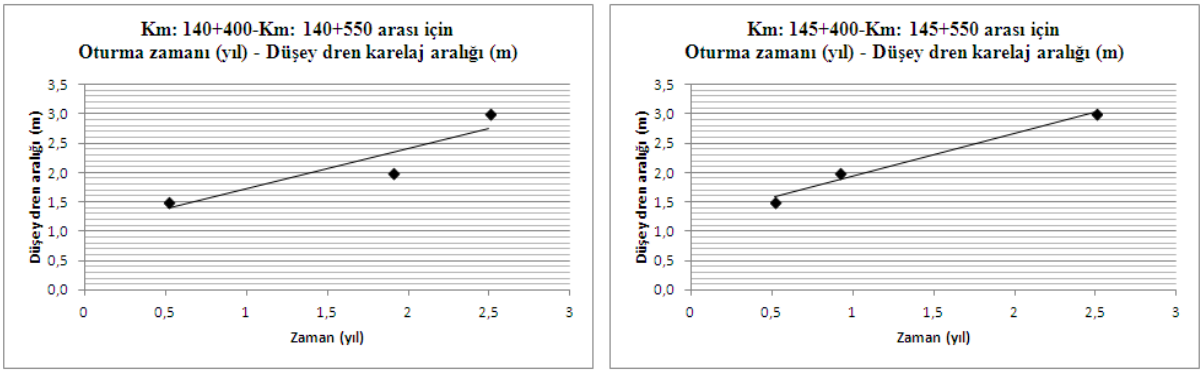
Çizelge3. Km: 140+400-140+550 arasında farklı karelaj aralıkları için oturma miktarı-zamanlarının hesaplanması

Fitil dren aralığı(m)	Konsolidasyon oranı (%)	Konsolidasyon miktarı (cm)	Zaman (yıl)
3.0	85	57	2.5
2.0	97	65	1.0
1.5	96	65	0.5

Çizelge4. Km: 145+400-145+550 arasında farklı karelaj aralıkları için oturma miktarı-zamanlarının hesaplanması

Fitil dren aralığı(m)	Konsolidasyon oranı (%)	Konsolidasyon miktarı (cm)	Zaman (yıl)
3.0	94	103	2.5
2.0	94	103	1.0
1.5	94	103	0.5

Km: 140+400-Km: 140+550 ve Km: 145+400-Km: 145+550 aralıklarında oturma zamanın, düşey dren (fitil dren) karelaj aralığı ile değişimi Şekil 6'da sunulan grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 6. Km: 140+400-Km: 140+550 ve Km: 145+400-Km: 145+550 aralıklarında oturma zamanına karşın fitil dren karelaj aralığındaki değişim

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında sondaj, konik penetrasyon testi (CPT) ve laboratuar verileri ile jeolojik model oluşturulmuş ve bu modele göre iki farklı oturma yöntemi kullanılarak konsolidasyon oturma hesapları yapılmıştır. Hesaplamalarda elde edilen konsolidasyon miktarları aşırı konsolidasyon oranı (OCR) göz önünde bulundurularak, Skempton-Bjerrum(1957) düzeltme katsayısı ile düzeltilmiştir. Konsolidasyon oturma probleminin tespitinde izin verilebilir oturma limiti 10.0 cm, oturma süresi ise 2.0 yıl olarak değerlendirilmiştir. Km: 140+400-Km: 140+550 ve Km: 145+400-Km: 145+550 aralıkları için yapılan konsolidasyon oturma hesabında ortalama oturma miktarları ve süreleri sırası ile 67 cm/74 yıl ve 110 cm/33 yıl olarak elde edilmiştir.Bu oturma miktarları ve süreleri kabul edilebilir limitlerin çok üzerindedir. Oturma süresinin kısaltılması için 100 m genişliğinde, 4 mm kalınlığında, 26.0 m ve 36.0 m uzunluklarında fitil dren uygulanması önerilmiştir. Radyal konsolidasyon teorisine göre 1.5mx1.5m, 2.0mx2.0m ve 3.0mx3.0m karelaj aralıklarında hesaplamalar yapılmış ve yapılan hesaplamalarda en uygun karelaj aralığı olan 2.0mx2.0m aralıklı fitil dren uygulamasının söz konusu problemi çözeceği öngörülmüştür.

6. KAYNAKLAR

Bergado, D.T., 2000. Recent developments of ground improvement with PVD on soft Bankokclay.Seminar on Geotechnics in Kochi, Japan.

Bowles, E.B., 1997. Foundation analysis and design, McGraw-Hill.

Carillo, N., 1942. Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils.Journal of Mathematics and Physics. 21(1), 1-5.

Craig, R.F., 2004. Soil Mechanics. New York, USA.

ÇŞB, 2010.Bursa ilçevre durum raporu,Çevreve Şehircilik Bakanlığı,Ankara.

Das, B.M., 2008. Fundementals of Geotechnical Engineering. 3rd Edition, Spain.

Genç, S.C., 1992.İznik-İnegöl (Bursa) arasındaki tektonik birimlerin jeolojik ve tektonik incelenmesi. DoktoraTezi, İTÜ, MadenFakültesi. İstanbul.

Hansbo, S.,1981. Consolidation of finegrained soils by prefabricated vertical drains. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, StocholmV. 3, 677-682.

Indraratna, B., Sathananthan, I., 2003. Comparison of field measurements and predicted performance beneath full scale embankments. Field Measurements in Geotechnics-Myrvoll, 117-127.

Johnson, S.C., 1970. Precompression for improving foundation soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 96(1), 111-114.

KGM, 2007.KarayollarıGenelMüdürlüğüTürkiyedetaylıyolharitası, Ankara.

KGM, 2006.KarayollarıAraştırmaTeknikŞartnamesi, Ankara.

MTA, 2008.1/25000 ölçekli Bandırma H20-c1 veBandırma H20-c2 paftalarının jeolojik haritaları, Ankara.

Sathananthan, I., 2005. Modelling of vertical drains withs mearin stalled in softclay.University of Wollongong Thesis Collection, Australia.

Selim, H.H.,Eyidoğan, H., Tüysüz, O.,2005. Güney Marmara Bölgesi'nde tarihsel ve aletsel dönemlerde oluşan depremlerin sismolojik ve jeolojik incelenmesi.Ulusal Deprem Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli,112-118.

Skempton, A.W.,Bjerrum, L., 1957. A contribution to the settlement analysis of foundations on clay.Geotechnique, 7(168).

Stroud, M.A., 1974. The Standard Penetration Test in insensitive clays and soft rock. Proceedings of European Symposium on Penetration Resistance, National Swedish Institute for Building Research, Stockholm, Sweden, 367-375.

Terzaghi, K., Peck, R.B., 1948. Soil mechanics in engineering practice.John Wiley and Sons, New York.

Eğirdir İlçesi(Isparta) Kaya Hareketleri ve Koruma Önlemleri

Rock Movementsin Eğirdir (Isparta) Town and Protection Measures

M. Mutlutürk[1,*], A. Yalçın[1]

[1] *SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta*
*(*mahmutmutluturk@sdu.edu.tr)*

ÖZ: Eğirdir yerleşim alanı, Eğirdir Gölü ile bir fay zonu arasındaki Kuvaterner yaşlı kolüvyal birimlerin üzerinde yer almaktadır. Bu birimler üzerinde sekiz katlı 18 adet bina ve 1 sağlık merkezinin de bulunduğu ilçenin İmaret Mahallesi kaya düşmelerinin tehdidi altınadır. Bu bildiride, söz konusu mahalleyi tehdit eden kütle hareketleri üzerinde durulmuş ve bunların binalarda neden olduğu hasar etkilerinin azaltılması için bazı önlem ve öneriler iler tartışılmıştır. Bu amaçla çalışma alanı üç farklı bölgeye ayrılmış ve her bir bölge için ayrı çözüm önerileri yapılmıştır. Mevcut yapıların hasardan korunabilmesi amacıyla; yamaç üzerinde hareket edebilecek bazı blokları durdurmak için çelik bariyerler, çeşitli ağ ve ağ sistemleri, taş kafesler ve bazı durdurucu sistemler önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eğirdir, Kolüvyon, Kaya Düşmesi, Şev Koruması

ABSTRACT: *Eğirdir residential area is located on the Quaternary colluvial materials between Lake Eğirdir and a fault zone. The Imaret Residental District which has 18-storey buildings and one communuty health center is on these units as well, and is under threat of rock falls. This presentation a study of rock movements on colluvial materials and some protection system recommendations for its damage effects on buildings. The study areais divided into three different regions and different solution was applied to each region. To protect the buildings from damage, make steel barriers for some moving blocks on the slope, various mesh and netting products, gabions and some stopper systems have been proposed.*

Keywords: *Eğirdir, Colluvium, Rock Fall, Slope Protection*

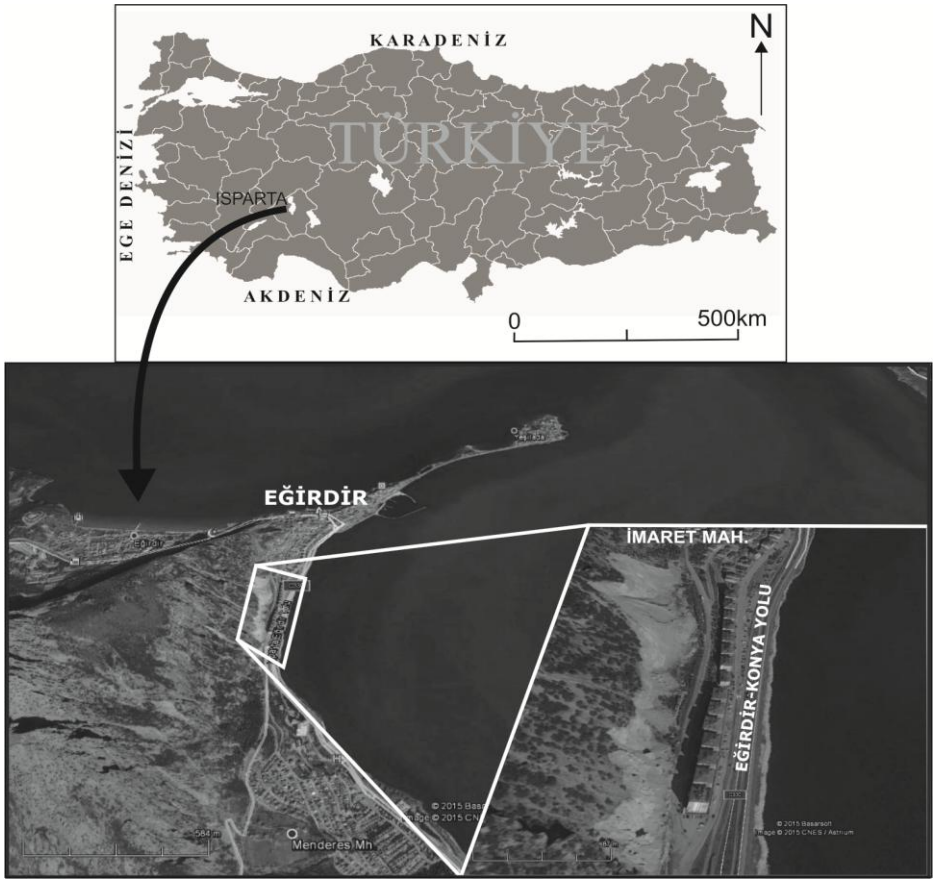
1. GİRİŞ

Kent planlama çalışmaları; çevreyle uyumlu, eğitim, sağlık, enerji, ulaşım gibi temel ihtiyaçların yanı sıra, deprem, su baskını, heyelan, çığ gibi doğa olaylarını afete dönüştürmeyecek özelliklerde olmalıdır (Karakuş, 2009). Ancak, günümüzde plansız çalışmaların giderek arttığını, basit doğa olaylarının bile büyük afetlere dönüştüğünü görmekteyiz. Ülkemizde, deprem bölgelerinde zemin özelliklerini önemsemeden inşaatların yapıldığı, su baskını olasılığını dikkate almadan dere yataklarında yapılaşmalara izin verildiği ve heyelan riski olan alanların imara açıldığı pek çok örnek bulunmaktadır. Isparta'ya bağlı Eğirdir ilçesi, İmaret Mahallesi'nin bir bölümü de kaya düşmesi şeklindeki bir doğa olayının afete dönüşmesine davet edilmiş örnek alanlardan birisini oluşturmaktadır.

İmaret Mahallesi,Eğirdir ilçe merkezinin hemen güneyinde olup, doğusundan Isparta–Konya karayolu geçmektedir (Şekil 1). İnceleme alanında, İmaret Mahallesi Sağlık Ocağı kuzey ve güneyinde 8 katlı 14 adet bloktan oluşan kooperatif binaları bulunmaktadır.Bu alan 10.02.1976 tarihli Jeolojik Etüt Raporunda yapı yasaklı alan olarak tanımlanmıştır. Ancak değişik tarihli belediye encümen kararlarıyla bölgede imar planı değişiklikleri yapılarak toplu konut alanı ilan edilmiş ve 1995 yılında vatandaşa sunulmuştur. Aynı zamanda Eğirdir Belediyesi'nin 2008 yılında İller Bankası'na hazırlattığı İmar Planına Esas Jeolojik Jeoteknik Etüt Raporu'nda mevcut binaların bulunduğu bölge "Afete Maruz ve Kaya Düşme Riskli Alan" olarak gösterilmiştir.Mevcut binaların bulunduğu inceleme alanı bir fay zonu üzerinde olup, bu zon yamaç molozları ile doludur.

Yamaç molozlarının bir bölümü inşaatların yapılması sırasında kaldırılmıştır ve yamaçtan sürekli irili ufaklı kaya parçaları düşmektedir. Ayrıca yamaçta hareket etme riski olan büyük kaya blokları da bulunmaktadır ve bu durumun can ve mal kaybına neden olabileceği kaçınılmazdır.

Bu bildiride,günümüzde halen ikamet edilen ve kaya hareketlerinden etkilenme tehdidi altında bulunan bir yerleşim alanının bu tür tehlikelerden korunması amacıyla alınması gereken önlemler sunularak, mevcut bir yerleşim alanını aktif bir şekilde tehdit eden kaya hareketlerinin etkilerini en aza indirmenin yöntemleri tartışılmıştır. İnceleme alanında kayaların sürekli hareket etme eğiliminde olduğu bir durum söz konusu ve çalışmanın başlıca amacının bu durum sonucu oluşan etkileri azaltmak ve/veya önlemeye çalışmak olduğundan, bu çalışmada kaya düşmesi analizi yapılmasının problemin çözümüne sınırlı katkı sağlayacağı düşünülmüş ve kaya düşmesi analizlerine yer verilmemiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının konumunu gösterir yer bulduru haritası ve Google Earth görüntüsü.

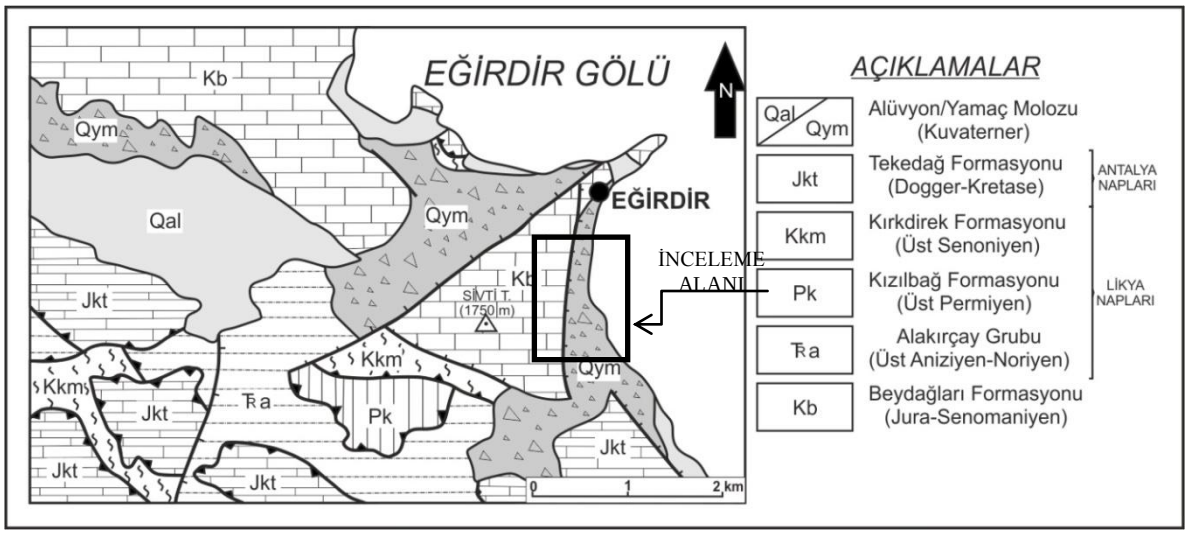
2. İNCELEME ALANININ ÖZELLLİKLERİ

2.1. Morfoloji

İnceleme alanında morfoloji tamamen jeolojik yapının denetiminde gelişmiştir. Özellikle Eğirdir Gölü çevresindeki faylarla sınırlı alanlar aniden dikleşen eğimli yüzeyler oluştururlar. Çalışma alanı da benzer özellikteki iki fay arasında kalmış bir yükselimin doğu yamacında ve Eğirdir Gölü'nün sınırındadır. Yükselim, biri Eğirdir Gölü ile Eğirdir yerleşimi arasından geçen kuzey-güney gidişli ve diğeri daha batıda Eğirdir Gölü'ne dik yönde kuzeydoğu-güneybatı gidişli iki fay arasındadır. Yükselen alan 1750 m yüksekliğindeki Sivri Tepe'dir ve Eğirdir Gölü'nden ortalama 850 m daha yüksektedir (Şekil 2). Yer yer 70^{o}'nin üzerinde eğimli olan bu yükseltinin inceleme alanının da içinde kaldığı doğu yamacı ortalama 30^{o} eğime sahiptir.

2.2. Jeoloji

Eğirdir Gölü çevresinde Beydağları otoktonu ile allokton konumlu Antalya ve Likya naplarına ait birimler yer almaktadır. Temelde Jura-Kretase yaşlı Beydağları formasyonu yer alır. Bu formasyon allokton konumlu Likya napları içindeki Alakırçay grubuna ait Triyas yaşlı birimler tarafından örtülür. Ayrıca Antalya naplarına ait Kızılbağ formasyonu, Tekedağı formasyonu veKırkdirek formasyonu diğer allokton konumlu birimlerdir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar akarsu ve göl kenarlarında, yamaç molozları ise dağ yamaçlarının eteklerinde yer alırlar (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Şenel, 1997)

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

3.1. Haritalama Çalışmaları ve Kaya Hareketlerinin Tanımlanması

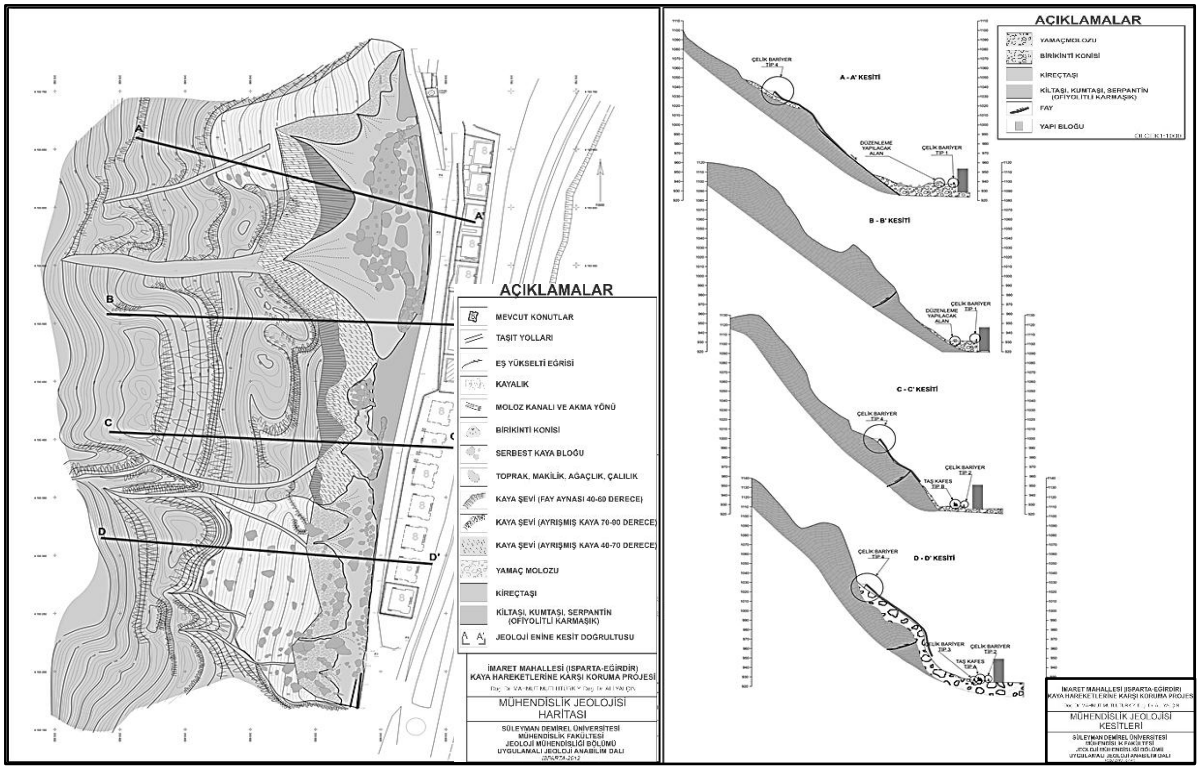
İmaret Mahallesi'nin güneyinde kaya hareketlerinin geliştiği alanda kireçtaşları ile bunların altında ofiyolitli karmaşık olarak tanımlanan kaya birimleri bulunmaktadır. Bu kaya birimleri,yaklaşık kuzey-güney uzanımlı olan bir fay ile kesilmiş ve batı alanda fayın yükselen bloğunda kireçtaşları, doğu kesimde düşen bloğunda ise Eğirdir Gölü kalmıştır (Şekil 2). Faylanmaya bağlı olarak yükselen batı bloğundaki kireçtaşları aşınıp ayrışarak doğu taraftaki doğal yamaç üzerinde, içinde 1-2 m büyüklüğünde kaya bloklarının da yer aldığı yamaç molozlarını oluşturmuşlardır. Kaya hareketlerine neden olan malzemenin bir bölümü bu yamaç molozlarıdır. Diğer bir hareket nedeni ise,faylanma nedeniyle ayrışmış kayalardır. Yapılaşma çalışmaları sırasında gerçekleştirilen denetimsiz ve projesiz kazılar da kaya hareketlerini önemli ölçüde ve olumsuz yönde etkilemiştir.

Çalışma alanında kaya hareketlerini tanımlayabilmek, sınıflandırabilmek ve alınması gereken önlemleri belirleyebilmek amacıyla öncelikle mühendislik jeolojisi haritası ve kesitleri hazırlanmıştır (Şekil 3). Daha sonra, hazırlanan harita ve kesitlerden de yararlanarak yamaç üzerindeki kaya hareketleri tanımlanmaya çalışılmıştır. Kaya hareketlerinin sınıflandırılmasında Varnes (1978) ve Köseoğlu (1978) tarafından önerilen sınıflamalar ile yamaç molozlarından ayrılan çakıl ve blokların hareket tiplerinin tanımında ise Ritchie (1963)tarafından önerilen tanımlama kullanılmıştır.

Moloz Dökülmesi:İnceleme alanı ve yakın çevresinde yaygın bir şekilde kireçtaşları bulunmaktadır. Bölgedeki kireçtaşları faylanma etkisiyle oldukça kırıklı bir yapı kazanmış ve aynı zamanda faylanma ayrışmanın, parçalanmanın hızlanmasına neden olmuştur. Bu şekilde parçalanan kireçtaşlarından kopan parçaların büyüklükleri milimetre boyutundan başlayıp 10 cm büyüklüğe kadar ulaşmaktadır. Bu şekilde sürekli yamaç aşağı hareket eden parçalar kendilerine vadi benzeri akma kanalları

oluşturmuş ve bu kanallardan giderek yamaç önünde her geçen gün büyüyen moloz birikinti konileri oluşturmuşlardır. Birikim arttıkça ince taneler üstte ve iri olanlar şev eteklerinde toplanmaktadır.

Kaya Düşmesi:Kaya düşmesi, kaya bloğunun altının boşalması ve bloğun yerçekimi etkisiyle serbest düşmesi hareketidir. İnceleme alanında bu şekildeki düşme hareketi, küçük bir alanda yamaç önünde oluşmuş olan şevde altı boşalan bir alanda gözlenmektedir. Hareket, ayrışmış kayaların bulunduğu alanda, alttaki ofiyolitik kayaların dayanımlarının oldukça azalması ve dağılmasıyla altı boşalan kireçtaşından oluşan kaya kütlesi parçalanarak yaklaşık 20'm lik bir cephedeki hareket şeklinde gelişmektedir. Ancak bu düşme hareketi, kaya bloğunun düştüğü alan yaklaşık 30^{o} eğimli olduğu için, kısa bir mesafe sonra yuvarlanma hareketine dönüşmüştür.



Şekil 3. Çalışma alanının mühendislik jeolojisi haritası ve kesiti.

Kaya Yuvarlanması:Bölgedeki en yaygın ve en tehlikeli olan hareket kaya yuvarlanmasıdır. Yamaç üzerindeki yamaç birikiminin içinde gömülü halde oldukça fazla kaya bloğu bulunmaktadır ve birbirleriyle herhangi bir bağlantısı olamayan bu blokların etrafı aşındığında tamamen serbest kalmaktadırlar. Bu serbest kaya blokları herhangi bir nedenle (yağmur, kar, deprem, yapay titreşim vb.) bulundukları yerden hareket ederek yamaç aşağı yuvarlanmaktadırlar. Ayrıca yamaç önündeki şevde bulunan bazı kaya blokları düşme hareketine başladıktan sonra yuvarlanma hareketine geçiş yapmaktadırlar. Yuvarlanma hareketinde eğimi yaklaşık 40^{o}olanyamaçtan harekete geçen bir kaya bloğu, eğimin 50^{o}'nin üzerine çıktığı alanlarda sıçrama ile de oldukça uzun mesafelere hareket etme eğilimindedir. Hareket eden blokların izledikleri yol düzgün olmayıp, oldukça düzensiz olan bir yüzey geometrisi tarafından kontrol edilmektedir.

3.2. Kaya Hareketlerinin Değerlendirilmesi

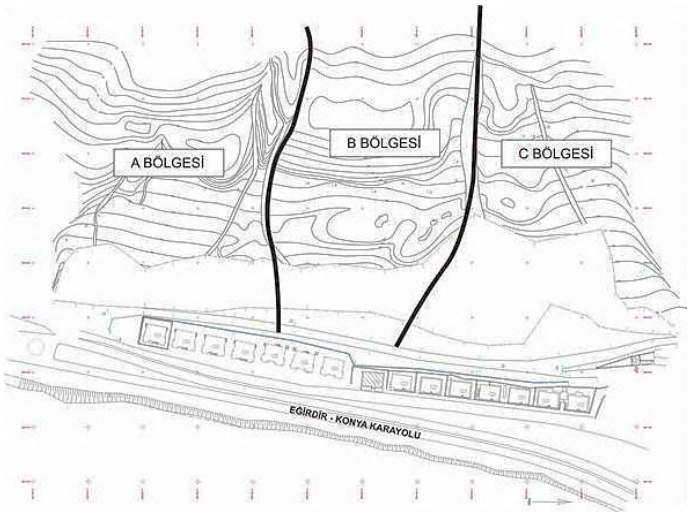
Bölgede mevcut yamaç denetimsiz bir şekilde kazılmış, dengesi bozulmuş ve olmaması gereken bir alanda binalar inşa edilmiştir. Bu aşamadan sonra kaya hareketlerinin durdurulması ekonomik ve teknik olarak mümkün değildir, ancak olabilecek etkilerini en aza indirmek mümkün gözükmektedir.

İmaret Mahallesi'ndeki Sağlık Ocağı'nın batısında gözlenen kaya hareketleri dökülme, düşme ve yuvarlanma şeklindedir. Bunların dışında çalışma alanında kaya ortamlarda gözlenen düzlemsel ve kama tipi kaymalar, kaya devrilmesi ya da dairesel kayma hareketlerinden herhangi birisi gözlenmemiştir. Ayrıca, çalışma konusu olan yamaçtaki kireçtaşlarının tabaka eğimlerinin20^o-40^o arasında ve yamaç içine doğru olması nedeniyle herhangi bir kayma hareketi gözlenmediği gibi,kayma potansiyeli de bulunmamaktadır (Mutlutürk vd., 2012). Bütün hareket, yamaçta faylanma nedeniyle kırıklı ve parçalı hale gelen kireçtaşlarının yüzeyde serbest hale gelen her boyuttaki parçalarının yamaç aşağı hareket etmesi şeklindedir. Bu tip hareket görülen alanlar için Hoek (2007) tarafından önerilen kaya düşmesi tehlikesi derecelendirme sistemine göre, inceleme alanı acil şev koruma önlemleri alınması gereken bölgede kalmaktadır. Bu nedenle, yapılan tüm değerlendirmelerde öncelikli olarak,yamaç üzerinden herhangi bir nedenle hareket edebilecek kaya parçalarının (çakıl ya da blok) yerlerinin belirlenmesi ve mevcut yapılara olabilecek etkilerine karşı koruma önlemlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Kayaları harekete geçiren en önemli etkenin suyun yanı sıra,sarsıntı olduğunu dikkate alınırsa, alınacak önlemlerin de buna uygun olması gereklidir. Örneğin, harekete geçmesi muhtemel kayaları yerinde parçalamak ve hareket ettirmek telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğurabilir. Hatta üzerinde yürümenin bile olanaksız olduğu bu yamaç üzerinde teraslama yapmak tehlikeli olabilecektir. Çünkü teraslama ile dökülen kayaların birikerek daha büyük tehlike oluşturacağı bölgenin morfolojik yapısından görülmektedir. Bu nedenle alınacak önlemler, kayaların bulundukları yerde sabitlenmesi ve harekete geçen kayaları hızlarının azaltılması ya da durdurulması şeklinde olmalıdır. Bu görüşler doğrultusunda aşağıdaki önlemlerin alınması önerilmiştir;

(a) Yaklaşık 1 m^3 üzerinde hacme sahip ve hareket etme riski olan kayalar yerinde sabitlenmeli ve hareketleri engellenmelidir.
(b) Kaya yuvarlanma riski olan alanlarda ise, çelik ağlarla yamaç kaplanmalı ve çelik ağlar yuvarlanabilecek kayaların içine girebileceği şekilde projelendirilmelidir.
(c) Yuvarlanma riskli alanların son noktasına, yuvarlanan blokların çarpıp durabilecekleri rijit olmayan enerji sönümleyebilecek esnek durdurucu yapılar yapılmalıdır.
(d) Yuvarlanma ve düşme riskli alanların önüne sıçrama enerjisini sönümlendirmek amacıyla kum çakıl gibi taneli malzemeden oluşan enerji emici alanlar oluşturulmalıdır.
(e) Taş sıçrama olasılığına karşı konutlar ve yol arasında çelik koruma ağları bulunmalıdır

Yukarıda belirtilen önlemlerin tümünün incelenen alanın tamamında uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle bölgedeki mevcut durum, olası hareketler ve alınması gereken önlemler birlikte düşünüldüğünde ekonomik çözüm üretebilmek amacıyla çalışma alanı 3 alt bölgeye ayrılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanında farklı önlem alınması gereken alt bölgeler

A Bölgesi: Bu bölüm tamamen yamaç molozlarından oluşmakta olup, yamaç yüzeyinde 1 m^3hacimlive daha büyük serbest kaya blokları bulunmaktadır. Yoğun kaya düşmesi ve yuvarlanması riski altındadır ve denetimsiz kazı yapılmış olan şev binalara çok yakındır.

B Bölgesi: Yamaçları kayalık ve denetimsiz kazı yapılmış olan şev bölümü ayrışmış kayalardan oluşan bölge, diğer bölgelere göre, yamaçtan yuvarlanma riskinin en az olduğu kesimdir. Şev bölümünde farklı ayrışmadan ve aşınmadan dolayı yaklaşık 20 m'lik bir cephede düşmeler meydana gelmiştir. Ancak şev ile yol kenar taşı arasındaki mesafe biraz fazla olunca hareket eden malzeme şev önünde kalmıştır.

C Bölgesi: Bu bölge A bölgesi ile benzerdir, ancak yamaç kesimi yüksek eğimli olmayıp, iri bloklar içermemektedir ve şev kazısı yapılan alanda fay aynası sağlam kaya gibi açığa çıkmıştır. Şev dibi ile yol arasında oldukça uzun bir mesafe bulunmaktadır, kayalardan oluşan bir engel yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır.Bu nedenle meydana gelen kaya hareketleri dışardan pek görülmemekte ve sanki sorun olmayan bir kesim gibi algılanmaktadır. Bu kesim de kaya yuvarlanma riski altında olan ve binalara da uzak bir alandır.

3.3. Kaya Hareketleri Koruma/Önleme Elemanları

İnceleme alanında halen devam eden, gelecekte de devam edecek kaya hareketleri ile oluşması muhtemel kaya hareketlerinin önlenmesi, sonuçlarından çevrenin göreceği zararların en aza indirilmesi amacıyl abu çalışma kapsamında aşağıda açıklanan ve Şekil 5'te özetlenen bir dizi koruma/önleme elemanları önerilmiştir. Yapılan öneriler uluslararası standart şev koruma yapıları arasından bilimsel olarak önerilen (Argun, 2002; Bell, 1980; Hoek, 2007; JRA, 1984) ve değişik firmalar tarafından üretilen (Kiciman, 2012;Maccaferri, 2011;Trumer, 2015) ürünler arasından seçilmiş olup, uygulama projelerinin yapılması sırasında detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir.

a-Kum-çakıl dolgu: Özellikle kaya düşmesi alanlarında, düşen ve yuvarlanan blokların en son ulaşacağı yerlerde çarpma enerjisini azaltmak ve sıçrama hareketinin önleyebilmek amacıyla kalınlığı 1.0 m'den az olmamak üzere kum ya da üniform çakıl dolgu kullanılmalıdır (Ritchie, 1963).

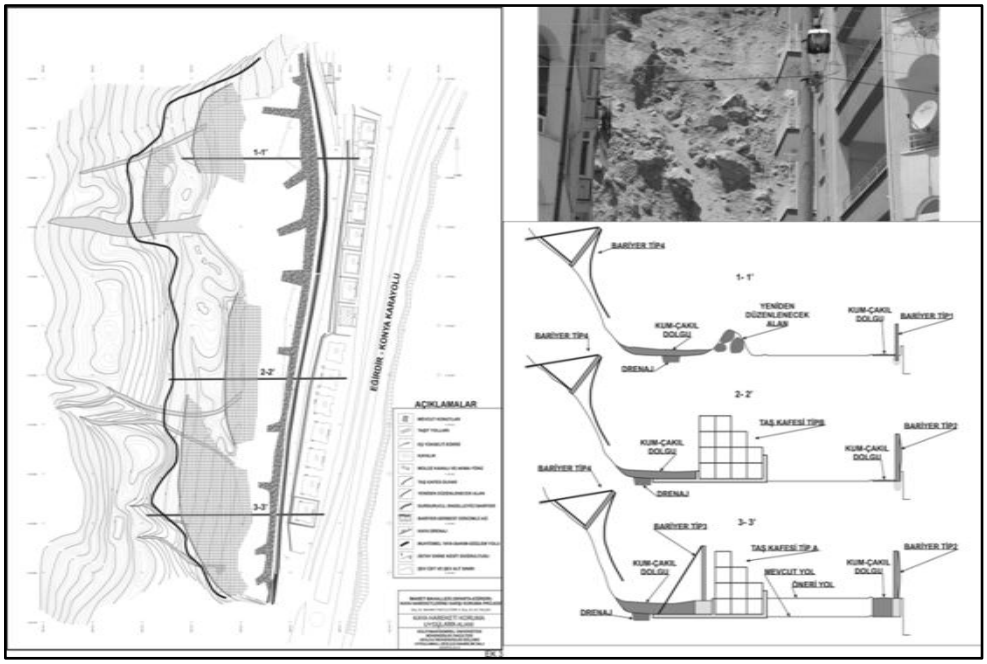
b-Beton: Yamaç üzerinde hareket etme riski olan ve hacmi yaklaşık 1 m^3 ve üzerindeki kaya bloklarının yerinde sabitlenmesi amacıyla betonlama işlemi yapılmalıdır. Betonlama, bloğun hareket edebileceği tarafta ve yamaç zemini ile blok arasında olmalıdır. Bu işlemdeki ana amaç, hem bloğun dengesinin bozulmasına neden olabilecek kısmının aşınmasını, hem de bloğun hareket etmesini engellemeye çalışmaktır.

c-Taş kafes (gabion, kaya sepeti): Taş kafesler; içine kaya parçaları, iri dere çakılları ve benzeri temiz ayrık malzemenin doldurulduğu tel örgülü sepetler olup, dolgu barajlar gibi kendi ağırlığıyla yerinde duran ve yanal kuvvetlere karşı da direnen esnek yapılı dayanma yapılarıdır. Tel örgü ile yapılan kafesler, sepete esneklik ve dayanıklılık sağlar ve kafesin kırılıp dağılmasına engel olurlar. Ayrıca gerek kafesin gerekse içine doldurulan malzemenin serbest durması nedeniyle doğal bir geçirimliliği vardır ve herhangi bir şekilde içinde ve arkasında su durmaz. Benzer dayanma yapılarına göre ekonomik çözüme sahip olan taş kafeslerin en önemli tercih nedenlerinden biri de çarpma ile oluşan enerjiyi sönümlemesidir.

d-Çelik bariyer: Çelik bariyerler, çelik direklerle desteklenmiş çelik ağlardan oluşan engelleyici ve durdurucu sistemlerdir. Hareket eden kaya malzemesi çelik ağa takılır, ağ esnek olduğu için çarpma enerjisinin bir kısmı sönümlenir ve durur. Kullanılan malzemenin niteliği ve uygulama şekline göre işlevselliği değişir. Basit uygulamalarda; ya da kuvvetin az geleceği alanlarda betonlanmış direkler kullanılırken, kuvvetlerin artmasıyla gergi kabloları ve ankrajlı uygulamalar gibi karmaşık uygulamalar yapılmaktadır.

Yüksek eğimli alanlarda çelik bariyer arkasında biriken malzemenin zaman içinde temizlenmesi çok zor olduğu için problem oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tip alanlarda kullanılan çelik ağların eğim aşağı olan kısımları serbest dökümlü, eğim yukarı olan kısımları ise yuvarlanan kayaların içine girebilmesi için yüksek ve açık bırakılmaktadır. Bu şekilde yuvarlanan kayalar çelik ağın içine girmekte ve ağ içinde yuvarlanarak sıçramadan aynı zamanda enerjisini de kaybederek şev dibine düşmektedir.

Değişik firmalar tarafından farklı tasarım şekillerinde üretilen bu çelik bariyerler kullanılan malzemenin niteliği açısından da farklılık göstermektedir. Bu çalışma kapsamında çelik bariyerin amacı ve işlevselliği ön plana alınmıştır. Bu şekilde çalışma alanında uygulama yerleri farklı değişik işlevleri olan 4 farklı tipte çelik bariyer önerilmiştir. Öneri niteliğinde olan bu çelik bariyerlerde kullanılacak malzemenin niteliği ve bariyer boyutları, uygulama projelerinin yapılması sırasında belirlenmelidir.



Şekil 5. İmaret Mahallesi kaya hareketleri önleme/koruma önerileri haritası ve kesiti

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Isparta ili, Eğirdir ilçesi, İmaret Mahallesinde inşaatları tamamlanmış ve kullanımda olan 18 bina ve 1 sağlık ocağı, yamaçtan sürekli irili ufaklı düşen kaya parçaları nedeniyle tehlike altındadır. Bu çalışmada, kaya hareketlerine karşı acilen koruma amaçlı hangi önlemlerin alınabileceği araştırılmış,aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Öneriler uluslararası standart şev koruma yapıları arasından bilimsel olarak önerilen ve değişik firmalar tarafından üretilen ürünler arasından seçilmiş olup, uygulama projelerinin yapılması sırasında detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir.

1)Tüm çalışma alanını kapsayan yüzey sularının hızlı ve kontrol altında sahadan uzaklaştırılması amacıyla drenaj hattı yapılmalıdır.
2) Küçük veya büyük kaya parçalarının çarparak sıçrama ihtimali olan tüm alanlarda, yamaç ile yol arasında kum-çakıl karışık malzemeden oluşan enerji sönümleyici dolgu alanlar oluşturulmalıdır
3) Yamaç üzerinde hareket etme riski olan kaya bloklarının yerinde sabitlenmesi amacıyla hacmi yaklaşık 1 m^3 ve üzerindeki boyutlarda olan bloklara yerinde betonlama işlemi yapılmalıdır.

4)İnceleme alanının güney bölümünün uygulama yapılması için oldukça dar kesitli, yol üzerine sürekli düşen kayaların hareket halindeki taşıtlar için de tehlike oluşturması nedenleriyle emniyet açısından yolun bu bölümünün yükseltilmesi uygun olacaktır. Bu alan alternatif beton koruma tüneli ile de geçilebilir.
5) Taş kafesleri,gerek çarpma enerjisinin sönümlenmesi gerekse suyu kolay drene etmesi açısından dayanma yapısı olarak rijit beton duvarlar yerine tercih edilmelidir.
6) Çalışma alanında 4 farklı amaç için 4 farklı tipte ve çelik bariyer kullanılmalıdır.

(a) TİP 1, Sıçrayıp sekecek ufak kaya parçalarının durdurulması ve güvenlik açısından yapılması gereken bariyer,
(b) TİP 2, TİP 1 ile aynı amaç ve işlevde olan, ancak kaya hareketlerinin en kritik olduğu şeve oldukça yakındır, dolayısı ile taş sıçrama olasılığı daha fazla olan alanda, daha büyük ve daha dayanımlı olması gereken bariyer,
(c) TİP 3, Taş kafesi desteklemek amacı ile yapılması gereken bariyer,
(d) TİP 4,Yamaçta meydana gelebilecek ilk hareketin enerjisini azaltabilecek, üst kısmı şevden yüksekte, alt kısmı şeve yaslı, harekete geçecek taşı kapan gibi tutan ve sıçrama hareketini engelleyebilecek yamacın üzerinde yapılması gereken bariyerler.

7)Yamaç ile yol arasındaki alanın geniş olduğu alanda (Şekil 5, 1-1' kesiti) kaya hareketlerini engellemek ve çevre düzenlemesi yapmak amacıyla yol kenarında doğal kaya blokları kullanılarak alan yeniden düzenlenmelidir.
8) Yamaç üzerinde kaya hareketleri ile yapılan uygulamaların izlenmesi ve gözlem amacı ile bir yaya yolu planlanmalıdır.
9) Ayrıca yapılacak tüm proje ve hesaplamalarda,olası bir depremin kaya hareketleri üzerinde yaratacağı etki dikkate alınarak, inceleme alanının I. Derece deprem bölgesinde bulunduğu ve bir fay zonu içinde kaldığı unutulmamalıdır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma,2012'deEğirdir Belediyesi'nin katkıları ile gerçekleştirilmiş olup, yazarlar katkılarından dolayı ilgili belediye başkanı ve çalışanlarına teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Argun, T., 2002. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları. Atlas Yayın, İstanbul.
Bell, F.G., 1980. Engineering Geologyand Geotechnics. Newnes-Butterworths, Boston, 497 p.
Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering. http://rocscience.com/education/hoeks_corner.
Karakuş, K., 2009. Kent Planlaması ve Jeoloji. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları No:104, Ankara.
JRA, 1984. Manual for Soi lProtection. Japan Road Association.
Kiciman, 2012. http://kiciman.com.
Köseoğlu, M., 1987. Yol Jeolojisi Ders Notları. AÜ Mühendislik Fakültesi, Isparta (yayımlanmamış)
Maccaferri, Inc., 2011. http://maccaferri.com
Mutlutürk, M., Yalçın, A., 2012. İmaret Mahallesi (Isparta-Eğirdir) kaya hareketlerine karşı koruma projesi. SDÜ Döner Sermaye İşletmesi Projesi, Isparta.
Ritchie, A.M., 1963. The evaluation of rock fall and its control. Highway Research Record. Vol.: 17.
Şenel, M., 1997. Türkiye Jeoloji Haritaları, Isparta-J11 Paftası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
Trumer, 2015. http://trumershultzbauten.com
Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. R.L. Schusterand R.J. Krizek (eds.), TRB, Natonal Research Council, Washington, D.C., 12-33.

Çoruh Nehri Üzerindeki Baraj Projelerine Heyelanların Etkisi

Dam Projects Affected by the Landslides on the Çoruh River

A. Ertunç[1,*], H. Çetin[2]

[1] *Toros Üniversitesi, Mersin*
[2] *Çukurova Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana*
*(*aziz.ertunc@toros.edu.tr)*

ÖZ: Çoruh Nehri Kuzeydoğu Anadolu'nun en önemli nehirlerinden biridir. Ön çalışmalar sonucunda nehrin enerji potansiyelinden yararlanmak için 11 baraj yeri seçilmiştir. Büyük hacimli heyelanların varlığı nedeniyle, başlangıçta önerilen baraj yerlerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. İspir baraj yeri terkedilmiş ve yerine akış yukarıda Norgah baraj yeri ve sol yamaçtan 18.600 m'lik kuvvet tüneli önerilmiştir. Benzer şekilde, Üzümlü baraj yeri terkedilmiş ve yerine sol yamaçtaki heyelanların akış yukarısında Karakale (Arkun) baraj yeri ve sağ yamaçtan kuvvet tüneli önerilmiştir. Havuzlu ve Demirkent heyelanları araştırılmış ve bunların Yusufeli ve Zeytinlik (Artvin) barajlarına olası etkileri yorumlanmıştır. Heyelanların akış yukarısına İnanlı barajının yapılması, sol yamaçtan açılacak kuvvet tüneliyle, Zeytinlik (Artvin) baraj yerine kurulacak santrale suyun taşınmasıyla Havuzlu ve Demirkent heyelanlarının riski sıfırlanmış olacaktı. Ancak günümüzde Zeytinlik (Artvin) barajının yapımı ileri bir aşamaya gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Baraj, Heyelan, Kuvvet Tüneli, Çoruh Nehri

***ABSTRACT**: The Çoruh River is one of the most important rivers in Northeastern Turkey. Preliminary studies to determine the energy potential of this river resulted in the selection of 11 potential dam sites. The presence of large landslides at some of the sites has led to modifications to the initial proposals; for instance the İspir dam was abandoned and replaced with the Norgah scheme upstream of the landslides. Similarly, the proposed location of the Üzümlü dam site was abandoned and a new dam site was proposed upstream of the landslide (Arkun). The Havuzlu and Demirkent landslides have been investigated to assess their possible influence on the Yusufeli and Zeytinlik (Artvin) dam sites. The best solution was to abandon the Zeytinlik (Artvin) dam site and construct the İnanlı dam situated upstream side of the landslides, placing the power station downstream of the landslides and transferring the water from the dam to the power plant via tunnel. However, the construction of the Zeytinlik (Artvin) dam is nearly completed.*

***Keywords:** Dam, Landslide, Power Tunnel, Çoruh River*

1.GİRİŞ

Çoruh Nehri, $9X10^9$ kWh enerji potansiyeliyle Kuzeydoğu Anadolu'nun en önemli nehirlerinden biridir. Nehrin enerji potansiyelinden yararlanmak için 11 baraj tasarlanmıştır. Bunlar akış yukarıdan itibaren Laleli, Kılıççı, İspir (Norgah), Güllübağ, Çetinboğaz, Üzümlü (Arkun), Yusufeli, Zeytinlik (Artvin), Deriner, Borçka ve Muratlı barajlarıdır. Bunlardan Deriner, Borçka ve Muratlı barajları tamamlanmıştır. Arkun, Yusufeli, Güllübağ, ve Zeytinlik (Artvin) barajlarının yapımı sürmektedir. Diğerleri proje safhasındadır. Ortalama akım Laleli'de 33 m^3/sn ve Muratlı'da 205,45 m^3/sn'dir.

2.STRATİGRAFİ

İnceleme alanının güneybatısında Liyas-Üst Kretase yaşlı Pügey formasyonu ile Eosen yaşlı Laleli volkanitleri; Pliyo- Kuvaterner yaşlı Güllübağ formasyonu; kuzeydoğusunda ise Liyas yaşlı Yusufeli formasyonu, Üst Kretase yaşlı Berta formasyonu mostra verir. İkizdere magmatitleri bunların arasına girmiştir. Kuvaterner yaşlı eski ve yeni alüvyon ile yamaç döküntüsü de bulunmaktadır (Gattinger, 1955; 1956)

2.1. Yusufeli Formasyonu

Yusufeli formasyonu, Yusufeli ilçesi kuzeydoğusu ile Artvin ili güneyine kadar Çoruh Nehri boyunca yaygın olarak mostra verir. Ayrıca Oltu Çayı boyunca, Dağyolu Köyü'ne kadar izlenebilir. Kalınlığı binlerce metredir. Çoruh'un açtığı dar vadide antiform şeklinde mostra veren birimin alttan üste izlenmesi olanaklıdır. Ancak, birimin tabanı görülemez. Altta serpantinleşmiş gabro, amfibolit, bunun üstünde yer yer yastık lav özelliği taşıyan spilit, metalav ve yeşil şist, en üstte grovak, kayraktaşı ve fillat vardır. Egemen renkler siyah, koyu yeşil ve gridir. Kıvrımlanmalar, faylanmalar, bindirmeler ve genç granit intrüzyonları bu kayaların ilişkilerini çok karmaşık bir hale sokmuştur. İlksel ilişkilerin saptanması çok zordur. Genç granit intrüzyonları, dokanakta amfibolit oluşumuna ve milonitleşmeye neden olmuştur. Formasyon sert, dayanımlı ve geçirimsizdir. Bu formasyondaki heyelanlar, ayrışma ve yamaç eğimiyle ilgilidir.

2.2. Berta Formasyonu

Berta formasyonu, Çetinboğaz baraj yerinin akış aşağısından başlayarak, Yusufeli ilçesine kadar Çoruh'un her iki sahiline uzanır. Zeytinlik beldesinin doğusundaki mostra, kuzeydoğuya doğru süreklidir. Berta formasyonunda spilitik bazalt gibi bir bazik volkanizma ile dasit, riyolit gibi bir asit volkanizma ardalanmaktadır. Araya yer yer çamurtaşı, marn, kireçtaşı, kumtaşı ve çakıltaşı karışmıştır. Birim yer yer dayklarla kesilmiştir. Hidrotermal alterasyon alanları geniştir ve yer yer silisleşme ve çakmaktaşı oluşturmuştur. Toplam kalınlık 2000 m yi aşkındır.Bu formasyonda lav,kireçtaşı ve çakıltaşı düzeyleri sert ve dayanımlı; tüf, çamurtaşı ve marn düzeyleri isedayanımsız ve geçirimsizdir. Ayrışma ve yamaç döküntüleri, heyelanların ana nedenleridir.

2.3. Pügey Formasyonu

Çoruh vadisinde yaklaşık olarak İspir-Erzurum karayolunun güneyinde kalan alanda, kireçtaşının egemen olduğu kireçtaşı-marn ardalanmasıyla, kiltaşı, kayrak taşı ve marnın egemen olduğu, yer yer kumtaşı ve çakıltaşı ara katkılı kayalar birbirleriyle giriktir. Bunlar arasına yer yer volkanik kayalar da sokulmuştur. Arada, inceleme alanı dışında yer yer işletilen kömürler de bulunur. İspir-Erzurum yolunda ofiyolitler de görülür. Kireçtaşı gri, sarımsı, yeşil, kahverengi, ince ve orta tabakalı, düzenli eklemli, yeniden billurlaşmalı, ince kalsit damarlı, çok sert ve dayanımlıdır. Marn sarı, yeşilimsi, ince tabakalı, dayanımsızdır. Kireçtaşı ise sert ve dayanımlıdır. Kiltaşı ve marn dayanımsız ve geçirimsizdir. Pügey formasyonundaki heyelanlara bu dayanımsız düzeyler neden olmuştur. Bu heyelanların en büyüğü, Tortum Gölü'nü oluşturmuştur.

2.4. Laleli Volkanitleri

Laleli volkanitleri, inceleme alanının batı ucundan başlayarak, Norgah baraj yerinin doğusuna kadar Çoruh Nehri'nin her iki sahilinde sürekli mostra verir. Buradan İspir ilçesine kadar sol sahilde mostra veren volkanitler daha doğuya da uzanır. Bu volkanitler tüf, lav ve aglomeradan oluşmuştur. (Altınlı, 1970; Eroskay, 1970). Lav ve aglomera ince, orta ve kalın akma yapılıdır. Tüf ince dokulu, sert, dayanımlı ve düzenli eklemlidir. Kaya yüzeyleri ayrışmıştır. Bu kayalar yer yer granit dayklarıyla kesilmiştir. Renk koyu yeşil, mor, siyahtır. Volkanitler sert, dayanımlı ve geçirimsizdir. Faylar ve eklemler boyunca su kaçakları beklenebilir.

2.5. İkizdere Magmatitleri

İkizdere magmatitleri inceleme alanında Kılıççı baraj yerinin güneybatı kısmında ve İspir, Güllübağ, Çetinboğaz, Yusufeli ve Artvin baraj yerleri ve dolaylarında mostra verir. Mostralar düzensizdir ve olasılıkla büyük Rize batolitinin uzantısıdır. Litolojik olarak, granodiyorit-tonalit, adamellit, porfirik, mikrogranit ve granit-gnays tanımlanmıştır. İkizdere magmatitleri çok sert, dayanımlı ve yüzeyde ayrışmıştır. Faylar, dayklar ve çatlaklar yoluyla önemli su kaçakları beklenmektedir.

2.6. Güllübağ Formasyonu

Güllübağ formasyonu, İspir ilçesinin güneybatısından başlayarak, doğuya doğru giderek genişleyen bir şerit şeklinde uzanır. Bu formasyon, hakim kırmızı rengi ve heyelan topoğrafyasıyla kolaylıkla tanınabilir. Kalınlığıyaklaşık 200 m'dir. Altta gri ve yeşil renkli, ince katmanlı, laminali çamurtaşı ile temsil edilen düzeyler bulunur. Bunların üstünde bolluk sırasına göre kırmızı renkli çamurtaşı, kumtaşı ve çakıltaşından oluşan kalın bir istif bulunmaktadır. Bu istifte katmanlanma belirgin değil veya az belirgindir. Üç değişik litoloji arasında yanal ve düşey değişimler vardır. Tuzun varlığı mostrada görülmese de, birimden çıkan suların buharlaşmasıyla tuzlu çubuklar oluşmaktadır. Daha doğuda Kabak Tepe dolayında çökelme sonrası, çamurtaşları içinde kılımsı jips damarları oluşmuştur.
Bu formasyon içindeki çamurtaşı dayanımsız, kumtaşı ve çakıltaşı ise orta dayanımlıdır. Tuz ve jipsin erimesiyle geniş heyelanlar oluşmuştur.

2.7. Eski Alüvyon

Eski alüvyon, çoğu yerde Çoruh'tan 20-30 m yüksekte bulunur. Ayrıca Deriner Barajı'nın kuzeyinde Çoruh'tan 150 m yüksek bir diğer düzey de bulunmaktadır. Eski alüvyon beyaz, koyu yeşil, koyu mavi, pembe, kırmızı, mor, siyah renkli andezit, diyabaz, bazalt, granit, granodiyorit, radyolarit ve çamurtaşı parçalarını içermektedir. Kötü boylanmış taneler mil boyutundan 40-50 cm'lik bloklara kadar değişen boyutta olup, yuvarlak ve küttür.

2.8. Yeni Alüvyon

Yeni alüvyon, genellikle Çoruh boyunca akış aşağıya doğru gidildikçe kalınlaşır. Yatak eğimi yüksektir. Kılıççı baraj yerinde alüvyon kalınlığı 5-6 m iken, Üzümlü baraj yerinde sondajlarda 69,75m ve Muratlı baraj yerinde 69,05 m kalılnığında alüvyon kesilmiştir. Ögeler beyaz, sarımsı, gri, yeşilimsi, kırmızı, kahverengi, siyah, mor renkli granit, granodiyorit, kuvarslı diyorit, kireçtaşı, çamurtaşı, tüf, radyolarit, diyabazdan oluşmuş yuvarlak, küt ve yer yer köşelidir. Tane boyları mil boyutundan 30 cm'ye kadar değişir. Kötü boylanmalıdır ve 1-10 cm boyutlu taneleregemendir. Seyrek olarak 3-5 m'ye ulaşan boyularda köşeli bloklar yamaçlardan yuvarlanmıştır.

2.9. Yamaç Döküntüsü

Çoruh Nehri boyunca yamaç döküntüsü, Norgah dolayından başlayarak Muratlı'ya kadar uzanan alanda bolca ve kalındır. Bunlar özellikle İspir, Üzümlü, Zeytinlik (Artvin) ve Deriner barajlarının göl alanlarında önemli boyutlara ulaşırlar. Bu döküntülerin başlıcaları Güllübağ baraj yeri akış yukarısı her iki sahil, Üzümlü baraj yeri akış yukarısı sol sahil (Yokuşlubağ), Havuzlu, Demirkent, Yağcılar ve Zeytinlik beldesi dolayındadır.

3. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

Çoruh Nehri'nin enerji potansiyelinden yararlanmak amacıyla nehir üzerinde 11 baraj tasarlanmıştır. Birinci yazar; 1970 yılında Laleli rezervuarında çalışan ekipte bulunmuş, 1980, 1990, 2002, 2007 yıllarında, Laleli hariç, tüm Çoruh Nehri üzerinde yaptığı çalışmalar yayınlamıştır. Burada sadece İspir (Norgah), Üzümlü (Arkun) ve Zeytinlik (Artvin, İnanlı) barajları üzerinde heyelanların etkileri ve alınan veya alınması gereken önlemler sunulmuştur.

3.1. İspir ve Norgah Baraj Yerleri

İspir baraj yerinde talveg yükseltisi 1190 m ve maksimum su yükseltisi1320 m olarak tasarlanmıştır. Kılıççı Pazaryolu (Norgah) arasında Çoruh, tümüyle Laleli volkanitleri içinde akmaktadır. Norgah-İspir arasında sağ yamaçta Pügey formasyonu, sol yamaçta genellikle Laleli volkanitleri ile İspir baraj yerinde İkizdere magmatitleri bulunmaktadır. Pliyo-Kuvaterner yaşlı tuzlu, jipsli Güllübağ formasyonu da yer yer her iki yamaçta mostra verir. Arazi incelemelerinde, önerilen İspir barajı

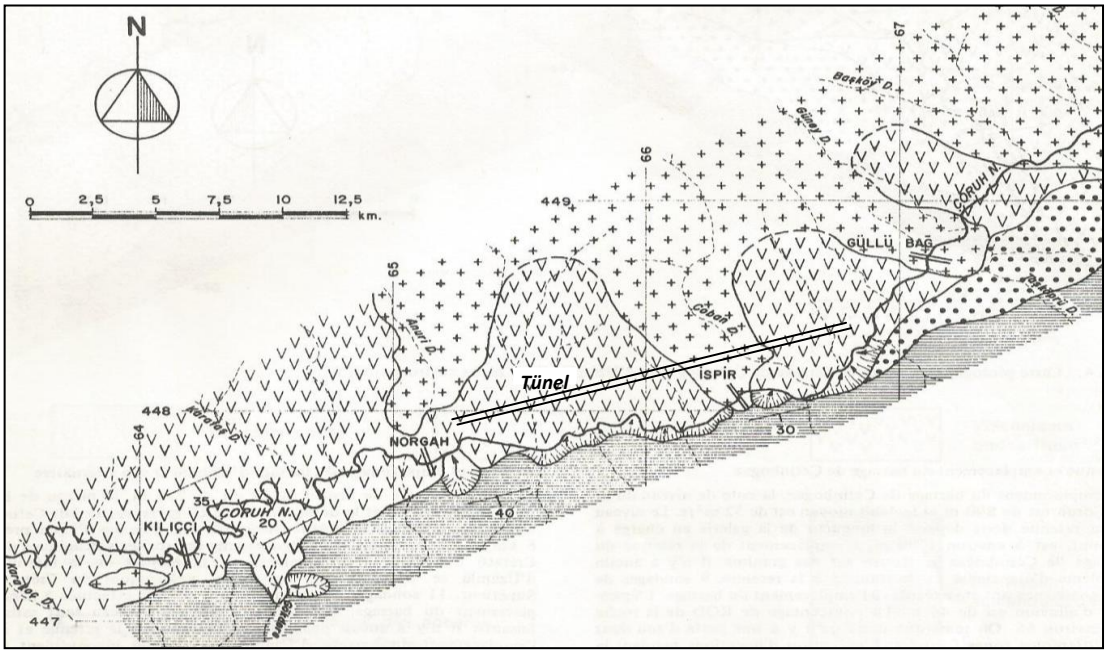
rezervuarındaki Pügey formasyonunda yoğun heyelanlar görülmüştür. Bu heyelanlar Norgah ilçesi ile Kılıççı köyü arasında rezervuarın üst kotlarında; Norgah-İspir arasında ise rezervuarda bulunmaktadır. Kireçtaşı- marn ardalanmasında marnın kolay aşınmasıyla kireçtaşı desteksiz kalıp düşmektedir. Yamaç eğiminin 30-40° ve sıcaklığın -20 ile +30°C arasında olması ve buna Çoruh Nehri'nin topuk aşındırması ve yeraltısuyunun etkisinin de eklenmesiyle olay hızlanmaktadır. Sağ yamaçtaki heyelanlar nedeniyle İspir baraj projesi terkedilmiştir. Zaten eski Norgah-İspir karayolu heyelan nedeniyle terkedilerek, sol yamaçtan geçen yeni yol yapılmışve eski yol kıyısındaki Tarım Bakanlığı binaları da heyelandan çatlayarak kullanılamaz hale gelmişti. Ayrıca, 2000 yılı ilkbaharında bu heyelanlar Çoruh Nehri'nin önünü tıkamış ve geçici bir göl oluşturmuştur.

Heyelan nedeniyle terkedilen İspir baraj yeri yerine, heyelanların akış yukarısında, Norgah' ın 2 km kuzeydoğusunda Norgah baraj yeri seçilmiş (Şekil 1) ve sol yamaçtan 18.600 m uzunluğunda kuvvet tüneli açılarak ve santral heyelanların akış aşağısına yerleştirilerek, hem heyelanların etkisinden kurtarılması, hem de aradaki düşüden de yararlanılması öngörülmüştür. Baraj yeri Laleli volkanitleri üzerindedir ve yüksekliği 58 m olarak tasarlanmıştır. Tünelin ilk 10.600 m' si Laleli volkanitleri, 5.400 m'si İkizdere magmatitleri ve son 2600 m'si Laleli volkanitlerinden geçecektir.

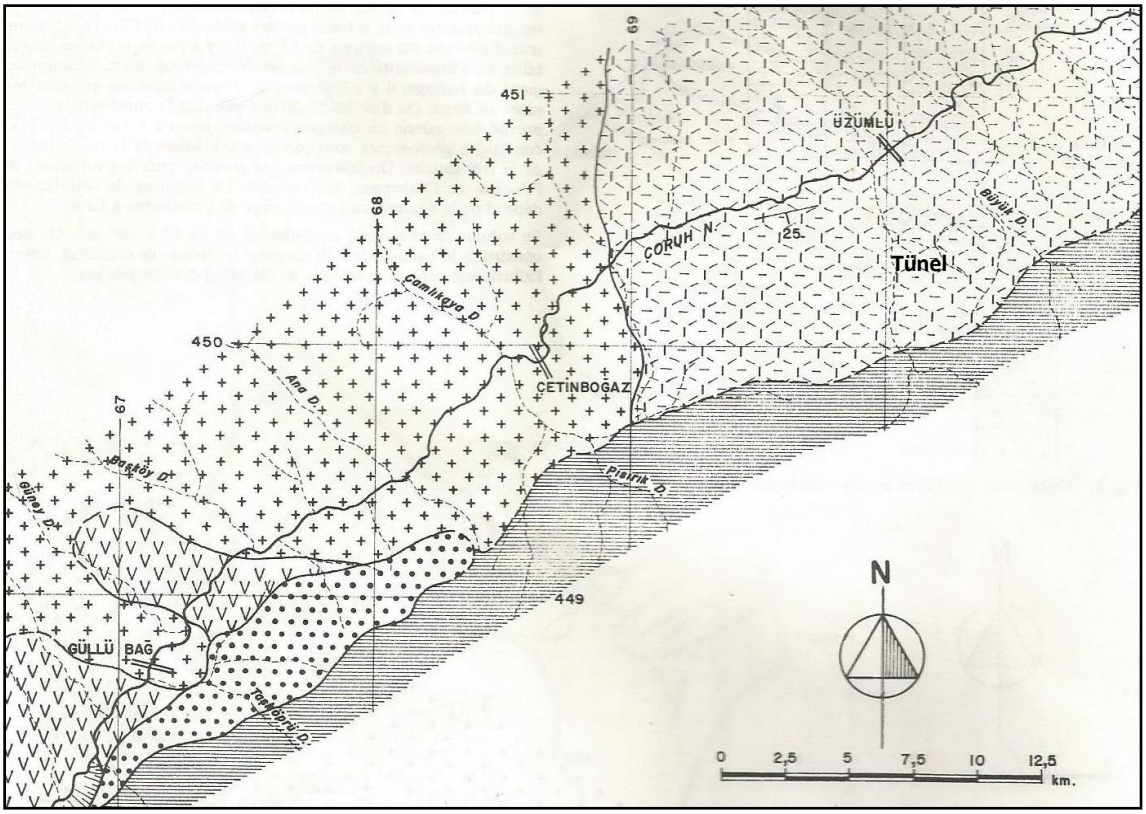
3.2. Üzümlü ve Karakale (Arkun) Baraj Yerleri

Üzümlü baraj yerinde talveg kotu 755 m'dir ve maksimum su yükseltisi 890 m olarak tasarlanmaktaydı. Üzümlü baraj yeri Berta formasyonunun andezitik lav, tüf ve aglomeraları üzerindedir. Burada alüvyon kalınlığı 69,75 m'dir. Rezervuar Berta formasyonu ve İkizdere magmatitleri üzerindedir (Şekil 2)

Sol yamaçta, Üzümlü baraj yerinin 2 km akış yukarısında Yokuşlubağ heyelanları bulunmaktadır. Bu heyelanlar yaklaşık olarak 2 km^2'lik bir alan kaplarlar. Derinlik, yüzey gözlemlerine göre 50-250 m arasında değişir. Jeofizik çalışmalar kalınlığın belirlenmesinde başarılı olamamıştır. Sondaj çalışmalarında makineler ve platformları aşağı doğru kaymıştır. $2X10^8$ m^3 tahmin edilen heyelan nedeniyle Üzümlü baraj yeri terk edilerek akış yukarıda Karakale baraj yeri seçilmiş ve adı da merhum Kemal Arkun anısına Arkun olarak değiştirilmiştir. Santral da heyelanın olası etkisinden kurtarmak için sağ yamaçta heyelanların akış aşağısına kaydırılmış ve arada kuvvet tüneli açılmıştır. Bu proje tamamlanmak üzeredir.



Şekil 1. Norgah barajı ve tünel seçeneği jeoloji haritası (Ertunç, 1980)



Şekil 2. Arkun barajı jeoloji haritası (Ertunç, 1980)

3.3. İnanlı ve Zeytinlik (Artvin) Baraj Yerleri

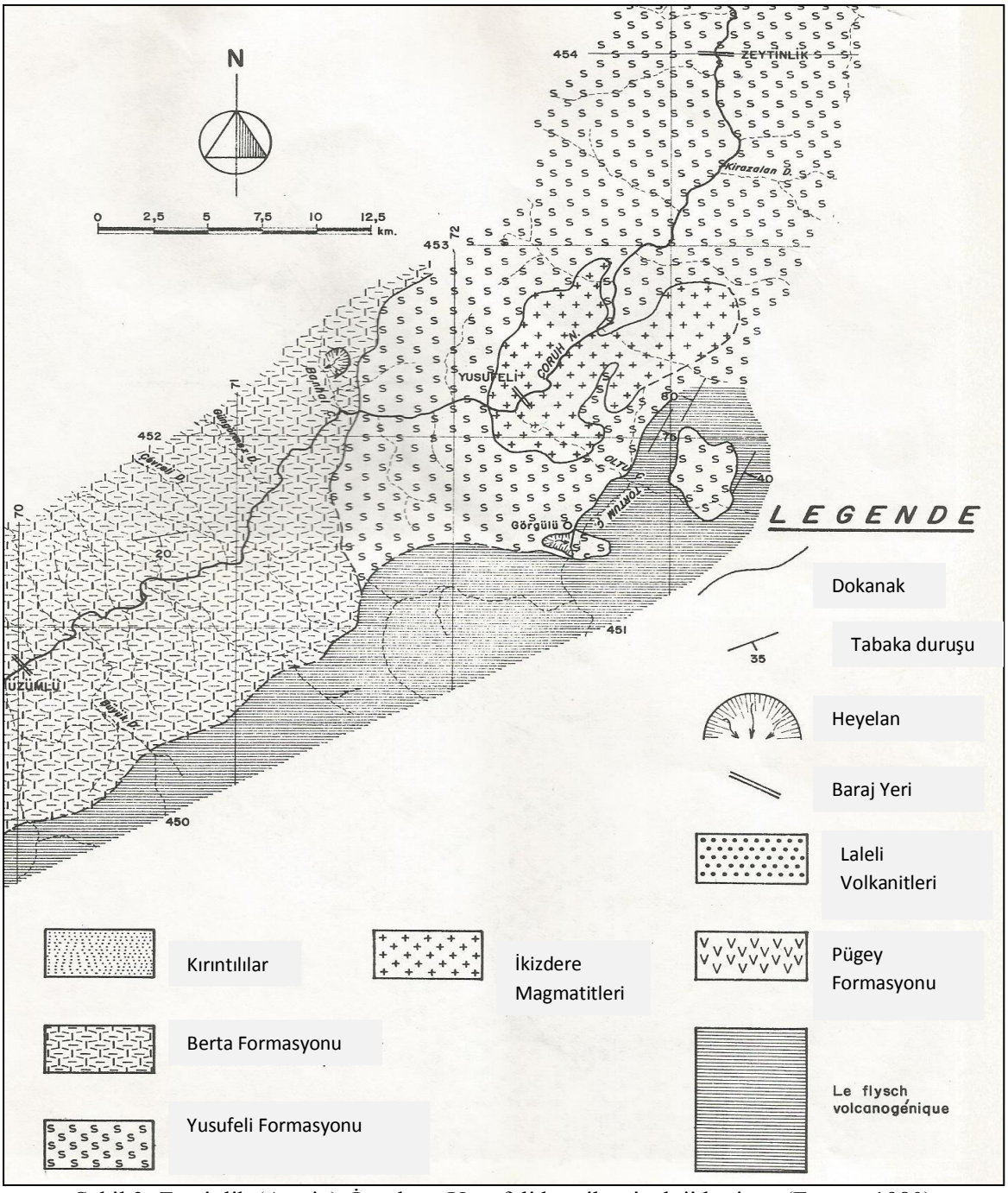
Zeytinlik baraj yerinde talveg yükseltisi 365 m, maksimum su yükseltisi 500 m olarak tasarlanmıştır. Başlangıçta Artvin Barajı'na Deriner Barajı adı verilince, Zeytinlik Barajı'nın adı da Artvin Barajı olarak değiştirilmiştir. Yusufeli baraj yerinden sonra Çoruh Nehri, yaklaşık 10 km daha ötede İkizdere magmatitleri içinden akar. Buradan Zeytinlik (Artvin) baraj yerine kadar göl alanı, Yusufeli formasyonu içinde kalır. Burada spilitik bazalt, kayrak, şeyl, radyolarit, kuvarsit, denizaltı lav akıntısı ardalanması ve granit intrüzyonları görülür. Zeytinlik (Artvin) baraj yeri ve dolayındaki egemen litoloji kayraktır (Şekil 3).

Havuzlu ve Demirkent heyelanlarının Zeytinlik (Artvin) ve Yusufeli barajlarına etkileri araştırılmıştır (Ertunç, 1980, 1990, 2002; Ertunç ve Çetin, 2007). Bu heyelanlar, Yusufeli formasyonunun ayrışmasından oluşmuş gereçleri kapsar. Sol yamaçtaki Havuzlu heyelanlarının etek kısmı suyla temasta olacaktır. Rezervuar suyunun alçalıp-yükselmesi topukta kaymaya neden olabilir. Burada EİE idaresi tarafından sondajlar yapılmıştır. Bunun üst kotlardaki kütlelere etkileri, halen DSİ tarafından araştırılmaktadır. Sağ yamaçta Demirkent Bucağı'nın üzerinde oturduğu gereç, bugün için aktif değildir. Zeytinlik (Artvin) rezervuarı doldurulduğunda 70 m'lik kısmı suyla temasta olacak gerecin rezervuara doğru kayması beklenmelidir. Havuzlu ve Demirkent'teki gereçlerin kayması durumunda, Yusufeli ve Zeytinlik (Artvin) barajlarının etkilenmesi kaçınılmazdır. Buna rağmen, Zeytinlik (Artvin) barajının yapımı ileri bir aşamadadır.

Bu konunun kesin çözümü, heyelanların akış yukarısına 68 m yüksekliğinde İnanlı Barajı'nın yapılması, kalan düşünün sol yamaçtan açılacak bir tünelle değerlendirilmesiydi. Bu tünel Deriner Baraj rezervuar kotuna yapılacak santrale kadar uzatıldığında, Zeytinlik (Artvin) barajının yapılmasına da gerek kalmayacaktı. Bu şekilde hem heyelanlardan kaçılmış, hem de tüm düşü kullanılmış olacaktı. Bu amaçla 1984 yılında EİE İdaresi tarafından İnanlı baraj yerinde araştırmalar yapılmıştır.

4. SONUÇLAR

Çoruh Nehri üzerindeki heyelanlardan etkilenebilecek olan İspir ve Üzümlü baraj yerleri Norgah ve Arkun olarak heyelanların akış yukarısına kaydırılmış, santraller ise heyelanların akış aşağısına yerleştirilerek, suyun barajdan santrale iletilmesi için kuvvet tüneli açılmış (Arkun) ya da açılması önerilmiştir (Norgah). Zeytinlik (Artvin) barajı rezervuarındaki Havuzlu ve Demirkent heyelanları nedeniyle Yusufeli ve Zeytinlik (Artvin) barajları sorun yaşayacak olmalarına rağmen, Zeytinlik (Artvin) barajının yapımı ileri bir aşamaya gelmiştir. Bunun yerine, heyelanların akış yukarısına İnanlı barajının yapımı ve santralin heyelanların akış aşağısına hatta Zeytinlik (Artvin) baraj yerine yerleştirilseydi ve bu ikisi arasında kuvvet tüneli açılsaydı bu sorun yaşanmamış olacaktı.



Şekil 3. Zeytinlik (Artvin), İnanlı ve Yusufeli barajları jeoloji haritası (Ertunç, 1980)

5. KAYNAKLAR

Altınlı, İ.E., 1970. Geology and engineering geologic investigation of part of İyidere Basin's hydroelectrical development scheme. Publication of EİE, Ankara.

Eroskay, S.O., 1970. Geological report of the Laleli-Tosköy diversion tunnel. Publication of EİE, Ankara.

Ertunç, A., 1980. Les possibilités de barrages sur le fleuve Çoruh. Bulletin of the International Association of Engineering Geology,22, 91-100.

Ertunç, A., 1990. L' effect de glissements de terrain sur les futur barrages en Turquie. In: 6th International Congress of IAEG, Amsterdam.

Ertunç, A., 2002. The recent investigations of the dam site possibilities of the Çoruh River, Turkey. In: 9th International Congress of IAEG, Durban.

Ertunç, A., Çetin, H., 2007. Dam projects affected by the landslides on the Çoruh River, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 335-343.

Gattinger, T.E.,1955. Bericht über geologische Aufnahmearbeiten im Gebiete zwischen Çoruh und Erzurum, Nordost Türkei, MTA Rapor No. 2379, Ankara.

Gattinger, T.E., 1956. Bericht über geologische Aufnahmeergänzungs und Revisionsarbeiten in den Ostpontiden im Bereich von Vilayet Trabzon, Rize, Gümüşhane, Erzurum, Artvin und Kars. MTA Rapor No.2380, Ankara.

Jeofizik Yöntemlerle Heyelan İncelemeleri

Geophysical Methods for the Investigation of Landslides

K.Gelişli[1,*]

[1] *KTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon-Türkiye*
*(*gelisli@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Heyelanlar, can ve mal kayıplarına neden olan çok yaygın bir kütle hareketi çeşididir. Heyelanları incelemek, izlemek ve yamaç duraylılığını belirlemek için jeolojik, jeofizik, jeodezik, kuyu logu teknikleri ve jeoteknikten oluşan çok disiplinli entegre bir çalışma gereklidir. Heyelan duraylılığının hesabı için birçok bilgiye ihtiyaç vardır. Bu bilgiler sadece klasik prospeksiyon yollarıyla değil, son yıllarda büyük gelişmeler gösteren jeofizik yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Heyelanların jeofizik karekterizasyonu; sismik kırılma, yansıma, sismik tomografi, elektrik özdirenç, özdirenç tomografi, doğal potansiyel, elektromanyetik, yüzey dalgası ve mikrotremor ölçüleri ile belirlenebilir. Ayrıca, heyelanlarda sismik gürültü kaydı ve ivme ölçümleri ile izleme yapılmaktadır. Bu yöntemlerle heyelanın sınırları, kayan kütlenin kalınlığı, heyelan bölgesindeki değişik malzemelerin dağılım düzeni ve bazıjeoteknik özellikleri, suyun varlığı ve dağılımı araştırılır. Bu çalışmada heyelan araştırmalarında kullanılan jeofizik yöntemler açıklanmışve bazı heyelanlarda gerçekleştirilmiş jeofizik uygulamalardan örnekler sunulmuştur. Bunun yanı sıra, jeolojik prospeksiyonda jeofizik yöntemlerin nasıl kullanılacağı açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeofizik Yöntemler, Heyelan İncelemeleri, Heyelanların İzlenmesi

ABSTRACT: *Landslides are the common type of mass movement causing loss of lifes and properties. Multi-disciplinary and integrated work consisting of geological, geophysical, geotechnic, geodetic and well logs technics is required for investigating, monitoring and determinating the stability of landslides. Many information is needed for calculating landslide stability. Those information can be obtained not only with conventional prospecting ways but also with using geophysica lmethods which shows greatim provements in recent years. Geophysical characterization of landslides can be determinated with seismic refraction, reflection, seismictomography, electrical resistivity, resistivity tomography, self potential, electromagnetic, surface wave and microtremor measurements. Mass movements can also be monitored with the microtremor and accelerometer measurement. Landslide boundaries, the thickness of the landslide mass, the distribution of different materials in a landslide layout and geotechnica lcharacteristics, the presence of ground water distribution and flow directioncan be carried out with these geophysical methods. Geophysical methods used in land slide investigations and examples of geophysic alapplications performed in some landslides will be shownin this study. And also the application of geophysic almethods in geologica lprospecting will be explained.*

Keywords: *Geophysical Methods, Landslide Investigations, Monitoring of Landslides*

1. GİRİŞ

Heyelan terimi topraktaki çok yavaş kaymadan kaya çığına kadar geniş bir yelpazedeki kütle hareketlerini ifade eder. Enyaygın kullanılan heyelan sınıflaması Cruden ve Varnes(1996) tarafından önerilmiştir. Heyelanlar karmaşık bir yapıya sahipolmaları nedeniyle heyelan problemlerinin çözümü kolay değildir. Bu nedenle zeminlerin mekanik değerleri belirli bir hacmi olan numunelerin laboratuvarda değerlendirilmesinin yanında kayaçların geniş ölçekte incelenmesiyle belirlenebilir. Problemin çözümü için jeolojik ve jeomorfolojik haritalama, jeofizik ve jeoteknik uygulamalargereklidir. Heyelanın yapısı, jeoteknik özellikleri ve hidrolojik rejim çalışılmalıdır (Mc Cann ve Foster 1990). Bazı dik yamaçlarda kuyu açmanın zorluğu sondaja ihtiyaç duyan jeoteknik uygulamaları sınırlar.

Heyelan nedeniyle yamacıoluşturan birimlerin jeofizik özelliklerinin değişimi yamacın yapısını belirlemede ve yamaç hareketini izlemede kullanılabilir (Jongman ve Garambois, 2007). Heyelanlarda Bogoslovsky ve Ogilvy (1977)'nin öncü çalışmalarından buyana jeofizik tekniklerin kullanımı giderek artmıştır. Yeraltının 2- ve 3-boyutlu görüntülenmesinde jeofizik tekniklerdeki önemli gelişmelere ve jeofizik uygulamanın giderinin sondaja göre çok daha az olmasına rağmen jeofizik tekniklerin uygulanması yeterli düzeye ulaşamamıştır. Son yıllardaki aletsel ve veri işleme tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak jeofizik yöntemler heyelanları incelemek ve izlemek için ana araç olmuştur. Heyelanların jeofizik yöntemlerle araştırılması konusunda bir inceleme çalışması Jongman ve Garambois (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu bildiride Jongman ve Garambois (2007)'in çalışmaları esas alınarak, Doğu Karadeniz Bölgesinde gerçekleştirilmiş jeofizik yöntemlerle heyelan incelemelerinden de örnekler verilerek heyelanların karekterizasyonu için temel yüzey jeofizik yöntemlerin uygulamasısunulacaktır.

2. JEOFİZİK YÖNTEMLER

Jeofizik; yerin yüzeyinde ve açılmış kuyularda yapılan fiziksel ölçümleri kullanarak yer içinin incelenmesini kapsar. Heyelan araştırmalarında uygulanan jeofizik yöntemlerin prensipleri temel jeofizik yayınlarında bulunabilir (Reynolds,1997; Telfordvd., 1990; Sharma,1997; Keareyvd., 2002). Heyelan araştırmalarında jeofizik yöntemlerin uygulanması ile ilgili olarak farklı heyelan çalışmalarını içeren ilk makale McCannve Forster (1990) tarafından yazılmıştır. Hack (2000)'inve Jongman ve Garambois (2007)'in çalışmalarında yamaç duraylılık analizleri için değişik jeofizik teknikler sunulmuşve tartışılmıştır. Heyelen araştırmalarında jeofizik yöntemlerin temel özelliklerisnek, göreceli olarak hızlı, yamaçlarda konuşlandırılabilir, zeminin veya kayanın iç yapısı hakkında bilgi ve geniş hacimli araştırmalara izin verebilir olmalarıdır. Diğer taraftan, derinlikle azalan çözünürlük, birçok yöntemle elde edilen veri setinin tek çözümlü olmaması, kalibrasyona gereksinim duyulması ve jeolojik ve jeoteknik özelliklerin yerine dolaylı bilgi sunulması bu yöntemlerin dezavantajlarıdır.

Herhangi bir arazi uygulamasından önce jeofizik araştırma iyi tasarlanmalıdır. Uygulanan yöntemin yeterliliği ve problemin çözümü bazı faktörlere bağlıdır. Öncelikle belirgin bir jeofizik zıtlık mevcut olmalıdır. Jeolojik, hidrolojik veya mekanik bir sınırın varlığı (heyelan kütlesinin sınırı)jeofizik özellikler açısından bir değişim göstermeyebilir. İkinci olarak jeofizik yöntemin nüfuz derinliği ve ayrımlılığıdır. Ayrımlılık ve nüfuz derinliği arasında ilişki vardır. Yüksek nüfuz derinliği kötü ayrımlılık verir. Bu sınırlamalar jeofizik araştırmada dikkate alınmalıdır. Güvenilir bir yorum yapılabilmesi için, sağladıkları dolaylı bilgiden dolayı jeofizik tekniklerindaima jeolojik veya jeoteknik veri ile kalibre edilmeleri gerekir. Jeofizik tekniğin performansı önemli düzeyde sinyal/gürültü oranına bağlıdır. Heyelan malzemesi son derece heterojendir ve elektrik akımını vermek güç, sismik dalga sönümü yüksek olabilir. Bir ölçüm tasarlanmadan önce ön arazi testleri her zaman gereklidir. Jeofizik veriler işlendikten sonra fiziksel parametrenin 1-B, 2- B veya 3- B değişimini sağlarlar. 2- B ve 3- B, genellikle bir ters çözüm işlemi ile elde edilen bir jeofiziksel görüntü iken, 1-boyutlu bilgi bir profile karşılık gelir(Sharma, 1997). Son yirmi yılda gelişen jeofizik görüntüleme (tomografi), incelenen alanın sürekli bilgisini sağlama gibi büyük bir avantaja sahiptir. Jeofizik kesitlerin jeolojik veya jeoteknik yorumu sahada tüm veriler göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Jeofizik prospeksiyon, birkaç dereceden düşeye kadar değişen açılı yamaçlar için heyelanların değişik tiplerine uygulanmıştır. Ölçümlerin nüfuz derinliği aralığı 3 m'den 400 m'ye kadar değişir ve ölçümlerin genel olarak iki ana hedefi vardır. Daha çok istenen kayma yüzeyinin, düşey ve yanal sınırlarının belirlenmesi ve ayrıca heyelanın iç yapısının haritalanmasıdır. Jeofizik yöntemler daha çok heyelan araştırmalarında bu amaçlar için kullanılmışlardır. Jeofizik prospeksiyonundiğer bir hedefide elektrik ve elektromanyetik yöntemleri uygulayarak kayan kütle içerisindeki suyu bulmaktır (Carisve Van Asch, 1991; Mauritschvd.,2000).Heyelan araştırmalarında jeofizik yöntemlerin tercihine yönelik temel bir tarif Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı heyelan tipleri ve heyelan ile ilgili özellikler için çeşitli jeofizik yöntemlerin uygunluğu (Jongman ve Garambois 2007'den yararlanılarak düzenlenmiştir.)

Yöntem		Kaya Kayması	Toprak kayması	Hızlı kil kaymaları	Kaya düşmesi	Jeoteknik amaçlar için özellik belirleme	Gömülü tesisler, temeller, borular	Yeraltı suyu/ Nemlilik
Sismik	Yansıma/ Kırılma	+	+	+	?	+	-/(+)	+/-
	Tomografi	+	+	-	-	+	(+)	-
	Pasif sismik	+	+	-	+	+		-
	Yüzey dalgası	?	+	+	-	+		-
Elektromanyetik	Düşük frekans	+	+	-	-	-	+	+
	Yer radarı (GPR)	+	+ (Kil içeriğine bağlı)	-	+	-	+	+
Özdirenç		+	+	+	?	-	(+)	+
Doğal potansiyel (SP)		+	+	-	-	-	-	+
İndüksiyon polarizasyonu (IP)		-	-	+	-	-	-	+
Gravite		?	?	-	+	-	-	-
Manyetik		?	?	-	-	-		-

*+=uygun, (+)=kısmen uygun, -=uygun değil, ?=lokasyona bağlı veya ileri analizler gerekir

2.1. Sismik Yansıma Yöntemi

Yüksek çözünürlüklü sismik yansıma yöntemi, heyelan araştırmalarında nispeten daha az kullanılmıştır(Bruno ve Marillier, 2000; Bichlervd.,2004; Ferruccivd., 2000). Diğer jeofizik tekniklerle karşılaştırıldığında, bu yöntem özellikle engebeli topoğrafya koşullarında jeofon düzeninin tesis edilmesinin güçlüğü, zaman alıcı ve masraflı olması gibi nedenlerle dezavantajlıdır. Ayrıca, sığ sismik yansımanın başarısı iyi sinyal/gürültü oranını gerektirir ve istenilen çözüme ulaşmak için yüksek frekanslı dalgaların kaydına ihtiyaç vardır. Bu koşulların; son derece engebeli ve heterojen ve jeofon yer teması zor olan, dalgaların sönümünün çok olduğu ve saçılma olması nedenleriyle heyelanlarda sağlanmasıgüç olabilir. Sismik yansıma yönteminin esas ilgisi, tabaka içi yapılar veya kayma yüzeyleri gibi heyelan yapısının geometrisini görüntülemektir. Bazı araştırmacılar heyelan incelemelerinde geleneksel P-dalgası sismiği çalışması yürütmüşlerdir. Bichlervd.,(2004), ayrıca S-dalgası yansıma profillerini de kullanmıştır. Ferruccivd.,(2000)tektonizmayamaruz kalmış metamorfik kayalardan oluşan karmaşık bir jeolojik ortamda 400 m derinliğe kadarjeolojik yapıyı görüntülemişler, ancak sığ derinlikte çok düşük çözünürlük nedeniylekaymayüzeyini tespit etmede başarısız olmuşlardır. Bu amaca ulaşmak için küçük jeofon aralığı ile çok katlı veri toplanması gerekir.

2.2. Sismik Kırılma Yöntemi

Bu yöntem, sismik ilk varış sinyallerinin yorumuna dayanır ve hızın derinlikle arttığını varsaymakta (Kearey vd.,2002) olup, mühendislik jeolojisinde ana kaya derinliğini belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Heyelan kütlesinin duraylı yere göre makaslama ve sıkışma dalgası hızları daha küçük olduğu için, yöntemin heyelan incelemelerinde uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Yöntem daha çok heyelan kütlesinin iç yapısının ve ana kaya yüzeyinin topoğrafyasının belirlenmesinde kullanılmıştır. Mc Cann ve Forster (1990) heyelan altındaki sağlam kayayı belirlemek için sismik kırılma yönteminin kullanımını gösteren birkaç arazi çalışması yayınlamışlardır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, seyahat zamanı verileri gecikme zamanı yöntemleri kullanılarak yorumlanmıştır. Heyelanlarda ondüleli kırıcı yüzeyi haritalamayı mümkün kılan artı-eksi tekniği veya genelleştirilmiş karşılıklı yöntem (GRM) gibi uygulamalar geliştirilmiştir (Kearneyvd.,2002). Gladevd.,(2005) GRM yöntemini kullanarak Rheinhessen (Almanya) bölgesinde Üst Oligosen yaşlı çok sığ (1-3 m derinlik) lös (370 m/sn) ve marnlı ve kalkerli sedimanlar (1100 m/sn) arasındaki kayma yüzeylerini

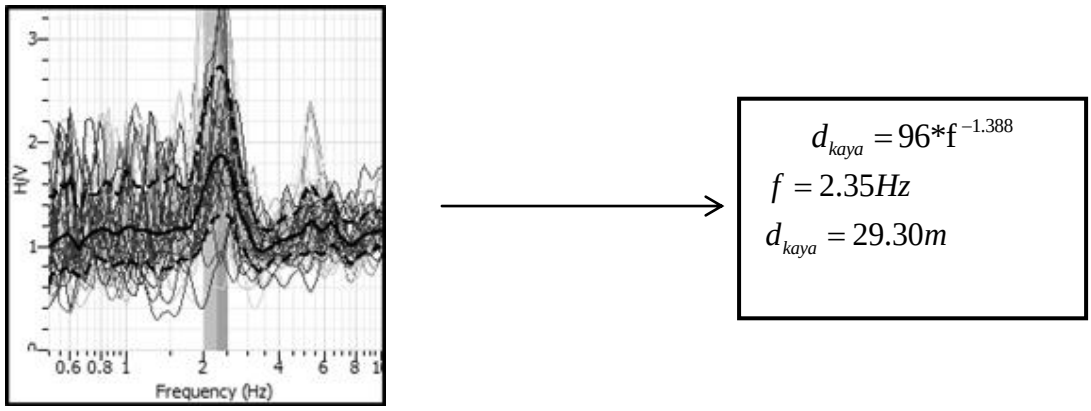
belirlemişlerdir. Caris ve Van Asch (1991) küçük bir heyelan olan siyah marn heyelanında (Fransız Alpleri) artı-eksi tekniği ile derinliği 4-9 m arasında değişen heyelan kütlesi (350 m/sn) ve ana kaya (2800 m/sn) arasında güçlü bir hız aykırılığı belirlemişlerdir.

2.3. Sismik Tomografi

Sismik tomografi tekniği, yerdeki P-dalgası hız dağılımı görüntüsünü elde etmek için ilk varış zamanlarının tersini almaktan ibarettir. Klasik sismik kırılma ile karşılaştırıldığında, çok daha fazla seyahat-zamanı verisini, dolayısıyla arazi çalışmasını gerektirir. Ancak, yanal ve düşey yönlerde sismik hız değişimlerinin tespit edilmesini sağlar. Teknik, heyelan incelemesi için, kaya koşullarında kullanılmış (Méricvd.,2005; Jongmansvd., 2000; Gelisli vd., 2011) ve duraysız heyelan kütlesinin P-dalga hızı değerlerinde önemli bir azalma belirlenmiştir. Mericvd.,(2005)tarafından mika şistleri etkileyen büyük "SechilienneHeyelanı"nın (Fransa Alpleri) batı sınırı boyunca 300 m uzunluğunda bir sismik profil ölçüsü alınmıştır. Elde edilen hız dağılımında 500 m/sn Vp değerlerine sahip duraysız kütlenin altında, 25 m'de 4000 m/sn sismik hıza sahip ana kaya belirlenmiştir. Aynı profilde doğuya doğru 4000 m/sn'den2000 m/sn'yedüşen önemli bir yanal hız değişimi de belirlenmiştir.

2.4. Mikrotremor Yöntemi

Sismik gürültü ölçümlerinin, örtü tabakasının geometrisi ve enine dalga hız değerlerinin tespit edilmesini sağladığı için mühendislik jeofiziğinde kullanımı giderek artmaktadır (Bard, 1999). Tek istasyon yöntemi mikrotremor kayıtlarının spektrumlarının yatay bileşeninin düşey bileşene oranından ibarettir ve yumuşak tabakanın rezonans frekansının hesaplanmasına imkan verir (Nakamura, 1989). Kayma yüzeyleri makaslama dalgası hız aykırılıkları oluşturabilir, yöntem teorik olarak doğrudan bu yüzeyleri algılayabilir. Yöntem, güney Apennines'de(Gallipolivd.,2000) ve Fransız Alpleri'nde (Mericvd., 2007) killi veya marnlı arazilerde oluşmuş heyelanlardaH/V eğrilerinden temel frekans ve kayma yüzeyinin derinliğini belirlemek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar inceleme alanında gerçekleştirilmiş olan elektrik ölçümler, jeoteknik sondaj veya kuyu ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Havzulu (Artvin) heyelanında bir noktada alınan mikrotremor kaydından elde edilen baskın frekans ve ampirik yolla hesaplanan heyelan kayma yüzeyi derinliğiŞekil 1'de görülmektedir. Sonuçlar sondaj verileri ile korele edilmiş ve uyum olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Havuzlu (Artvin) heyelanında bir noktada alınan mikrotremor verisinden hesaplanan H/V oranı (Yatay spektrum / Düşey spektrum) ve ana kaya derinliği.

2.5. Yüzey Dalgası Yöntemi

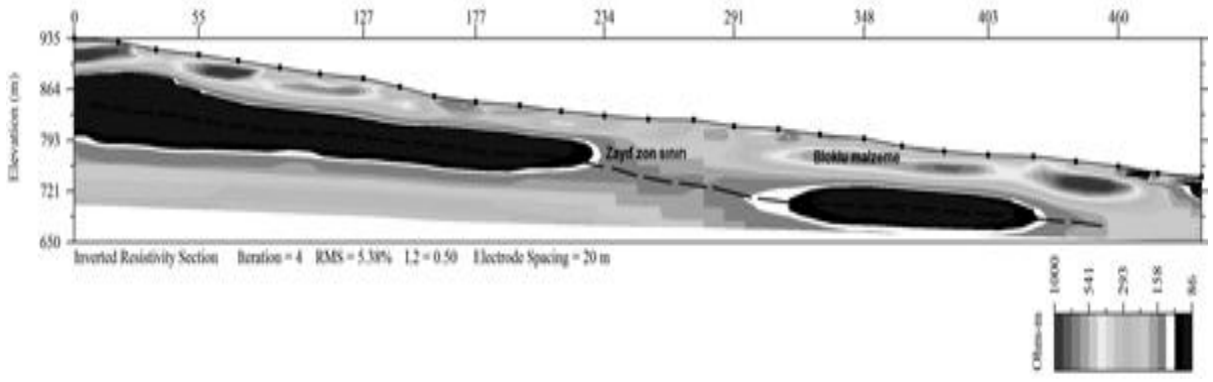
Duraysızbölgede makaslama dayanımının azalması nedeniyle makaslama dalgası hızında (V_s) düşüşoluşabilir. Derinlikle V_s değişimini birkaç yöntem ile göstermek mümkündür.

Son yıllarda yeraltı incelemelerinde derinliğe karşı makaslama dalgası hız değişimini elde etmek için mikrotremor ve SH kırılma veya yansıma yöntemleri yanında, yüzey dalgalarının analizi (SW) yöntemi giderek artan bir kullanıma sahiptir (SoccoveJongmans, 2004). SW yönteminin avantajı, veri toplama aşamasında yeterli kayıt uzunluğu seçilirse P-dalgası kırılma veya yansıma verileriyle birlikte kaydedilir olmasıdır. Şimdiye kadar, heyelanlarda sadece bir kaç 1-boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Mericvd.,(2007)iki heyelanda kaydedilen yüzey dalgalarının dispersiyon eğrilerini çıkarmışlardır. Her iki heyelanda da sonuçlar diğer jeofizik veriler ve sondaj ölçümleri ile tutarlı olmuştur.

2.6. Elektrik Özdirenç Yöntemi

Elektrik özdirenç yöntemi, sığ aramalarda en çok kullanılan jeofizik yöntemlerden birisidir (Telfordvd.,1990; Reynolds, 1997). Yöntem; yere bir çift elektrot ile direk doğru akım verilmesi ve diğer bir elektrot çifti arasındaki elektrik potansiyeli ölçülmesi esasına dayanır ve üç şekilde kullanılabilir: (1) düşey elektrik sondajı (DES);bu uygulamada elektrotlar orta noktadan hareket ettirilir; (2) elektrik özdirenç profili; burada sabit elektrot aralığı ile dizin bir doğrultu boyunca hareket ettirilir ve (3) elektrik tomografi; burada çok sayıda elektrot çiftleri kullanılır. DES uygulaması ve yorumu hızlı ve kolay olmakla birlikte, bazı sorunları da vardır. Birincisi; ölçümler derinden bilgi almak için büyük açılımlarla yapılmasına rağmen, özdirencin düşey değişimleri 1-boyutlu olarak göz önüne alınmaktadır. İkincisi ise, çok çözümlülüktür.

Heyelanlar genellikle heterojen malzemeiçerdiklerinden, fiziksel parametreleri yanal değişim sergiler ve DESverilerinin yorumlanması güç hale gelir. Elektrik tomografi elektrik özdirencin 2-boyutlu (veya 3-boyutlu) görüntüsünü sağladığı için son yıllarda standart bir jeofizik görüntüleme tekniği olarak ortaya çıkmıştır. Ancak, başarı için veri toplama parametrelerinin seçimine dikkat edilmelidir. Ayrıca, elde edilen görüntüler karmaşık olabilir ve yorum bazen sayısal modelleme kullanılarak kontrol edilmelidir. Elektrik özdirenç değerleri geniş bir aralıkta değişim gösterirler (Telfordvd.,1990) ve özdirenç; malzemenin doğasına (özellikle kil yüzdesi), su içeriğine, ayrışma, parçalanma gibi faktörlere duyarlıdır. Bu yöntem heyelan araştırmalarında en çok uygulanan yöntemdir. Heyelan araştırmalarında özdirenç yöntemlerinin uygulanmasının ana amacı kayma yüzeyinin konumunun belirlenmesidir. Pek çok araştırmacıbu yöntemle bunu başardıklarını ifade etmişlerdir. Araştırmalarda elektrik yöntemle, kireçtaşı üzerinde şeyl (Batayneh ve Al Diabat, 2002), konsolide kil üzerinde arenit (Havenithvd.,2000) veya kum üzerinde kil (Wisenvd., 2003; Demoulinvd., 2003)olması durumu gibi kuvvetli zıtlık olduğunda kayma yüzeyi belirlenebilmiştir. Şekil 2'de Havuzlu (Artvin) heyelanında bir profil boyunca alınan 2-boyutlu verilerin ters çözümünden elde edilen yeraltı elektrik özdirenç dağılımı görülmektedir. Şekilde yamaçtaki düşük özdirenç değerine sahip zayıf ve su içeriği yüksek zonlar açıkça görülmektedir.



Şekil 2.Havuzlu heyelanının yamacında eğim yönünde alınmış bir profile ait 2-boyutlu yorumlanmış yeraltı özdirenç kesiti.

2.7. Doğal Potansiyel (SP) Yöntemi

Herhangi bir heyelan kütlesinde bulunan yeraltısuyu ve ilgili akışların şev stabilitesindeönemli bir rol oynadığıçok iyi bilinen hususlardan biridir. Doğal potansiyel yönteminde, yapay akım kullanılmadan yerin kendi doğal potansiyeli ölçülmektedir. Yapılan araştırmalar, yeraltındaki bir su hareketinin doğal bir voltaj meydana getirdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle SP yöntemi baraj yapılarındaki sızıntı noktalarının belirlenmesi ve heyelanlarda yeraltısuyu hareketinin varlığını belirleme araştırmalarında kullanılmaktadır(Patella, 1997; Revilvd.,1999).

2.8. Elektromanyetik Yöntemler

Elektromanyetik yöntemler (EM), bir kaynaktan yayılan değişken elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin oluşturduğu elektromanyetik dalgalara yer tabakalarının verdiği tepkiye ölçmeye dayanır.EM ölçümleri, genellikle iki yatay lop ile frekans ortamında gerçekleştirilir. Tek bir görünür elektrik özdirenç değeriveren yöntem, hızlı profilleme veya haritalamaya imkan verir (Reynolds, 1997). Elektromanyetik yöntemler son zamanlarda heyelan araştırmalarında özellikle duraysız kütlenin geometrik sınırlarını belirlemek için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır(Bruno veMarillier, 2000; Mauritsh vd.,2000). Yöntemin penetrasyon derinliği bobin ara uzaklığına bağlıdır ve birkaç metreden onlarca metreye kadar değişir. Kaya heyelanlarda,Bruno veMarillier (2000) ve Mauritsch vd.,(2000)farklı modlar ve bobin aralıkları için topladıkları EM verilerini iki tabakalı model (duraylı tabaka üzerindeki hareketli kütle) için yorumlamışlarve elde ettikleri derinliklerle sismik sonuçlardan elde edilen kaya derinlikleriarasında nispeten iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Pek çok araştırmacı(Bruno ve Marillier, 2000; Mauritsh vd., 2000) heyelan incelemelerindeEM yöntemlerin diğer jeofizik teknikleri ile kombine edilmesinin daha uygun olduğunu vurgulamışlardır.

2.9. Yer Radarı Yöntemi

Bu yöntemde, radarın (verici anten) ürettiği yüksek frekanslı bir EM enerji, kısa zaman dilimleriyle yer içerisine gönderilir. Uygulanan alanın frekansı 10 MHz-2GHz arasındadır ve yayılımı yerin elektrik özelliklerine bağlıdır. Jeolojik birimlerin su içerikleri, kayacın kırık ve çatlak yapısı elektrik özelliğini değiştirdiğinden, yere gönderilen sinyalin bir kısmı geri yansır. Yer radarı verisi kullanarak yayınlanan arazi çalışması sayısı son yıllarda aşırı derecede artış göstermiştir. Ölçüm almanın kolay olması ve yüksek ayrımlılık sağlaması yönteme duyulan ilginin başlıca nedenlerindendir. Yöntem; jeolojik, jeomorfolojik, çevre, jeoteknik ve hidrolojik araştırmalarda kullanılmaktadır. Yer radarı sinyalinin çok iletken formasyonlarda çabuk sönümlenmesi, kırıklar, blok malzemeler gibi heterojenitelerinsaçınımyaratması ile penetrasyon derinliğinin azalması gibi nedenler yönteminheyelan incelemelerinde kullanımındaki başlıca sınırlamalardır.Yer radarı yöntemi özellikle kayma düzleminin belirlenmesinde başarı ile uygulanmaktadır. Barnhardt ve Kayen (2000)Anchorage (Alaska)'da depremin tetiklediği iki büyük heyelanı incelemek için yer radarıyöntemini kullanmışlardır. Jeanninvd.,(2006)kireçtaşlarının iç kısımdaki süreksizlikleri görüntülemek için değişik konfigürasyonlarla yer radarı ölçüleri gerçekleştirmişlerve çalışmada kullanılan 100 MHz antenle 20 m penetrasyon ve yüksek ayrımlılıkla birçok kırık gözlemişlerdir.

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Heyelanlar; jeolojik, jeoteknik, jeomorfolojik ve hidrojeolojik özelliklerinin geniş bir yelpazede değişimini gösteren karmaşık yapılardır. Bu tür heterojen yapıların incelenmesi yakın yüzey jeofiziği için en zorlu temalardan biridir. 2- ve 3-boyutlu jeofizik tekniklerin gelişimi, heyelan kütlesi içerisindeki yeraltısuyu akışlarını belirlemek, heyelan hacmini değerlendirmek, heyelan malzemesinin fiziksel özelliklerini karakterize etmek için giderek artan bir uygulama alanı bulmaktadır. Heyelan incelemelerinde bir jeofizik araştırmanın tasarımı için hala tartışılan birçok soru olup, tek bir strateji olmadığı anlaşılmaktadır.

Bu gibi heterojen yapıların araştırılmasında güvenilir sonuçlar elde etmek için farklı jeofizik teknikler birlikte kullanılmalı ve tekniklerin seçimi açıkça fiziksel parametrelerin beklenen aykırılıkları tarafından yönlendirilmelidir. Heyelanlar için jeofizik tekniklerin uygulanmasındakien büyük güçlük, ölçülen jeofizik parametrelerle belirlenmesi istenen jeoteknik ve hidrojeolojik özellikler arasındaki karmaşık ilişkidir. Bu durum, mühendislik özelliklerinin doğrudan yorumunu önlemektedir.

Heyelanlardan etkilenen alanların genellikle litolojik ve hidrojeolojik koşulları mekansal ve zamansal değişiklikler gösterirler. 2- ve 3-boyutlu jeofizik görüntüleme tekniklerinin gelişimiyle heyelan alanlarının karmaşık yapısını araştırmak için büyük bir ilerleme olmuştur. Diğer bir konu da heyelan izleme sisteminin bir parçası olarak jeofizik alıcılarınpotansiyel heyelan alanlarına yerleştirilerek duyulamaz frekanslı gürültülerin kaydedilmesi olacaktır. Bu tür jeofizik araştırmalar son zamanlarda bazı heyelanlarda gerçekleştirilmiştir (Supper veRomer, 2003; Lebourgvd.,2005). Ancak, jeofizik veri elde etmek için sonuçlar mutlaka jeolojik ve jeoteknik veriyle kalibre edilmelidir.

4. KAYNAKLAR

Bard P.Y.,1999. Microtremor measurements: a toolfor site effectestimation?In: Proc. 2nd Int. Symp. on theEffects of Surface Geologyon Seismic Motion, Yokohama, Japan. Balkema,Rotterdam, 3, 1251-1279.

Barnhardt W.A.,Kayen R.E.,2000. Radar structure of earthquake induced coastal landslides in Anchorage, Alaska. Environmantal Geosciences, 7, 38-45.

Batayneh A.T., Al Diabat A.A.,2002. Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman-Dead Sera Highway, Jordan. Environmental Geology,42, 399-403.

Bichler A.,Bobrowsky P., Best M., Douma M., Hunter J., Calvert T., Burns R., 2004.Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forkslandslide. Landslides,1 (1), 29-40.

BogoslovskyV.A.,Ogilvy A.A.,1977. Geophysical methods for the investigation of landslides. Geophysics,42, 562-571.

Bruno F.,Marillier F., 2000. Test of high-resolution seismic reflection and othe rgeophysical techniques on theBoup landslide in the SwissAlps. Survey inGeophysics,21, 333-348.

Caris J.P.T.,VanAsch W.J.,1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. Engineering Geology,31, 249-276.

Cruden D.M.,Varnes D.J.,1996. Landslidetypesandprocesses. In:Landslides investigation and mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy of Sciences, Washington DC., USA, 36-75.

Demoulin A.,Pissart A., Schroeder C., 2003. On theorigin of late Quaternary palaeolandslidesin the Liège (E Belgium) area. International Journal of Earth Science (GeolRundsch),92, 795-805.

Ferrucci F.,Amelio M., SorrisoV., Tansi C., 2000. Seismic prospecting of a slope affected by deep-seatedgravitational slope deformation: the Lago Sackung, Calabria, Italy. Engineering Geology,57, 53-64.

Gallipoli M.,Lapenna V., LorenzoP., Muccarelli M., PEerrone A., PiscitelliS., Sdao F.,2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in thestudy of a landslide in southernItaly.European Journal of Environmental and Engineering Geophysics,4, 117-128.

Gelisli K., Şeren A., Babacan A.E., Çatakli A., Ersoy H., Kandemir R., 2011. The Sumela Monasteryslope in Maçka, Trabzon, Northeast Turkey: rockmass properties and stability assessment. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 577-583.

Glade T.,Stark P., Dikau R.,2005. Determination of potential landslide shear plane depthusing seismicrefraction. A casestudy inrheinhessen, Germany. Bulletion Engineering Geology Environment,64, 151-158.

Hack R., 2000. Geophysics for slopestability. Survey inGeophysics,21,423-448.

Havenith H.B.,Jongmans D., Abdrakmatov K., Trefois P., Delvaux D., Torgoev A., 2000. Geophysical investigations on seismically induced surface effects, casestudy of a landslide in the Suusamyrvalley, Kyrgyzstan.Survey inGeophysics,21, 349-369.

Jeannin M.,Garambois S., Gregoria S., JongmansD.,2006. Multiconfiguration GPR measurements for geometrical fracture characterization in limestonecliffs (Alps). Geophysics,71,885-892.

JongmansD.,HemroulleP., Demanet D., RenardyF., Vanbrabant Y.,2000. Application of 2D electrical and seismictomography techniques for investigating landslides. European Journal Environment Engineering Geophysics,5, 75-89.

Jongmans D.,Garambois S., 2007. Geophysical investigation of landslides: a review,Bulletion De La Societe Geologique De France, 178(2), 101-112.

Kearey P.Brooks, M.,Hill I.,2002. An İntroductionto Geophysical Exploration, 3rd Edition. Blackwell, Oxford, 262 p.

Lebourg T.,Binet S., Tric E., Jomard H., ElBedoui S.,2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4Devolution of thewate rpressure on part of a deep-seated landslide.Terra Nova,17, 399-406.

Mauritsch H.J.,Seiberl W., Arndt R., Romer A., Sneiderbauer K., Sendlhofer G.P.,2000. Geophysical investigations of large landslides in the Carnicregion of southern Austria. Engineering Geology,56, 373–388.

McCann D.M.,Forster A.,1990. Reconnaissancegeo physical methodsin landslide investigations. Engineering Geology,29, 59–78.

Meric O.,Garambois S., Jongmans D., Wathelet M., Chatelain J.L., Vengeon J.M., 2005. Application of geophysical methods for the investigation of the large gravitational mass movement of Séchilienne, France. Canadian Geotechnical Journal,42, 1105-1115.

Meric O.,Garambois S., Malet J.P, Cadet H., Gueguen P., JongmansD., 2007. Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization. Bulletion De La Societe Geologique De France,178(2), 137-148.

Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. Quar. Report.Railway. Tech. Res. Institute,30, 25-33.

Patella D.,1997. Introduction to ground surface self-potentialtomography.Geophysical Prospecting,45, 653–681.

Revil A.,Pezard P., Glover E.W.J., 1999. Streaming potential in porousmedia. 1, Theory of the zetapotential. Journal of Geophysical Research,104(20), 21-31.

Reynolds J.M., 1997. An İntroduction to Appliedand Environmental Geophysics. Wiley&Sons, Chichester, 806 p.

Sharma P.V.,1997. Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press, New York, 475 p.

Socco V.,Jongmans D., 2004. Special issue on seismic surface waves.Near Surface Geophysics2, 163-258.

Supper R. andRömer A., 2003. New achievements in developing ahigh-speed geoelectrical monitoring system for landslide monitoring.In: Proc. 9th Meeting Env. Eng. Geophys.,Prague, Czech Republic. EAGE Publications, EEGS, Houten, Paper O-004, 6 p.

Telford W.M.,Geldart L.P.,Sherif R.E., Keys D.A., 1990. Appliedgeophysics. Cambridge University Press, Cambridge.

Wisen R.,Christiansen A.V.,Auken E., Dahlin T.,2003. Applicationof 2D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of CVES resistivity data in a slopestability investigation.In: Proc. 9th Meeting Env. Eng. Geophys.,Prague, Czech Republic.EAGE Publications, EEGS, Houten, Paper O-002.

Depremlerle İlgili Zemin Davranışları

Bayraklı-İzmir Yöresindeki Zeminlerin Statik ve Dinamik Koşullar Altında Gerilme-Deformasyon Davranışlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi

Investigation of Stress-Deformation Behaviour of the Soils in Bayraklı-İzmir Under Static and Dynamic Conditions Using Finite Element Method

A.T. Arslan[1,*], M. Akgün[1], M. Y. Koca[2], C. Atalar[3], Ö. C. Özdağ[4]

[1] Dokuz Eylül Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir
[2] Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir
[3] Yakın Doğu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Lefkoşa K.K.T.C.
[4] Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü, İzmir
*(*ahmet.arslan@deu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada, İzmir Körfezi doğusunda yer alan ve Yeni Kent Merkezi olarak tanımlanan alandaki alüvyonal zemini temsil eden kuzey-güney doğrultulu kesit üzerinde, gerilme–makaslama deformasyonları, gerilme–şekil değiştirme özellikleri, buna bağlı olarak gelişen yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmeler bilgisayar destekli sayısal çözümleme yöntemleri kullanılarak statik ve dinamik koşullar altında analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerde Rocscience Phase^2 (V 9.006) programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerde kullanılan model, jeofizik çalışmalar, sığ ve derin zemin sondajlarının ortak değerlendirilmesi sonucunda elde edilen verilere göre oluşturulmuştur. Depremsiz durumda yapılan analizlerde, makaslama deformasyonları dış yüklerin etki ettiği zonlarda yükün şiddeti ve derinliğe bağlı olarak dağılım gösterirken, sismik yüklemelerin de hesaplamalara dahil edilmesiyle makaslama deformasyonlarındaki dağılımlar jeolojik yapı ve sismik etkiye bağlı olarak dağılım göstermekte, jeolojik yapı, tabaka kalınlıkları, tabakaların elastik ve dinamik özellikleri de deformasyonların dağılımında etkin rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Makaslama Deformasyonu, Yer Değiştirme, Sismik Hız

ABSTRACT: *In this study, computer-aided analyses under static and dynamic conditions using numerical analyse methods were performed where İzmir Bay and surrounding area which is defined as alluvial soil. Analyse was made by Rocscience Phase2 (V 9.006) software. The model which used in the analysis were obtained geophysical studies and shallow-deep soil boring data using a common. In the analyzes which were made in non-earthquake case, shear deformation of external load impacts have the zones in charge of showing the distribution depending on the severity and depth distributions of shear deformation by the inclusion of the calculations in the seismic loading in the range depending on the geological and seismic effects, geological structure, layer thickness, elastic layers and dynamics properties also play an important role in the distribution of deformation.*

Keywords: *Finite Element Method, Shear Deformation, Displacement, Seismic Velocity*

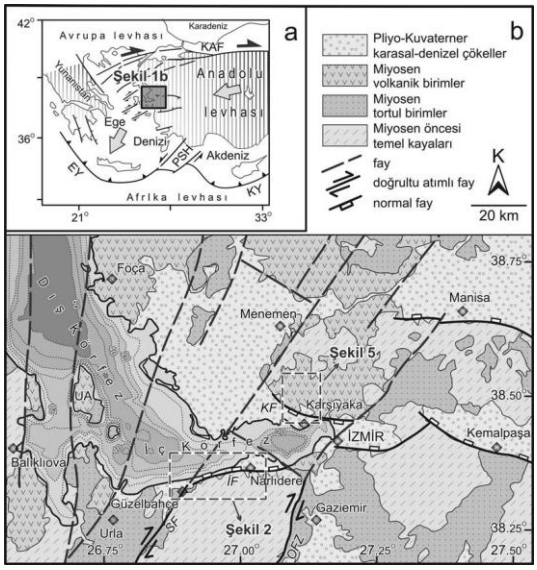
1. GİRİŞ

Zeminlerin statik ve dinamik yüklemeler altında diğer inşaat mühendisliği malzemelerinden oldukça farklı davranış gösteren malzemeler olmaları ve zeminlerin jeoteknik özelliklerinin bölge içinde farklılıklar göstermesi nedeniyle yerleşime açılacak yeni alanların yerleşime uygunluk bakımından değerlendirilmesi veya yerleşim bölgelerinin depremden nasıl etkileneceğinin belirlenmesi için bu bölgelere ait jeolojik tanımlamanın yapılması ve yerel zemin koşullarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Yerleşime uygunluk açısından değerlendirilecek bir bölgedeki yerel zemin koşullarının incelenmesindeki amaç, belirli büyüklük, süre ve frekans içeriğine sahip deprem etkilerine karşı yerel zeminin göstereceği dinamik tepkinin belirlenmesidir. Yerel zemin özelliklerinin araştırılmasında her proje sahası için laboratuvarda ve arazide deneysel çalışmalar yapılarak, bu

çalışmalar sırasında arazide geçerli olacak yükleme koşullarının dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle depremler sırasında yerel zemin koşullarının oluşan yapısal hasar üzerinde oldukça önemli etkileri olduğu yakın zamanlarda meydana gelmiş şiddetli depremlerde yapılan aletsel ölçümlerle ve gözlenen yapısal hasarlarla belirlenmiştir (Tohumcu vd., 2003).

2. İZMİR KÖRFEZİ

Gediz ve Büyük Menderes grabenlerinin batısında yer alan İzmir Körfezi, sığ sismik kesitlerden elde edilen verilere göre, iç ve dış körfez şeklinde iki morfolojik çukurluk olarak tanımlanır (Aksu vd., 1983, 1987, 1990). Araştırmacılara göre İzmir Körfezi, Yamanlar ve Seferihisar yükseltisi ile sınırlı olan yaklaşık 60 km uzunluğundaki D-B uzanımlı iç körfez ve kuzeydoğuda Foça-Menemen, güneybatıda Karaburun yükseltileri ile sınırlı olan yaklaşık 90 km uzunluğundaki KB-GD uzanımlı dış körfezden oluşur (Sözbilir vd., 2008) (Şekil 1).



Şekil 1. İzmir Körfezi ve çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Kaya, 1979; MTA, 2002) (Körfez içindeki noktalı çizgiler körfezin batimetri değerlerini göstermektedir (Sayın vd., 2006; Sözbilir vd., 2008)).

Bölgedeki güncel morfolojiyi denetleyen ana yapısal hatlar, ilk kez Kaya (1979, 1981, 1982) tarafından K-G /KD GB normal ve oblik faylar ile bu fay blokları arasındaki D-B uzanımlı normal faylar olarak tanımlanmıştır. MTA'nın 2002 yılında hazırladığı 1/500.000 ölçekli jeoloji haritası incelendiğinde, İzmir Körfezi ve çevresinde birçok doğrultuda yapısal süreksizlikler mevcuttur. Bu süreksizliklerin bir kısmı daha sonra Emre vd. (2005) tarafından yayınlanan MTA raporu ile daha detaylı tanımlanarak aktiviteleri tartışılmıştır. Ocakoğlu vd. (2004, 2005 ve 2006) Körfezi ve körfezi çevreleyen deniz alanından saptadıkları 975 m uzunluğundaki tek ve çok kanallı sismik yansıma verilerini bölgenin batimetri, topoğrafya ve sismisite verileri ile ilişkilendirerek bölgedeki su altı faylarını yorumlamışlardır. Araştırmacılar, elde ettikleri sismik profillerde K-G' den KD-GB' ye değişen doğrultularda ters bileşenli doğrultu atımlı faylar ve D-B uzanımlı normal faylar tanımlamıştır. Araştırmacılara göre, körfezin KB-GD gidişli dış körfez kısmı Karaburun ters fayı ile sınırlanırken, D-B uzanan iç körfez kısmını güneyde İzmir normal fayı sınırlıdır (Sözbilir vd., 2008).

3. JEOFİZİK ÇALIŞMALAR

İzmir Metropol alanı sınırları içerisinde yer alan ve Yeni Kent Merkezi olarak tanımlanan alanının dinamik özelliklerini ortaya koymak amacı ile hazırlanan model, jeofizik çalışmalar (kuyu içi sismik, mikrotremor array ve nokta ölçümleri ile MASW ve mikrogravite çalışmaları) ve derin amaçlı

yapılmış (250 m) zemin sondajlarının ortak değerlendirilmesi sonucunda hazırlanmıştır. MASW çalışmalarında Geometrics Geode marka 24 kanallı sismometre cihazı; mikrotremor çalışmalarında ise CMG-6TD hızölçer kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen verilere göre; V_{P1}: 345 m/sn; V_{S1}: 200 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, tabaka kalınlığı 45 – 150 m aralığında değişen 1. tabaka; V_{P2}: 778 m/sn; V_{S2}: 450 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, tabaka kalınlığı 14 – 37 m aralığında değişen 2. tabaka; V_{P3}: 475 m/sn; V_{S3}:275 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, tabaka kalınlığı 75 – 370 m aralığında değişen 3. tabaka; V_{P4}: 953 m/sn; V_{S4}: 550 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, tabaka kalınlığı 60 – 90 m aralığında değişen 4. tabaka; V_{P5}: 1558 m/sn; V_{S5}: 900 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, 5. tabaka; V_{P6}: 2165 m/sn; V_{S6}: 1250 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, 6. tabaka; V_{P7}: 6055 m/sn; V_{S7}: 3500 m/sn ortalama hız değerlerine sahip, 7. tabaka tespit edilmiştir. Bu hız değerleri ve çalışma alanında daha önceden yapılan jeoteknik amaçlı sondajlar dikkate alınarak 1., 2. ve 3. tabakalar denizel kökenli alüvyonal zemin tabakaları, 4. tabaka volkanitlerden oluşan birim, 5. ve 6. tabakalar içerisinde tektaş konumlu kireçtaşları içeren kumtaşı şeyl ardalanmalı filişten oluşan Bornova karmaşığı, 7. tabaka ise şistler ve kristalize kireçtaşlarından oluşan Menderes Masifi olarak değerlendirilmiştir. Sismik hızların ampirik bağıntılarda kullanılması ile bulunan dinamik zemin parametreleri, indeks ve mekanik özellikler toplu olarak Çizelge 1 ve 2'de, Türkiye Deprem Yönetmeliği ve NEHRP'e (National Earthquake Hazard Reduction Programme) göre sınıflandırılması ise Çizelge 3'de sunulmuştur. Ayrıca analizler sırasında kullanılacak rayleigh sönüm faktörleri Q=0.1V olacak şekilde tanımlanmıştır (Yalçınkaya, 2004).

NEHRP zemin sınıflama kriterlerine göre, kalınlığı 45 – 150 m aralığında değişen 1. Tabaka E-D; kalınlığı 14 – 37 m aralığında değişen 2. Tabaka C; kalınlığı 75 – 370 m aralığında değişen 3. Tabaka D; kalınlığı 60 – 90 m aralığında değişen 4. Tabaka; kalınlığı ortalama 200 m olarak kabul edilen 5. Tabaka ve ortalama kalınlığı 600 m olarak kabul edilen 6. Tabaka B ve tabaka kalınlığı tam olarak ölçülemeyen 7. Tabaka ise A olarak tanımlanmıştır (Çizelge 1). İnceleme alanındaki zeminler, Türkiye Deprem Yönetmeliği zemin grubu, yerel zemin sınıfları, etkin yer ivmesi katsayısı ve spektrum karakteristik periyotlarına göre; 1. Tabaka D grubu, Z_4 sınıfı, A_0: 0.40, T_A: 0.20 sn, T_B: 0.90 sn; 2.,3. Ve 4. Tabaka, C grubu, Z_4 sınıfı, A_0: 0.40, T_A: 0.20 sn, T_B: 0.90 sn; 5. Tabaka B grubu, Z_2 sınıfı, A_0: 0.40, T_A: 0.15 sn, T_B: 0.40 sn; 6. Ve 7. Tabaka, A grubu, Z_1 sınıfı, A_0: 0.40, T_A: 0.10 sn, T_B: 0.30 sn olarak sınıflandırılmıştır.

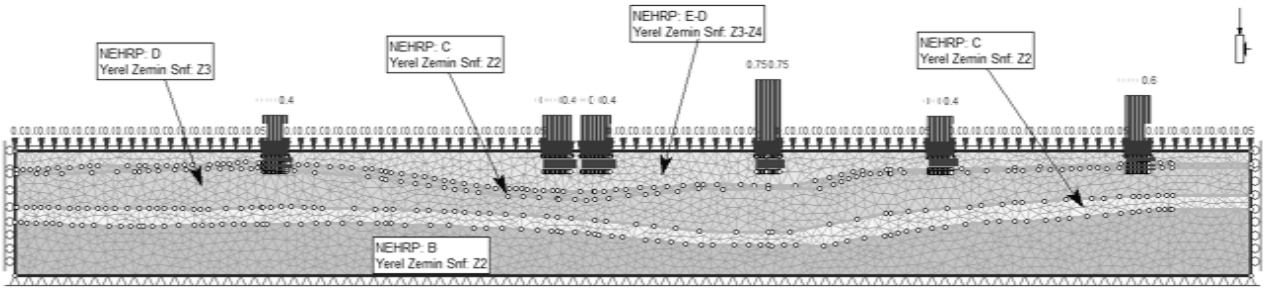
4. SAYISAL MODELLEMELER

Depremler gibi tekrarlı yüklemeler altında kalan zeminlerin davranışlarının incelenmesinde, zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi önemli bir konudur. Zeminlerin drenajsız durumda tekrarlı yükler altında dayanım kaybı, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşma, kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyonlar ve göçme durumlarının incelenmesi gereklidir. Gerilme–şekil değiştirme özellikleri olarak, genellikle dinamik kayma modülü, sönüm oranı değerleri ve bunların birim şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimlerinin bulunması; dayanım özellikleri olarak da göçmeye veya büyük şekil değiştirmelere neden olan makaslama gerilmesi genliği ve çevrim sayılarının saptanması gereklidir. Zeminlerin dinamik koşullar altında davranış özellikleri, zeminde oluşan deformasyonların mertebesi ile ilişkilidir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarındaki şekil değiştirme seviyelerinde, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Daha büyük şekil değiştirme seviyelerinde ise uygulanan yük altında zemindeki dayanım kayıpları ve plastik şekil değiştirme özellikleri önem kazanmaktadır. Zeminlerin dinamik davranışının şekil değiştirme aralığına göre farklılık gösterdiği ve dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesinde ve analizinde olası şekil değiştirme seviyesinin belirleyici bir rol oynadığı bilinmektedir. Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için, teorik olarak yaklaşık 10^{-5}'den küçük olması gerektiği kabul edilmektedir. Bu şekil değiştirme seviyelerinde ve elastik sınırlar içerisinde, dinamik kayma modülünün maksimum değerinde ve sabit olduğu kabul edilebilir. Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak 10^{-3} civarında olması durumunda, zeminin davranışları elasto-plastik bir hal alır ve dinamik makaslama modülü şekil değiştirmeler arttıkça azalır. Kayma şekil değiştirmelerinin 10^{-2} den büyük olması durumunda zemin özellikleri, şekil değiştirmeler arttıkça değişmeye ve kalıcı şekil değiştirmeler oluşmaya başlar.

Phase^2 programında hazırlanan iki boyutlu büyük ölçekli sonlu eleman ağ sisteminde 4446 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Sayısal modellemelerde kullanılan zemin ve kaya birimlerine ait indeks, mekanik ve dinamik özellikler Çizelge 1 ve Çizelge 2' de toplu olarak sunulmuştur. Phase^2 programı kullanılarak yapılan tüm modelleme çalışmaları bir olasılık değerlendirmesidir ve öngörü niteliği taşımaktadır.

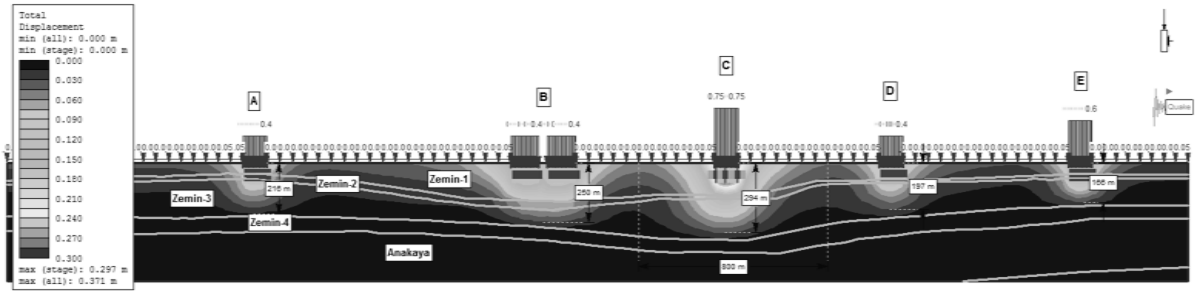
4.1. Sayısal Modellemeler

Phase^2 programı ile statik koşullarda yapılan analizlerde, özellikle gerilme dağılımları, düşey yer değiştirmeler, toplam yer değiştirmeler ve maksimum makaslama deformasyonları üzerinde durulmuştur. Dinamik koşullarda yapılan analizlerde ise girdi parametresi olarak İzmir bölgesinde gerçekleşmiş bir depremin ivme zaman kaydı kullanılarak (Şekil 8) zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Phase^2 programında kullanılan model, Yeni Kent Merkezi olarak tanımlanan alanda yapılan kuyu içi sismik, mikrotremor array, nokta ölçümleri, MASW, mikrogravite çalışmaları ve derin amaçlı yapılmış (250 m) zemin sondajlarının ortak değerlendirilmesi sonucunda hazırlanmış ve Şekil 2'de sunulmuştur.



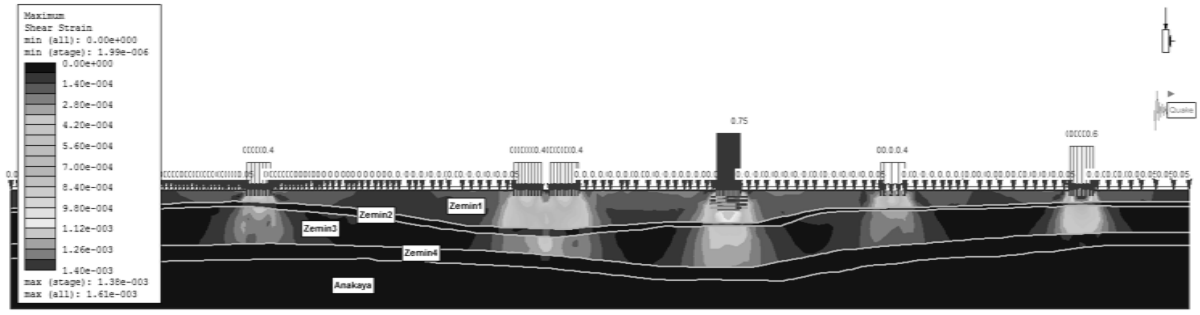
Şekil 2. Nümerik analizlerde kullanılmak üzere 500 m derinlik - 5000 m uzunluk için hazırlanmış model (Arslan vd., 2013)

Modelde A-B-C-D-E olarak isimlendirilen kazıklı temele sahip bina temellerindeki toplam yer değiştirme konturlarının dağılımı incelendiğinde, konturların bina temel genişliği ve temele aktarılan yüklere bağlı olarak değişim gösterdiği ve Zemin-4 tabakasına kadar toplam yer değiştirmelerin etkili olduğu görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Model üzerinde toplam yer değiştirme konturlarının dağılımı

Makaslama deformasyonlarının kesit üzerindeki dağılımları incelendiğinde, kesitte mavi tonlarda gösterilen renkler makaslama deformasyonlarının düşük, kırmızı renk tonu ile gösterilen bölgeler ise makaslama deformasyonlarının yüksek olduğu ve yoğunlaştığı bölgeleri göstermektedir Makaslama deformasyonları Zemin-4 tabakasına kadar dağılım göstermekte olup, daha derinlerde makaslama deformasyonları sıfırlanmaktadır. Ayrıca kesit üzerinde de görüldüğü gibi jeolojik yapı, tabaka kalınlıkları, tabakaların elastik ve dinamik özellikleri de makaslama deformasyonlarının dağılımında etken rol oynamaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Model üzerinde makaslama deformasyonu konturlarının dağılımı

Dinamik koşullarda gerilme ve deformasyon davranışlarını irdelemek amacıyla yapılan analizlerde, girdi parametresi olarak Kuşadası körfezinde gerçekleşmiş Mw: 4.7 büyüklüğündeki bir depremin İzmir'de fliş üzerinde kurulmuş Yeşilyurt istasyonunda kaydedilen ivme zaman kaydı kullanılarak zaman tanım alanında analizler yapılmıştır (Şekil 5 ve 6). Yatay yer değiştirmelerin kesit üzerindeki dağılımları incelendiğinde yatay yer değiştirmelerin Zemin-1, Zemin-2 ve Zemin-3 olarak isimlendirilen zemin tabakalarında yayıldığı, Zemin-4 ve taban kayasında herhangi bir yer değiştirmenin olmayacağı öngörülmüştür (Şekil 7). Kesit üzerindeki makaslama deformasyonlarındaki dağılım incelendiğinde, makaslama deformasyonları Zemin-4 tabakasına kadar dağılım göstermekte olup, daha derinlerde makaslama deformasyonları sıfırlanmaktadır. Dinamik analizlerde de görüldüğü gibi; jeolojik yapı, tabaka kalınlıkları, tabakaların elastik ve dinamik özellikleri hem toplam yer değiştirmelerde hem de makaslama deformasyonlarının dağılımında etken rol oynamaktadır (Şekil 7; Şekil 8).

Çizelge 1. Sismik hızların ampirik bağıntılarda kullanılması ile bulunan dinamik zemin parametreleri indeks ve mekanik özellikler

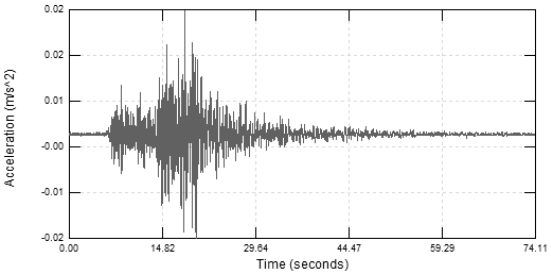
	V_S(m/sn)			V_P (m/sn)			E (MPa)			G (MPa)			ν	C (MPa)	ϕ (°)	γ (t/m^3)	
	min	max	ort	min	max	ort	min	Max	ort	min	max	ort				min	max
Zemin-1	150	250	200	260	430	345	86	272	179	35	109	72	0.25	0.025	30	1.54	1.74
Zemin-2	400	500	450	690	865	778	782	1300	1041	315	520	418		0.15	35	1.97	2.08
Zemin-3	250	300	275	430	520	475	270	412	341	109	165	137		0.10	35	1.74	1.83
Zemin-4	500	600	550	865	1040	953	1290	1953	1622	520	782	651		0.17	35	2.08	2.17
Anakaya	1000	1150	1075	1732	1990	1861	6481	8664	7573	2614	3466	3040		9.00	38	2.46	2.55

Çizelge 2. Nümerik analizlerde kullanılan materyallere ait indeks, mekanik ve elastik özellikler

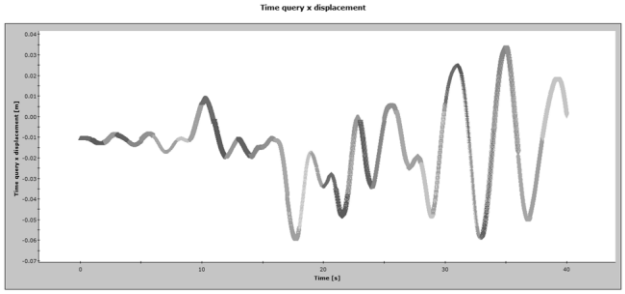
Parametre	Zemin-1			Zemin-2			Zemin-3			Zemin-4			Anakaya		
	min	max	ort	min	max	ort	min	max	ort	min	max	ort	min	max	ort
Bir. hac. ağr. γ_n (MN/m^3)	0.015	0.017	0.016	0.019	0.020	0.020	0.017	0.018	0.018	0.020	0.021	0.021	0.023	0.034	0.027
Elastisite modülü, E (MPa)	86	272	180	782	1300	1041	270	412	341	1290	1953	1621	6481	8664	7573
Makaslama modülü, G (MPa)	35	109	74	315	520	425	109	165	139	520	782	661	2614	3466	3040
Poisson oranı, ν	0.25														
Yenilme kriteri	Mohr - Coulomb														
Malzeme tipi	Elastik														
İçsel sürtünme açısı (ϕ)	30			35			35			35			38		
Kohezyon c (MPa)	0.025			0.15			0.10			0.17			9		

Çizelge 3. İnceleme alanındaki zeminlerin Türkiye Deprem Yönetmeliği'ne göre sınıflandırılması

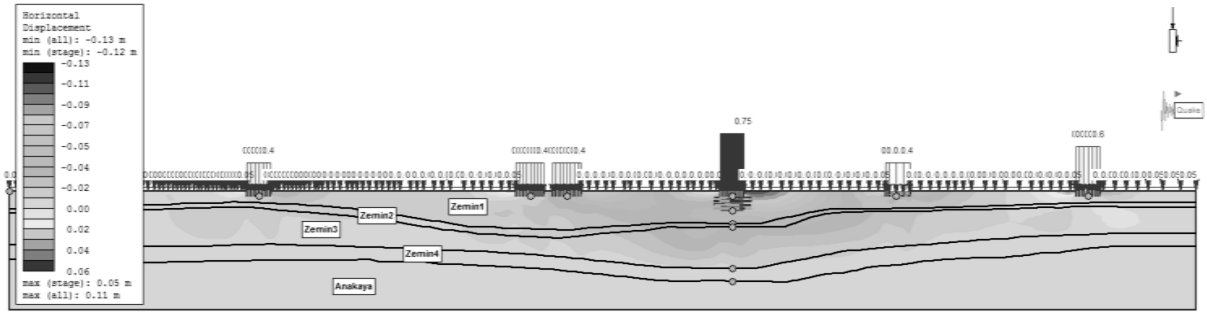
NEHRP	Zemin Grubu	Yerel Zemin Sınıfı	Etkin Yer İvmesi Katsayısı (A_0)	Spektrum Karakteristik Periyotları	
				T_A (sn)	T_B (sn)
E-D	D	Z_4	0.40	0.20	0.90
C	C				
D	C				
C	C				
B	B	Z_2		0.15	0.40
B	A	Z_1		0.10	0.30
A	A				



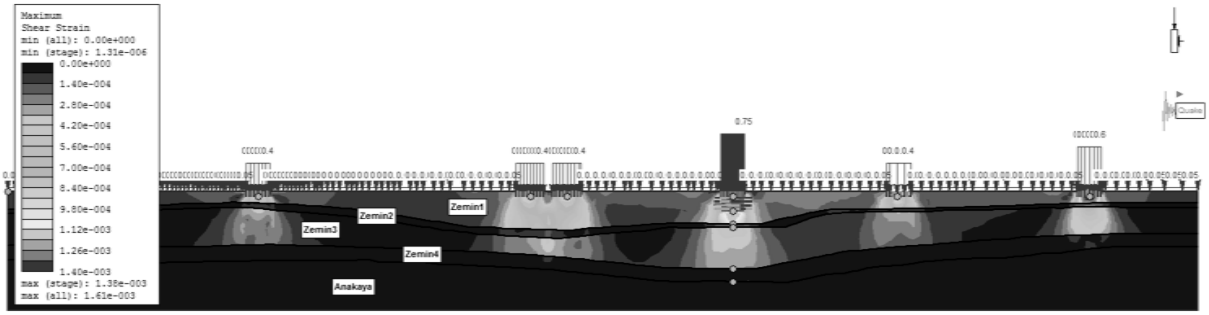
Şekil 5. Kuşadası Körfezi'nde gerçekleşmiş bir depreme ait ve hesaplamalarda kullanılan ivme – zaman grafiği



Şekil 6. Zemin yüzeyinde alınan bir noktanın sismik etki altındaki yanal deformasyonu



Şekil 7. Depremin 18. saniyesinde meydana gelen yatay yer değiştirme konturlarının kesit üzerindeki dağılımları



Şekil 8. Depremin 18. saniyesinde meydana gelen makaslama deformasyonları konturlarının kesit üzerindeki dağılımları

5. SONUÇLAR

Statik koşullarda kazıklı temele sahip bina temellerindeki toplam yer değiştirme konturlarının dağılımı incelendiğinde, konturların bina temel genişliği ve temele aktarılan yüklere bağlı olarak değişim gösterdiği, Zemin-4 tabakasına kadar toplam yer değiştirmelerin etkili olduğu görülmüştür. Makaslama deformasyonlarının dağılımları incelendiğinde; makaslama deformasyonları Zemin-4 tabakasına kadar dağılım göstermiş, daha derinlerde makaslama deformasyonları sıfırlanmıştır. Dinamik koşullarda yapılan analizlerde, toplam yer değiştirmelerin Zemin-1, Zemin-2 ve Zemin-3 olarak isimlendirilen zemin tabakalarında yayıldığı, Zemin-4 ve taban kayasında herhangi bir yer değiştirmenin olmadığı; makaslama deformasyonlarının Zemin-4 tabakasına kadar dağılım gösterdiği, daha derinlerde makaslama deformasyonlarının sıfırlandığı gözlenmiştir. Ayrıca S-Dalga hızlarının zemin ve ana kaya arasında sismik empedans değişimleri oluşturması nedeniyle zemin yüzeyinde zeminin deprem büyütme etkileri oluşacaktır. Statik ve dinamik analizlerde jeolojik yapı, tabaka kalınlıkları, tabakaların elastik ve dinamik özellikleri hem toplam yer değiştirmelerde hem de makaslama deformasyonlarının dağılımında etken rol oynamıştır.

6. KAYNAKLAR

Aksu, A.E., Piper, D.J.W., 1983. Progradation of the Late Quaternary Gediz delta, Turkey. Marine Geology, 54, 1-25.

Aksu, A.E., Konuk, T., Ulu, A., Duman, M., Piper, D.J.W., 1990. Quaternary tectonic and sedimentary history of eastern Agean Sea shelf area. Jeofizik, 4, 3-36.

Aksu, A.E., Piper, D.J.W., Konuk, T., 1987. Quaternary growth patterns of Büyük Menderes and Küçük Menderes deltas, western Turkey. Sedimentary Geology, 52, 227-250.

Arslan, A.T., Akgün, M., Gönenç, T., 2013. Derin alüvyonal zeminlerin dinamik koşullar altındaki davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellemesi: Bayraklı (İzmir)'dan bir örnek. Türkiye 20. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi, 150-154.

Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C., Göktaş, F., 2005. İzmir çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri. MTA, Rapor No:107, 80 s.

Kaya, O., 1979. Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 27(1), 1-7.

Kaya, O., 1981. Miocene reference section for the coastal parts of West Anatolia. Newsletters on Stratigraphy, 10, 164-191.

Kaya, O., 1982, Tersiyer sırt yitmesi: Doğu Ege bölgelerinin yapısı ve magmatigliği için olasılı bir mekanizma. Batı Anadolu'nun genç tektoniği ve volkanizması paneli. Türkiye Jeoloji Kongresi, 59-72.

Lysmer, J., Waas, G., 1972. Shear waves in plane infinite structures. Journal of Engineering Mechanics.

Ocakoğlu, N., Demirbaş E., Kuşcu İ., 2004. Neotectonic structures in the area offshore of Alaçatı, Doğanbey and Kuşadası (western Turkey): evidence of strike-slip faulting in the Aegean extensional province. Tectonophysics, 391, 67-83.

Ocakoğlu, N., Demirbaş, E., Kuşçu, İ., 2005. Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): Evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. Marine Geology, 219, 155-171.

Ocakoğlu, N., Demirbaş, E., Kuşçu, İ., 2006. İzmir Körfezi ve çevresinin aktif fayları ve depremselliği (Batı Anadolu). Yerbilimleri Dergisi, 27(1), 23-40.

Sayın, E., Pazı, İ., Eronat, C., 2006. Investigation of water masses in İzmir Bay, Western Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 15, 343-372.

Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., İnci, U., Ersoy, E.Y., Koçer, T., Demirtaş, R., Özkaymak, Ç., 2008. D-B uzanımlı İzmir Fayı ile KD-uzanımlı Seferihisar Fayı'nın birlikte çalıştığına dair veriler: İzmir Körfezi'ni oluşturan aktif faylarda kinematik ve paleosismolojik çalışmalar. Batı Anadolu, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 51 (2), 91-114.

Tezcan, S.S., Keçeli, A., Özdemir, Z., 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity. Geotechnical and Geological Engineering, 203-2188.

Yalçınkaya, E., 2004. Bir boyutlu modeller için zemin büyütmesine etki eden parametrelerin incelenmesi. Yerbilimleri Dergisi, 17(1), 47-56.

Erciş (Van) Yerleşim Alanındaki Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Evaluation of the Liquefaction Potential of Soils at Erciş (Van) Settlement

M. Akın[1,*], M. K. Akın[1], İ. Akkaya[1], A. Özvan[1], A. Şengül[2]

[1] *Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van*
[2] *Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., İstanbul*
*(*mutluhanakin@gmail.com)*

ÖZ: Erciş yerleşimi yeraltısuyu seviyesinin sığ olduğu, çoğunlukla siltli ve kumlu birimlerden oluşan düz bir alan üzerine kurulmuştur. 23 Ekim 2011 Van Depremi'nde en ciddi yapı hasarı ve yıkımı Erciş'te meydana gelmiştir. Deprem sonrası yapılan arazi incelemelerinde, yerleşim merkezinde sıvılaşma ve buna bağlı yüzey deformasyonu rapor edilmemiş olmasına rağmen, suya doygun iri taneli zeminlerle temsil edilen, yıkıcı deprem üretme kapasitesine sahip faylarla çevrili olan bu bölgede, gelecekteki büyük depremlerde sıvılaşmanın oluşabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada mevcut yöntemler kullanılarak Erciş yerleşimindeki zeminlerin sıvılaşma potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda, mevcut sondaj kuyularına ait verilerden yararlanılmıştır. Sıvılaşma analizlerinde, deterministik sismik tehlike analizine göre, en büyük deprem büyüklüğü 7.5 ve en büyük yatay yer ivmesi 0.4g olarak dikkate alınmıştır. Hazırlanan sıvılaşma potansiyeli haritaları değerlendirildiğinde, Erciş merkezinin üzerinde bulunduğu eski göl çökelleri düşük-çok düşük sıvılaşma potansiyeline sahipken, güncel alüvyonda sıvılaşma potansiyeli yükselmektedir. Özellikle yerleşimin güneyinde, Van Gölü'ne yaklaştıkça sıvılaşma potansiyeli dereceli bir artış göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma Potansiyeli, LPI, LSI, Erciş

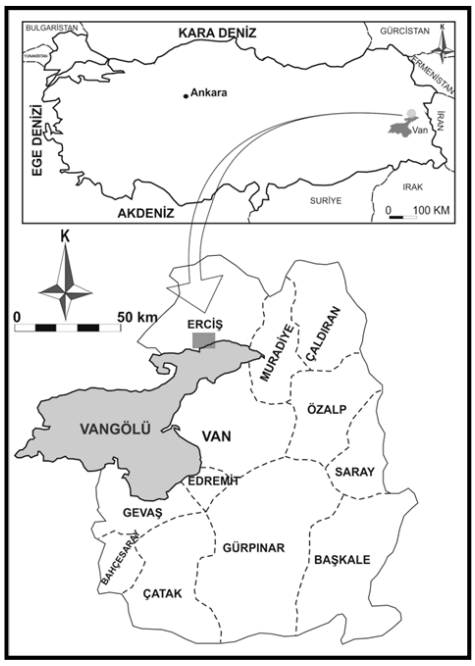
ABSTRACT: *Erciş city is located on a flat terrain underlain by silty and sandy layers with very shallow groundwater level. The majority of structural damage and building collapse occurred in Erciş during the 23rd October 2011 Van Earthquake. Although no liquefaction or liquefaction-related ground deformations were reported at field reconnaissances after the earthquake, it is believed that liquefaction may occur after destructive earthquakes in the future at this region represented by saturated coarse grained soils and sorrounded by faults capable of producing devastating earthquakes.In this study, Liquefaction potential of soils in Erciş was investigated using present methods. Within this context, existing borehole data were employed. In liquefaction analyses, maximum earthquake magnitude and peak ground acceleration were considered as 7.5 and 0.4 g in accordance with deterministic seismic risk analysis. The old lacustrine deposits on which the Erciş is settled reveal low to very low liquefaction potential whereas the liquefaction potential increases in recent alluvium with respect to liquefaction potential maps. Liquefaction potential gradually increases particularly at the south of settlement towards the Lake Van.*

Keywords: *Liquefaction Potential, LPI, LSI, Erciş*

1. GİRİŞ

Depremler sırasında meydana gelen can ve mal kayıplarında yapı kalitesinin yanı sıra, zemin özelliklerine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonlarının (sıvılaşma, yanal yayılma vb.) da önemli bir rolü bulunmaktadır. Sıvılaşma, gevşek kumlu, siltli zeminlerin ve sığ yeraltısuyunun bulunduğu alanlarda deprem sonucunda oluşan ve yapılarda ciddi hasarlara hatta devrilmelere, yıkılmalara, oturmalara neden olabilen bir olgudur. Sıvılaşma sırasında deprem dalgalarına bağlı olarak zemini oluşturan taneler arasındaki boşluk suyu basıncı artmakta ve boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye eşit olduğu anda taneler arasındaki sürtünme kuvveti sıfıra ulaşmaktadır. Böylece temel zemin, üzerindeki yapıyı taşımayacak duruma geldiğinden yapıda aşırı oturma ve/veya devrilme gibi önemli yapısal sorunlarla karşılaşılmaktadır. Literatüre bakıldığında, büyüklüğü 5 ve daha büyük depremler

sonucu sıvılaşma meydana gelebilmektedir. Sıvılaşmaya bağlı hasarların önlenebilmesi için dinamik yükler altındaki zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. İnceleme alanını oluşturan Erciş yerleşimi, Van Gölü'nün kuzeyinde yer almakta olup, Van merkeze olan uzaklığı karayolu ile yaklaşık 80 km'dir (Şekil 1). Van ilinin, nüfusu en çok olan ilçesidir. Erciş merkezi genel olarak düz bir topoğrafya üzerinde yer almaktayken, kuzeydoğu ve doğusundaki yükseltilerle sınırlanmış durumdadır.



Şekil 1. İnceleme alanına ait yerbulduru haritası.

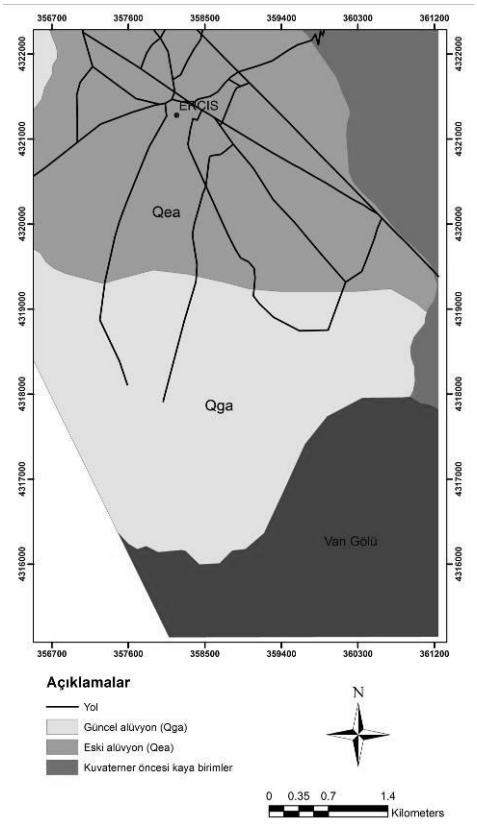
Erciş (Van) ve yakın çevresi, gerek Van bölgesindeki sıkışmalı tektonik rejim ve gerekse daha kuzeydeki doğrultu atım karakterli Çaldıran Fayı göz önüne alındığında, depremsellik açısından tehlikeli bir konumda yer almaktadır. Öte yandan, Erciş (Van) yerleşimi Türkiye Deprem Bölgeleri haritasında birinci derecede deprem bölgesi içinde yer almaktadır. 23 Ekim 2011 Van Depremi'nde en ciddi yapı hasarı ve yıkım Van'ın en büyük ilçesi olan Erciş'te meydana gelmiştir. Deprem sonrası çeşitli üniversite ve kurumlarca yapılan arazi incelemelerinin hiçbirinde, yoğun yerleşimin bulunduğu bölgelerde sıvılaşma ve buna bağlı yüzey deformasyonu rapor edilmemiştir (Akyüz vd., 2011; Alan vd., 2011; Emre vd., 2011; Köse vd., 2011; Yakut vd., 2011; Aydan vd., 2012, Aydan vd., 2014). Ancak, Erciş'e komşu olan Çelebibağ beldesinin özellikle kırsal alanlarında, sıvılaşmaya bağlı kum kaynamaları ve yanal yayılmalar gözlenmiştir. Her ne kadar 2011 Van depreminde Erciş ilçe merkezinde yüzeyde sıvılaşmanın yüzeyde bir etkisi gözlenmese de, suya doygun iri taneli zeminlerin geniş bir yayılıma sahip olduğu bu bölgede, gelecekteki daha büyük depremlerde sıvılaşmanın yüzey deformasyonları meydana getirebileceği düşünülmektedir. Öte yandan, 23 Ekim 2011 Van Depremi'nde Muradiye İstasyonu'nda ölçülen ivme değerinin de 178.5 cm/sn^2 olduğu düşünülürse, daha büyük ivme değerlerinde sıvılaşma olasılığının artabileceği bir gerçektir.

Bu çalışma kapsamında, Erciş ilçesinde daha önceki jeoteknik etüt çalışmalarında yapılan sondaj ve laboratuvar verilerinin güvenilir olanlarından da yararlanılarak Erciş yerleşimi için mevcut yöntemler kullanılarak sıvılaşma potansiyeli analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmelere bağlı olarak Erciş yerleşimi için sıvılaşma potansiyeli haritaları üretilmiş ve farklı bölgelerdeki sıvılaşma potansiyeli oranları ortaya konmuştur.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

Erciş bölgesinde temeli oluşturan birim Alt Miyosen yaşlı Adilcevaz Kireçtaşı olarak da bilinen resifal karakterli kireçtaşı birimidir. Bu birimler üzerine gerek Etrüsk Volkanı'na gerekse Girekol Volkanı'na ait lavlar ve volkanosedimenter kırıntılılar yerleşmiştir. Volkanizma Pliyosen'den Kuvaterner'e kadar farklı evrelerde ve farklı karakterlerdeki ürünler ile gerçekleşmiştir (Oyan, 2011). Tüm bu birimler üzerinde ise geniş alanlar boyunca çökelmiş Kuvaterner yaşlı kırıntılılar bulunmaktadır. Bu birimler jeolojik özellikleri birbirine çok yakın olan genellikle iri taneli malzemeden oluşmuş akarsu, delta ve göl kırıntılılarından ibarettir (Şekil 2).

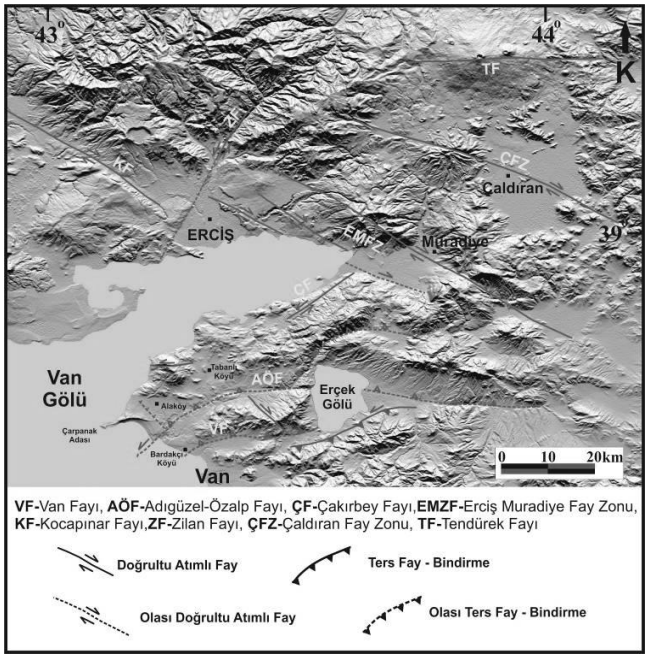
Çalışma alanının büyük bir bölümü, özellikle Erciş merkez yerleşim alanı, göl ve akarsuların getirmiş olduğu farklı boyutlardaki jeolojik malzemenin tekrarlanmasından oluşmuştur. Göl çökelleri (eski alüvyon) daha çok ince kum silt boyutundaki malzemeden oluşmakla birlikte, yer yer kısmen derin seviyeleri temsil eden killi tabakalar da içermektedir. Genellikle lamina boyutunda ince tabakalı olan bu birim çoğunlukla yataydır. Alüvyal sahalarda DSİ tarafından yapılan derin sondaj kuyularında birimin tespit edilen kalınlığı 188 m'dir. Akarsu ve delta çökelleri ise (güncel alüvyon) çoğunlukla ince-iri çakıl ve çoğunlukla iri kum boyutundaki kırıntılılardan oluşmaktadır. Çakıllar genellikle yuvarlak-yarı yuvarlak, 8-10 cm büyüklükte ve çoğunlukla volkanik birimler ile kireçtaşı kökenlidir. Birim kötü derecelenmiştir. Akarsu ve delta çökelleri içerisinde yer yer akıntı yapılarını ve çapraz tabakalanmaları görmek mümkündür. Genelde iri taneli olan birim taşkın düzlüklerinde silt ve kil boyutundaki malzeme ile birlikte organik madde kalıntıları da içermektedir.



Şekil 2. Erciş yerleşimi ve yakın civarının sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Özvan vd., 2008'den ve Özkaymak vd., 2011'den değiştirilmiştir).

2.1. Tektonik

Erciş yerleşim alanını ve yakın çevresine detaylı bakılacak olursa, bölgeyi etkileyen ana fay zonları Erciş-Muradiye Fayı, Kocapınar Fayı, Zilan Fayı, Çaldıran Fay Zonu, Çakırbey Fayı ve daha güneyde Van yerleşimine yakın olarak Adıgüzel-Özalp Fayı ile Van Fayı'dır (Şekil 3). Erciş Fayı olarak da bilinen ana fay, batıda Erciş ilçe yerleşiminin kuzey batısından başlayıp doğuda Muradiye Ovası'nın içine doğru devam etmektedir. Sağ yönlü doğrultu atımlı karakterdeki bu fay birbirine paralel ve aynı karakterli birçok kısa faydan oluşmaktadır. Bu fayların bir bölümü Etrüsk Volkanı'nın oluşumuna sebep olduğu gibi, bir kısmı da Erciş ovasının şekillenmesini sağlamıştır. Erciş Fayı, Muradiye ovası içerisinde morfolojik bir veri sağlamamakla birlikte, 23 Ekim 2011 Van Depremi'nden sonra gelişen bölgesel sismik aktivitede ova kenarını sınırladığı verisini sağlamıştır. Erciş ilçesinin 15 km doğusunda yol kenarında yarmada gözlenen Erciş Fayı yaklaşık 85 derece kuzeye eğimli ve 30-40 cm kalınlığında çimentolanmış ezik zona sahiptir (Şekil 4). Fay zonu boyunca farklı dönemlerde yırtılmanın gerçekleştiği net olarak görülmekle birlikte, yer yer 1.5 m'ye varan düşey atım da gerçekleşmiştir.



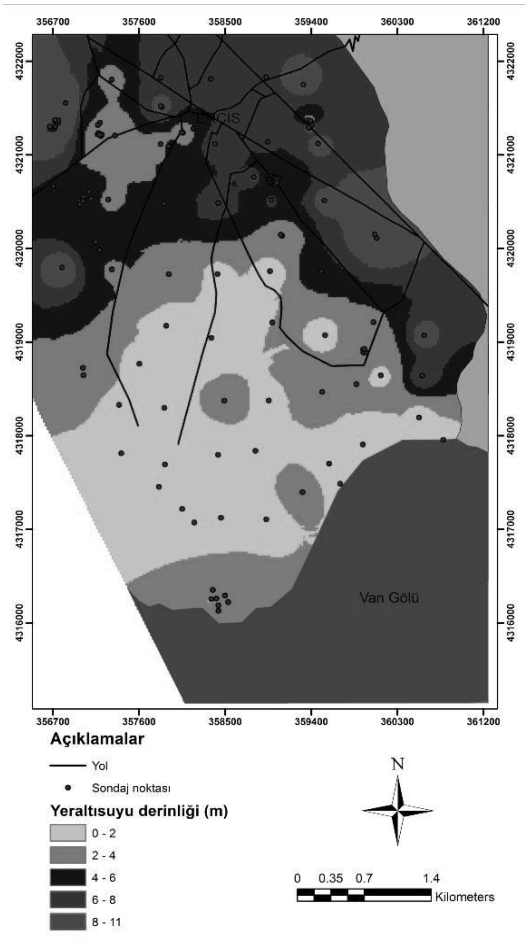
Şekil 3. Erciş ve Van civarında gözlenen tektonik yapılar (Şengül vd., 2012).

Şekil 4. Erciş Fayı'ndan bir görünüm, bakış yönü batıdır.

Erciş ilçe yerleşimini ve civarını etkileyen diğer bir fay ise, ilçeye 10 km batıda bulunan Kocapınar beldesinin adını verdiği Kocapınar Fayı'dır. Aletsel dönemde de aktivitesini göstermiş olan bu fay, yaklaşık 15-20 km uzunluğa sahip sağ yönlü doğrultu atımlı bir faydır. Fayın Erciş ovası içerisine uzanımı takip edilememektedir. Kocapınar beldesi güneyinde dere yatağını takip ederek uzanan bu fay boyunca yoğun su çıkışları bulunmaktadır. Bölgeyi etkileyebilecek bir diğer fay zonu ise Çaldıran Fay Zonu'dur. Halen aktif olan bu fay zonu 1976 yılında gerçekleşen M_s 7.5 büyüklüğündeki depremde sağ yönde 3.5 m'nin üzerinde maksimum atım yapmıştır. Bölgede birçok tali fayın da hareketlenmesine neden olan bu deprem neticesinde Erciş ilçesinde de hasar meydana gelmiş, özellikle Erciş kuzeyindeki köylerde ciddi yıkımlar yaşanmıştır. Sağ yönlü doğrultu atımlı bu fay zonu yaklaşık 60 km uzunluğunda ve KB-GD uzanımlıdır. Van Fayı ve benzeri diğer kuzeye eğimli bindirme karakterli fayların tekrar aktiflik kazanması durumunda yine başta Erciş ve civarı olmak üzere kuzeydeki ana yerleşim alanları Muradiye, Ünseli, Kocapınar, Çelebibağ ve civar köyler yoğun bir şekilde etkilenme olasılığına sahiptir.

2.2. Yeraltısuyu Durumu

Erciş yerleşimi ve yakın çevresi genelde düz bir topoğrafya üzerinde yer almaktadır. Çalışmada yararlanılan sondaj kuyularındaki yeraltısuyu derinlikleri dikkate alındığında inceleme alanındaki yeraltısuyu seviyesinin genel olarak sığ olduğu (0.2 m - 11 m arasında) görülmektedir. Erciş yerleşiminin de üzerinde bulunduğu göl çökellerinde yeraltısuyu genel olarak 6 m'den daha derindeyken, Van Gölü'ne yaklaşıldıkça 2 m'den daha sığ derinliklerde yeraltısuyuna rastlanılabilmektedir (Şekil 5). Özellikle güncel alüvyon çökellerde yeraltısuyu seviyesi oldukça sığdır (<4 m).



Şekil 5. Erciş ve yakın çevresine ait yeraltısuyu derinlik haritası.

3. İNCELEME ALANININ SIVILAŞMA POTANSİYELİ

Erciş ve yakın çevresindeki sıvılaşma potansiyeli, inceleme alanında açılan toplam 124 adet jeoteknik sondaj kuyusu verisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmelerinde yerinde yapılan Standart Penetrasyon Test (SPT) verileri esas alınmıştır. Öte yandan, örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden zemin türleri ve ince tane oranları hakkındaki veriler sıvılaşma analizlerinde kullanılmıştır.

Sıvılaşma analizlerinde olası en büyük deprem büyüklüğü (M) ve bu deprem sonucu inceleme alanını etkileyecek en büyük yatay yer ivmesi (a_{max}) en önemli parametrelerdendir. Erciş ilçesi ve yakın çevresi sismik aktivitesi yüksek ve tarihte büyük depremler üretmiş doğrultu atımlı faylarla çevrelenmiş durumdadır (Şekil 3). Bunun yanı sıra, 23 Ekim 2011'de M_w 7.2 büyüklüğünde deprem üreten bindirme karakterli Van Fayı da Erciş'i etkileyebilecek bir mesafededir. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan en büyük yatay yer ivmesi değeri deterministik sismik tehlike analizi yardımıyla ortaya belirlenmiştir. Buna göre inceleme alanını etkileyebilecek en büyük depremin moment büyüklüğü 7.5 olarak göz önüne alındığında, en büyük yatay yer ivmesi Ulusay vd. (2004) tarafından önerilen azalım ilişkisine göre 0.4 g olarak belirlenmiştir. Sıvılaşma analizleri, devirsel gerilme yaklaşımına göre yapılmıştır. Bu kapsamda Idriss ve Boulanger (2006) tarafından önerilen SPT-tabanlı yöntem kullanılmıştır. Zeminlerin depreme bağlı olan tekrarlı gerilmeler karşısında göstereceği dayanım SPT-N darbe sayıları ile hesaplanmıştır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları Devirsel Dayanım Oranının (CRR), Devirsel Gerilme Oranı (CSR) ile oranlanması sonucu belirlenmiştir.

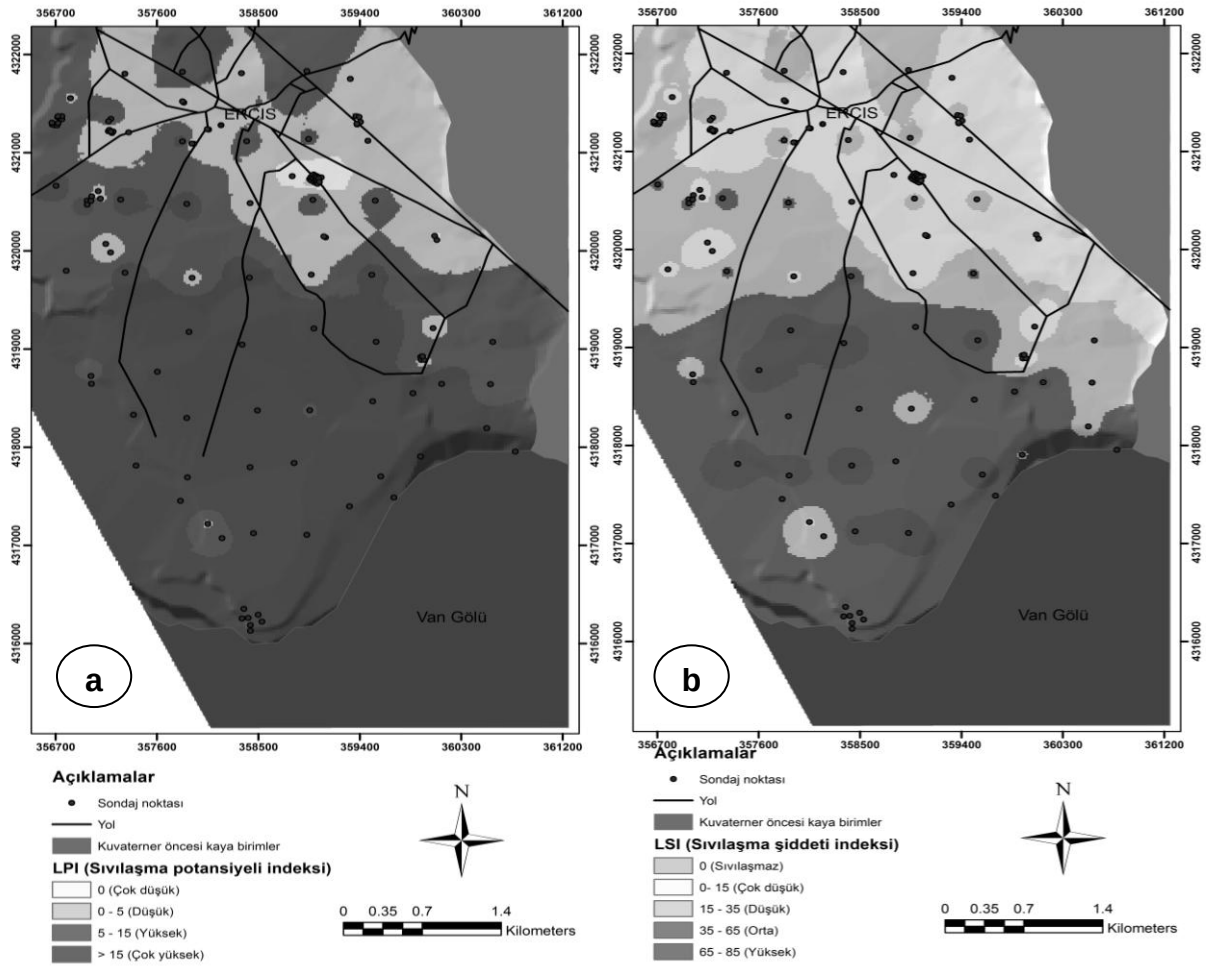
Çalışma kapsamında dikkate alınan 124 adet sondaj kuyusundaki sıvılaşma potansiyeli Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) ve Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından önerilen Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) yöntemleri ile ortaya konmuştur. Mevcut veriler ışığında Erciş yerleşimi için LPI ve LSI değerleri temel alınarak iki ayrı sıvılaşma potansiyeli haritası hazırlanmıştır. Haritaların CBS tabanlı ArcMap v.10 yazılımında hazırlanması sırasında "Inverse Distance Weighting" istatistiksel yönteminden faydalanılmıştır. İnceleme alanı için LPI ve LSI yöntemine göre hazırlanmış sıvılaşma potansiyeli haritaları Şekil 6a ve 6b'de sunulmuştur.

Şekil 6a'da LPI yöntemine göre hazırlanan sıvılaşma potansiyeli haritasından da görüleceği gibi, Erciş'in güneyindeki güncel alüvyonda sığ yeraltısuyu seviyesine ve gevşek kumlu zeminlerin varlığına bağlı olarak sıvılaşma potansiyeli yüksek-çok yüksek olarak belirlenmiştir. Öte yandan, Erciş yerleşiminin de üzerinde bulunduğu eski alüvyonda sıvılaşma potansiyeli, yer yer değişkenlik göstermekle birlikte, genel olarak düşüktür. Özellikle yerleşim merkezinden Van Gölü'ne doğru gidildikçe sıvılaşma potansiyelinin dereceli olarak artması dikkat çekicidir. Belirtilen bölgede yeraltısuyu derinliği çoğunlukla 0-2 m arasında değişmektedir. Erciş yerleşiminin batısında Zilan Çayı'na kadar çoğunlukla göl çökellerine rastlanmaktadır. Bu alanda yer yer düşük sıvılaşma potansiyelli kuyulara rastlanmakla birlikte, sıvılaşma potansiyeli LPI yöntemine göre yüksek olarak belirlenmiştir.

LSI yöntemine göre hazırlanan ve Şekil 6b'de gösterilen sıvılaşma potansiyeli haritasına göre sıvılaşma potansiyeli yüksek olan sahalar, yerleşim merkezinin güneyinde yerel olarak bulunmaktadır. Erciş'in güneyinde Van Gölü'ne yakın kesimlerdeki güncel alüvyonda sıvılaşma potansiyeli baskın olarak orta derecededir. Kuzeye doğru, göl çökellerinde sıvılaşma potansiyeli düşmekte olup, LSI yöntemine göre yerleşimin yoğun olarak bulunduğu alanlarda sıvılaşma potansiyeli düşük-çok düşüktür. Yer yer sıvılaşma potansiyelinin hiç bulunmadığı alanlara da rastlanmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Van Gölü'ne yaklaştıkça sıvılaşma potansiyeli LSI yöntemine göre de dereceli olarak artmakla beraber, göle yakın kesimlerdeki sıvılaşma potansiyeli LPI yöntemindeki gibi yüksek olarak belirlenmemiştir.

Erciş yerleşimi için LPI ve LSI yöntemine göre hazırlanmış haritalar birlikte değerlendirildiğinde, her iki yöntemin de Erciş yerleşim merkezinde, yapılaşmanın yoğun olduğu ve 23 Ekim 2011 Van Depremi'nde yıkımın fazla gözlendiği alanda sıvılaşma potansiyelini düşük-çok düşük olarak ortaya

koyduğu görülmektedir. Buna göre, jeoteknik açıdan daha iyi karakterde olan göl çökellerinde sıvılaşma potansiyelinin yüksek olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, göle yakın kesimlerdeki daha genç yaşlı güncel alüvyonda sıvılaşma potansiyeli artmaktadır. Bu bölgeler, az katlı yapılaşmanın yaygın olduğu alanlar olmakla birlikte, yer yer çok katlı (3-4 kat) yapılar da gözlenmektedir. Bu nedenle özellikle bu alanlardaki yapılaşmalarda sıvılaşma riski dikkate alınmalıdır.



Şekil 6. Erciş yerleşimi için Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) (a) ve Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) (b) yöntemine göre hazırlanmış sıvılaşma potansiyeli haritaları.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler sonucunda, Erciş yerleşimini tehdit eden önemli aktif fay zonlarının bulunduğu ortaya konmuştur. Özellikle Çaldıran ve Erciş-Muradiye Fay Zonları bölgede büyüklüğü 7.5 civarlarında olan depremler üretebilecek kapasitededir. Bu büyüklükteki olası bir depremde Erciş yerleşiminde 0.4 g mertebesine yakın yatay yer ivmesi değerleri beklenebilir. Bu durum yerleşimin ciddi oranda deprem tehlikesi altında olduğu gerçeğini ortaya çıkarmaktadır. Bu boyutlardaki depremler sonucunda ilçe ve çevresinde meydana gelebilecek sıvılaşma tehlikesi bu çalışma kapsamında araştırılmış ve yerleşimin üzerinde bulunduğu temel zeminlere ait sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Buna göre, genel olarak değerlendirildiğinde, Erciş yerleşim merkezinin üzerinde bulunduğu göl çökelleri (eski alüvyon) düşük-çok düşük sıvılaşma potansiyeline sahipken, güncel alüvyonda sıvılaşma potansiyeli yükselmektedir. Van Gölü'ne yakın kesimlerde sıvılaşma potansiyeli farklı yöntemlerle orta-yüksek olarak saptanmıştır. Özellikle yerleşimin güneyinde Van Gölü'ne doğru yaklaştıkça sıvılaşma potansiyeli dereceli bir artış göstermektedir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, Erciş ve yakın çevresinde olası büyük bir depremde sıvılaşma türü yüzey deformasyonları meydana gelebileceği söylenebilir. Bu nedenle, bu araştırmanın bölgesel kapsamlı bir çalışma olduğu düşünülerek, yeni yapılacak yapılara yönelik zemin araştırmalarında sıvılaşma potansiyeli detaylı olarak değerlendirilmeli ve sıvılaşma potansiyelinin bulunduğu riskli alanlarda zemin iyileştirme çalışmaları uygulanmalıdır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 2014-HIZ-MİM167 numaralı proje ile Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, finansal desteği için Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı'na teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Akyüz, S., Zabcı, C., Sançar,T., 2011. October 23 2011 M7.2 Tabanlı-Van earthquake. İTÜ Report of Faculty of Civil Engineering, www.eedmi.itu.edu.tr/Van_Depremi/index.html.

Alan, H., Bozkurt, E., Çağlan, D., Dirik, K., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Topal, T., 2011. Van depremleri (Tabanlı-Edremit) raporu. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayın No.110, 48 p.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Konagai, K., 2012. Site investigation and engineering evaluation of the Van earthquakes of October 23 and November 9, 2011. Technical Report of Japan Society of Civil Engineers.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., 2014. Seismic, ground motion and geotechnical characteristics of the 2011 Van-Ercis¸ and Van-Edremit earthquakes of Turkey, and assessment of geotechnical damages. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 73, 643-666.

Emre, Ö., Duman T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., 2011. 23 Ekim 2011 Van Depremi saha gözlemleri ve kaynak faya ilişkin ön değerlendirmeler (http://www.mta.gov.tr/v2.0/deprem/2011Van-Depremi_On-Degerlendirmeler. pdf).

Idriss I.M., Boulanger, R.W., 2006. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 115-130.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe., S., Yasuda, S., Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, 3, 1310-1330.

Köse, Ö, Aras, A., Babayiğit, S., Mercan, Ç., 2011. Van Depremi (23 Ekim 2011, M:7.2), Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü Raporu.

Oyan, V., 2011. Etrüsk volkanı ve yakın çevresinin (Van Gölü kuzeyi) volkanostratigrafisi, petrolojisi ve magmatik evrimi. Doktora tezi (yayımlanmamış). Y.Y.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü. Van.

Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Bozkurt, E., Dirik, K., Topal, T., Alan, H., Çağlan, D., 2011. 23 Ekim 2011 Tabanlı-Van Depreminin sismik jeomorfolojisi ve Doğu Anadolu'daki aktif tektonik yapılarla olan ilişkisi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 35 (2), 175-200.

Özvan, A., Şengül, M.A., Tapan, M., 2008. Van Gölü havzası Neojen çökellerinin jeoteknik özelliklerine bir bakış: Erciş yerleşkesi. Geosound, 52, 297-310.

Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. Environmental Geology, 48, 81-91.

Şengül, M.A., Koral, H., Altuncu S., 2012. 9 Kasım 2011 Van Depremi olası kaynak fayı ve etkileri. 16. Aktif Tektonik Araştırma Grubu (ATAG) Çalıştayı Bildiri Özleri Kitabı, İstanbul, 38.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. Engineering Geology, 74(3-4), 265-291.

Yakut, A., Binici, B., Canbay, E., Erberik, A., Sarıtaş, A., Aldemir, A., Demirel, İ.O., Erdil, B., Ay, B.Ö., Özçelik, R., 2011. 23 Ekim 2011 Mw7.2 Van Depremi sismik ve yapısal hasara ilişkin saha gözlemleri. Rapor No: METU/EERC 2011-04. EERC, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Sismik Şev Deformasyonlarının İncelenmesi: Karamürsel (Kocaeli) Örneği

Investigation of Seismic Slope Deformations: An Example from Karamürsel (Kocaeli)

N. Barkın[1], K. Ulamış[2,*], R. Kılıç[2]

[1] *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, CBS Gen.Müd., Uygulama ve Geliştirme Dai. Başk.*
[2] *Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü*
*(*ulamis@ankara.edu.tr)*

ÖZ: Mühendislik jeolojisinde sismik şev deformasyonlarının belirlenmesi önemlidir. Kütle hareketlerinin bölgelendirilmesinde farklı parametreler içeren duyarlılık haritaları, bu çalışmalara altlık oluşturacak niteliktedir. Bu çalışmada, Kocaeli iline bağlı Karamürsel ilçesi güneyindeki heyelanlarda sismik şev deformasyonları incelenmiştir. İnceleme alanı, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) içindeki olup, toplam 38 adet heyelan tespit edilerek sınıflandırılmıştır. Litolojik birimlerde gelişmiş heyelanlara ait kayma yüzeylerinin artık makaslama dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Üst Kretase fliş, Eosen fliş ve Pliyosen çökellerinin bulunduğu inceleme alanı faylara dik drenaj hatları boyunca incelenmiştir. Topoğrafya, yağış, fay, drenaj, yol ve yerleşim alanlarına uzaklık parametreleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritası hazırlanmış. Psödostatik analizler yapılarak, güvenlik sayısı 1.0'i veren geriye dönük kritik yatay yer ivmesi değerleri belirlenmiş ve Karamürsel çevresindeki ivme ölçerlerden alınan kayıtlardan Arias şiddeti değerleri hesaplanmıştır. Sismik deformasyonlar Arias şiddeti ve kritik ivmeye göre belirlenmiştir. Kretase flişte en yüksek sismik deformasyon 2.82 cm, Eosen flişte 3.57 cm ve Pliyosen kilinde 7.18 cm olarak tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sismik Şev Stabilitesi, Arias Şiddeti, Şev Deformasyonları, Karamürsel

ABSTRACT: *The determination of seismic deformations is a main concern of engineering geology and susceptibility maps with several parameters might be handy for purpose. The seismic slope deformations on the landslides around southern Karamürsel village, Kocaeli were investigated the study area is located in the North Anatolian Fault Zone (NAFZ). A total of 38 instabilities were encountered and mapped. The residual parameters of sliding surfaces for each lithological units were determined. The study area includes Upper Cretaceous flysch, Eocene flysch and Pliocene deposits along the drainage system, perpendicular to the faults. The landslide susceptibility map is based on topography, precipitation, faults, drainage and distance to roads, and residential areas. The yield acceleration which provides a safety factor of 1.0 was derived from the pseudostatic slope stability calculations. Arias Intensity was calculated using the earthquake station data around Karamürsel. The seismic slope deformation was determined based on Arias Intensity and yield accelerations. Maximum seismic deformations are 2.82 cm (Cretaceous flysch), 3.57 cm (Eocene flysch) and 7.18 cm (Pliocene deposits) respectively.*

Keywords: *Seismic Slope Stability, Arias Intensity, Slope Displacements, Karamürsel*

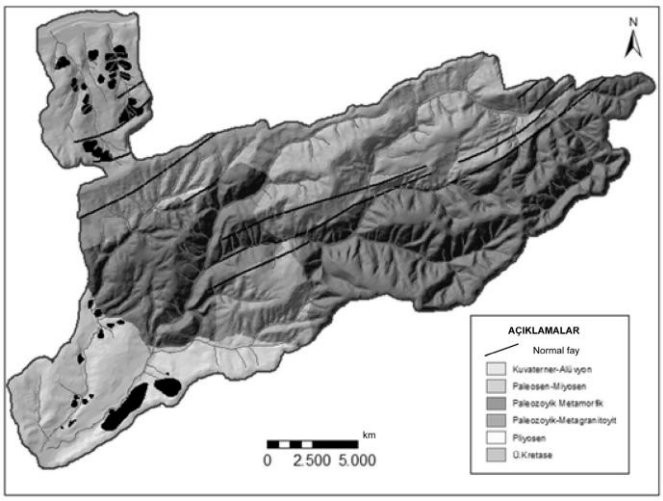
1. GİRİŞ

Sismik şev duraylılığı aktif deprem bölgelerinde önem kazanmakta olup, Terzaghi (1950) tarafından açıklanan psödostatik analiz yönteminden bu yana gelişmektedir (Ambraseys ve Menu, 1988). Psödostatik katsayının (k_h) seçimindeki belirsizliklerden dolayı daha çok gerilme-deformasyon tabanlı yöntemler önerilmiştir (Seed vd., 1973; Elgamal vd., 1990). Newmark (1965), tarafından kritik ivme değerine göre şevlerde kalıcı plastik deformasyonu esas alan bir yöntem geliştirilmiştir (Makdisi and Seed 1978; Chen, vd., 2014). Jibson (2011) şevler için kullanılan sismik deformasyon tahmin yöntemlerinde en büyük yatay yer ivmesinin kullanımını incelemiş ve Newmark kalıcı deformasyon yönteminin psödostatik analizden daha iyi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Bozbey ve Gundogdu (2011) Türkiye deprem verisini kullanarak, sismik deformasyonların psödostatik katsayı ve en büyük yatay yer ivmesine bağlı olarak tahminine yönelik ampirik bağıntılar önermişlerdir. Hsieh and Lee

(2011), Arias şiddeti ile Newmark yönteminden elde edilen deformasyonlar arasındaki ilişkileri güncellemiştir. CBS tabanlı heyelan duyarlılık haritaları, mühendislik jeolojisinde son yıllarda geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur (örneğin; Westen, 1994; Mazman 2005). Bu çalışmada; KAFZ içindeki inceleme alanı ve çevresindeki sismik deformasyonlar farklı litolojik birimler için belirlenmiş ve heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. İnceleme alanında gözlenen toplam 38 adet heyelan sınıflandırılmış ve yağış alan sınırlarına göre beş adet havza belirlenmiştir. Heyelanlar çoğunlukla geriye doğru ilerleyen ve drenaj ağına dik yönde gelişmiştir. Sismik deformasyonların belirlenmesinde şevlerin limit denge koşulundaki kritik ivme değeri, kayıtçılardan alınan en büyük yatay yer ivmesi ve Arias şiddeti değerleri dikkate alınmıştır. Heyelanların kayma düzlemlerinin eğimleri ve statik duraylılık analizlerinden elde edilen güvenlik sayıları kritik ivme değerini belirlemek üzere kullanılmıştır. Arazide aktif olmayan heyelanların da yoğun yağış veya depremsellik etkisi ile hareket kazanacağı düşünülmektedir.

2. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

İnceleme alanı Armutlu Yarımadası'nın orta kesimlerinde yer almakta olup, KAF'na na ait kollarla sınırlı olduğundan oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Temeli Prekambriyen-Alt Paleozoyik yaşlı, granitik dayk ve plütonlarla kesilen Pamukova Metamorfikleri oluşturur (Göncüoğlu, 1991). Temel üzerinde Kretase yaşlı İncebel flişi bulunmaktadır. Mor, gri ya da sarı renkli taban konglomerası düzeyi ile başlayarak kumtaşı, çamurtaşı marn ve konglomera ardalanması niteliğindeki Paleosen yaşlı İncebel filişi üste doğru yer yer tüf ve andezitik aglomeralardan oluşan volkanik düzeyler (Sarısu Volkanitleri) içermektedir. Armutlu Yarımadası'nın güneyinde kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı Paleosen- Eosen yaşlı andezitik lav ve aglomeralardan oluşan volkanit istif Paleosen filişleri ile yer yer geçişlidir. Gevşek tutturulmuş Pliyosen serisine ait çökeller ise, aşınıp taşınarak düzlükteki alüvyal havzaya biriktiğinden Kuvaterner, Pliyosen ile geçiş göstermekte ve yer yer birbirinden ayırmada güçlük çekilmektedir (Erendil vd, 1991). İnceleme alanı KAFZ'na paralel düşey normal atımlı faylarla kesilerek körfeze doğru basamaklar şeklinde K-KB doğrultusunda alçalmıştır. Kıyı ovasını sınırlayan ve Üst Pliyosen ve Kuvaterner yaşlı oluşukları etkileyen bu fayların aktif oldukları fayların normal faylar oldukları ve esas olarak kuzeyde yer alan Kuzey Anadolu Fayı ana yapısının etkisiyle meydana gelmiştir. İnceleme alanının da bir bölümünü içeren Armutlu Yarımadası kuzeyindeki kıyı ovalarının KAFZ'na bağlı eğim atımlı normal fay niteliğinde ikincil yapılardır (Gökten, 2001).



Şekil 1.İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Erendil, vd., 1991'den)

3. ARAZİ ÇALIŞMALARI

İnceleme alanındaki heyelanlar aktivite ve hareket hızına göre (Varnes, 1978; WP/WLI, 1993) sınıflandırılmıştır (Çizelge 1). Kretase yaşlı flişte heyelanlar % 33- 42, Eosen flişte % 28-37 ve Pliyosen çökellerinde %2-28 yamaç eğimi aralığında gelişmiştir. Bazı heyelanların yüksek eğimde

gelişmesi buna bağlı olup, arazi gözlemleri ile de desteklenmiştir. Heyelanların oluştuğu dikkate alınarak kayma yüzeylerinin artık kohezyon ve içsel sürtünme açıları konsolidasyonlu-drenajlı makaslama deneyleri ile belirlenmiştir. Heyelanların boyutları, yaklaşık kayma derinliği ve yeraltısuyu seviyesinin yüzeyden derinliği araştırma çukurları açılarak belirlenmiş olup, birimlerden alınan örneklerin sınıflama, örnek derinliği, birim hacim ağırlık ve artık makaslama dayanımı parametrelerinin en küçük ve en büyük değerleri Çizelge 2' de verilmiştir. Kretase flişte arazide ölçülebilen kayma miktarı 105-138 cm, Eosen flişte 125-155 cm, Pliyosen kilinde ise 110-285 cm arasında değişmektedir.

Çizelge 1. Jeolojik formasyonlardaki heyelanların boyutları, yaklaşık kayma derinliği ve yeraltısuyu seviyesinin yüzeyden derinliği

	No	Genişlik, m	Uzunluk, m	Kayma Der. m	YASS, m	Hareketin türü	Birim
Oluklu	KH1	300	260	10	12	Duraklamış	Kretase fliş
	KH2-a	65	250	8	5	Aktif	
	KH2-b	115	355	8	5		
	KH3	150	415	8	9	Duraklamış	
	KH4	145	400	12	10	Aktif	
	KH5	160	375	10	8	Aktif	
	KH6	210	290	11	8	Aktif	
	KH7	145	325	12	10	Aktif	Eosen fliş
	KH8	270	460	11	9	Aktif	
	KH9	150	300	12	11	Aktif	
	KH10	260	305	11	10	Aktif	
	KH11	120	170	9	8	Aktif	
	KH12	250	190	11	10	Aktif	
Hayriye-Yalakdere	KH13	150	205	15	17	Duraklamış	Kretase fliş
	KH14	110	205	13	14	Duraklamış	
	KH15	210	250	16	17	Duraklamış	
	KH16	175	220	13	12	Aktif	Eosen fliş
	KH17	135	95	10	8	Aktif	
	KH18	55	95	13	11	Aktif	
	KH19	200	140	12	10	Aktif	
	KH20	300	240	12	11	Aktif	
	KH21	100	180	6	8	Duraklamış	Pliyosen
	KH22	150	150	7	8	Duraklamış	
	KH23	130	75	7	8	Duraklamış	
	KH24	150	75	6	7	Duraklamış	
	KH25	130	200	6	8	Duraklamış	
	KH26	180	110	10	8	Aktif	
	KH27	110	85	7	6	Aktif	
	KH28	150	115	8	6	Aktif	
	KH29	40	40	10	8	Aktif	
	KH30	180	50	8	6	Aktif	
	KH31	105	160	8	7	Aktif	
	KH32	60	100	8	7	Aktif	
	KH33	95	175	10	8	Aktif	
Avcıköy-Safiye Osmaniye	KH34	1250	305	15	16	Duraklamış	
	KH35	725	800	12	13	Duraklamış	
	KH36	35	185	11	8	Aktif	
	KH37	55	275	10	8	Aktif	
	KH38	35	60	9	7	Aktif	

Çizelge 2. Örneklerin zemin sınıflaması ve bazı jeomekanik özellikleri

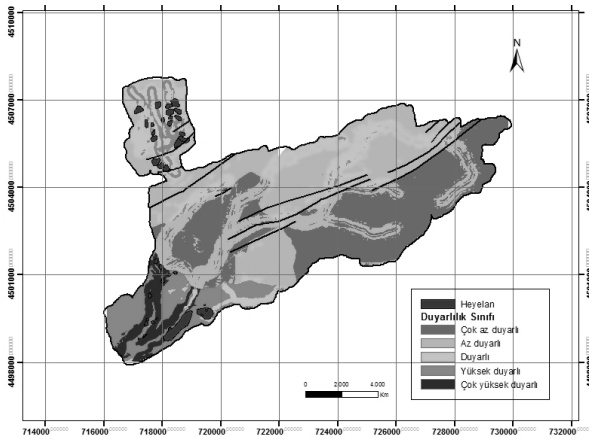
			γ_n, kN/m^3		c', kPa		ϕ', ^{0}	
Birim	Litoloji	USCS	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Kretase fliş	Kiltaşı, marn	CL	19.20	20.70	6	28.25	18	26.02
Eosen fliş	Tamamen ayrışmış kumtaşı	ML,SM	18.90	21.18	5	38.09	17	23.33
Pliyosen	Koyu kahverenkli kumlu kil	CL, CH	17.20	18.23	8	11.2	19	27.18

4. HEYELAN DUYARLILIĞI

Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanması CBS ile daha fazla parametreyi ve detayı içermektedir (Ercanoğlu ve Gökçeoğlu, 2002; Dai ve Lee, 2002; Aleotti ve Chowdhury, 1999). Haritalamada nicel ve nitel yöntemler kullanılmaktadır (Yalçın 2007; Çevik ve Topal, 2003). Bu çalışmadaki parametreler seçilen toplma parametrelerin içindeki ağırlık oranlarına göre incelenmiştir. Parametreler belirlenirken; inceleme alanı ve çevresindeki jeolojik birimler için yamaç eğim/eğim yönü yükseklik, drenaj ve faylara olan uzaklık başlıca özellikler, yerleşim alanı ve yola olan uzaklık ile yağış miktarının ortalamasına göre arazi örtüsü özellikleri de ek olarak dikkate alınmıştır. Topoğrafik ve jeolojik harita altlık olacak şekilde yukarıdaki parametrelerin değişim aralığı belirlenmiş ve duyarlılık haritasında kapladıkları alanların piksel sayısı toplam alandaki heyelan yoğunluğu ile parametrelerin heyelan oluşumundaki yoğunluk ilişkisine göre hesaplanmıştır. Parametrelerin frekansı ve toplamdaki ağırlığı ile hassasiyet haritası hazırlanmıştır. Haritadaki pikseller hassasiyet sınıflaması için normalize edilmiştir (Süzen and Doyuran 2004) (Eş.1).

$$W_i = 1000\,\frac{B}{A} - 1000\,\frac{TB}{TA} \qquad (1)$$

Burada; W_i parametre ağırlık değeri; B parametre sınıfında heyelanlı alan içeren piksel; A parametre sınıfları içinde tekil piksel ; TB heyelanlı alandaki toplam piksel sayısı ve TA parametre sınıfındaki toplam piksel sayısıdır. Eşitlik 1 kullanılarak belirlenen pozitif değerler (Çizelge 3), parametrenin hassasiyet üzerindeki etkisinin daha fazla, negatif değerler az olduğunu belirtmektedir (Süzen ve Doyuran, 2004; Dağ, 2012). İnceleme alanının %19'u çok düşük, %4 yüksek ve %3 çok yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir. Heyelan duyarlılık haritasında (Şekil 2) "çok düşük" alan sınırı Paleozoyik yaşlı granitik ve metamorfik temelin sınırlarını ifade etmektedir. Çizelge 3'deki parametre aralıkları değerlendirildiğinde; eğimim 10-20˚, eğim yönünün batı/kuzeybatı, yüksekliğin 200-300 m, drenaja olan mesafenin 150-250 m ve arazi örtüsünün bitkilerden oluşması heyelan hassasiyetinde en etkin parametreler olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2 . İnceleme alanının heyelan duyarlılık haritası ve duyarlılık sınıfları

Çizelge 3. Litoloji, eğim/eğim yönü, yükseklik, faya uzaklık, drenaja uzaklık ve arazi örtüsü sınıfları

	Parametre	A	% A	B	% B	B/A	W_i	Sınıf
Litoloji								
1	Eosen	23124	22,62	594	29,49	1,30	5,91	3
2	Pliyosen	14250	13,94	943	46,82	3,36	46,41	5
3	Kretase	21532	21,05	431	21,40	1,02	0,31	3
4	Kuvaterner	2158	2,11	46	2,29	1,09	1,61	3
5	Paleozoyik Metam.	40056	39,16	0	0	0	-19,69	1
6	Paleozoyik Granitoid	1149	1,12	0	0	0	-19,69	1
Eğim (^{0})								
1	0-10	3129	4,21	445	22,08	5,24	0,11	3
2	10-20	36426	49,03	1285	63,77	1,30	0,01	3
3	20-30	23797	32,03	268	13,30	0,42	-0,02	2
4	30-40	9783	13,17	17	0,84	0,06	-0,02	2
5	>40	1152	1,56	0	0	0	-0,03	2
Eğim yönü								
1	Yatay	1033	1,00	5	0,25	0,25	-0,02	2
2	Kuzey	5541	5,42	123	6,10	1,12	0	2
3	Kuzeydoğu	7028	6,86	231	11,47	1,67	0,01	2
4	Doğu	8822	8,61	150	7,45	0,86	0	2
5	Güneydoğu	13313	12,99	34	1,69	0,13	-0,02	3
6	Güney	14269	13,93	20	0,99	0,07	-0,02	3
7	Güneybatı	10986	10,72	73	3,63	0,33	-0,01	3
8	Batı	14195	13,85	422	20,94	1,51	0,01	2
9	Kuzeybatı	18688	18,24	753	37,36	2,04	0,02	2
10	Kuzey	8582	8,38	204	10,12	1,20	0	2
Yükseklik (m)								
1	0-100	3212	3,13	188	9,39	3,00	0,041	3
2	100-200	11085	10,82	930	46,48	4,29	0,061	3
3	200-300	19228	18,77	692	34,58	1,84	0,021	3
4	300-400	17499	17,08	191	9,55	0,55	-0,009	2
5	400-500	14935	14,58	0	0	0	-0,019	2
6	>500	36498	35,62	0	0	0	-0,019	2
Faya uzaklık (m)								
1	0-50	5764	5,64	72	3,57	0,63	-7	2
2	50-100	4683	4,59	82	4,07	0,88	-2	2
3	100-250	11910	11,64	242	12,00	1,03	1	3
4	250-500	13488	13,19	125	6,20	0,47	-10	2
5	500-1000	21870	21,39	379	18,82	0,87	-2	2
6	1000-2500	35162	34,39	489	24,27	0,70	-6	2
7	2500-5500	9355	9,16	626	31,07	3,39	46	5
Drenaja uzaklık (m)								
1	0-50	9233	9,05	230	11,41	1,26	5	3
2	50-150	15082	14,75	711	35,29	2,39	28	4
3	150-250	14418	14,10	555	27,54	1,95	19	3
4	250-500	28463	27,84	318	15,79	0,56	-8	2
5	500-1000	35036	34,27	201	9,97	0,29	-14	1
Arazi örtüsü								
1	Orman	34972	34,17	58	2,94	0,08	-0,002	2
2	Bitki	40225	39,29	1045	52,96	1,34	0,01	3
3	Yerleşim alanı	20697	20,22	778	39,43	1,95	0,01	3
4	Ziraat alanı	6467	6,32	92	4,67	0,73	-0,01	2

5. SİSMİK ŞEV DURAYLILIĞI

Sismik şev duraylılığı incelemelerinde en büyük yatay yer ivmesi (PGA) ve pseudostatik katsayı (k_h) kullanılmaktadır. Psödostatik katsayının kullanımı tartışmalı olup (Kramer, 1996), heyelan potansiyeli olan alanların modellenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Modelleme yapılmadan verilen değerler gerçek durumu yansıtmada yetersiz kalabilmektedir. Arias Şiddeti (I_a) deprem sırasında enerji boşalımının ifadesi olup, depremin frekans içeriği ve sarsıntı süresini de içerir (Arias, 1970). Arias şiddeti (Eş. 2) yeryüzünde veya herhangi bir derinlikteki depremle ilgili deformasyonları belirlemede en büyük yatay yer ivmesine göre avantaj sağlayabilmektedir (Kayen ve Mitchell, 1997).

$$I_a = I_{xx} + I_{yy} = \frac{\pi}{2g}\int_0^{t_0} a_x^2(t)dt + \frac{\pi}{2g}\int_0^{t_0} a_y^2(t)dt \qquad (2)$$

I_a Arias şiddeti, I_{xx} yatay bileşen, I_{yy} düşey bileşen, $a_x(t)$ yatay ivme-zaman kaydı, $a_y(t)$ düşey ivme-zaman kaydıdır Sismik deformasyon ve Arias şiddeti arasında birçok bağıntı geliştirilmiştir (örneğin; Jibson, 1993; Hsieh ve Lee 2011). Bu çalışmada; statik koşullarda güvenlik sayısı 1.0 den yüksek olan şevlerde limit dengeyi sağlayan kritik yatay yer ivmesi belirlenmiştir. Karamürsel ve çevresindeki istasyonlardan alınmış kayıtlardaki en büyük yatay yer ivmeleri değerlendirilmiştir. İstasyonların inceleme alanına yakınlığı nedeniyle ivme azalım ilişkileri kullanılmamıştır. En yakın istasyonda genellikle 50 gal'den düşük değerler kaydedilmiş olup, sismik deformasyon miktarları gözardı edilecek

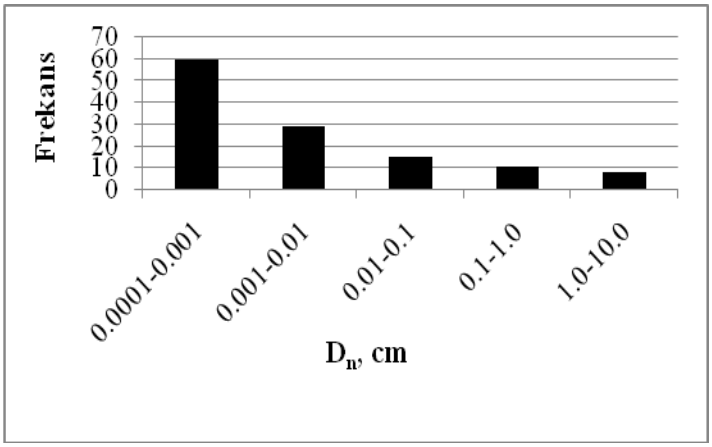
mertebededir (10^{-6} cm). Ayrıca, en yüksek değerler 17 Ağustos 1999 Marmara depreminde kaydedilmiştir. Yatay yer ivmesi ile Arias şiddeti karşılaştırıldığında anlamlılık değeri F-testi sonucuna göre %5 güvenilirlik aralığında düşük bulunmuştur. Sismik deformasyonlar (D_n) Eş.3'deki bağıntı (Hsieh ve Lee, 2011) ile belirlenmiştir.

$$logD_n = 0.802logI_a - 10.981A_c + 7.377A_c + 1.914 \pm 0.274 \quad (3)$$

İnceleme alanında Kretase flişte kayma düzlemi eğimi 33-42˚, Eosen flişte 28-37˚ ve Pliyosen kilde 20-28˚ arasında değişmektedir. Newmark (1965) yöntemine göre şevde limit dengeyi sağlayacak olan kritik ivme (A_c) Eş. 4 kullanılarak belirlenmiştir.

$A_c = (FS-1)g\sin\alpha$ (4)

FS statik güvenlik sayısı, α kayma düzlemi eğim açısı Statik duraylılık analizi sonuçlarına göre güvenlik sayısı Kretase flişte 1.24-1.38, Eosen flişte 1.19-1.26 ve Pliyosen kilde 1.20-1.29 arasında değişmektedir. Psödostatik analizlerden belirlenen kritik ivme Kretase fliş için 0.194 g, Eosen fliş için 0.168 g ve Pliyosen kili için 0.151 g olarak belirlenmiştir. Arias şiddeti ve kritik ivme kullanılarak belirlenen sismik deformasyonlarda en yüksek değer 10.302 cm' dir. Bu değer, 200.604 gal ivmeye karşılık gelmektedir. Deformasyonlar genellikle 10^{-4} ile 10^{-3} cm arasındadır (Şekil 3). Kretase fliş için en yüksek başlangıç deformasyonu 2.82 cm, Eosen fliş için 3.57 cm ve Pliyosen kili için 7.18 cm olarak belirlenmiştir. Sismik deformasyonlar kritik ivme ve Arias şiddetine göre başlangıç değerleri olup, arazide 100-300 cm arasında değişmektedir. Bu değerler mevcut şev aynalarından ve topoğrafyadan belirlenmiş olup, heyelanların geriye doğru ilerleyen türde olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 3. Toplam 126 deprem kaydına ait sismik deformasyon dağılımı

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada inceleme alanında aktif ve duraklamış toplam 38 adet kütle hareketi tespit edilerek haritalanmıştır. Bu heyelanlar gerileyen türde heyelanlar şeklinde gelişmiştir. Heyelanların tipik olanlarında geriye dönük psödostatik analizler ile kritik ivmeler belirlenmiş, sismik deformasyon hesabında kullanılacak olan pik ivme değerleri kayıtlardan seçilmiş ve aynı kayıtlardaki Arias şiddeti de hesaplanmıştır. Sismik deformasyonları belirlemek için limit ivme 50 galdir. Bu çalışmada kullanılan ivme kayıtları genelde kaya/ayrışmış kaya üzerindeki istasyonlardan alınmıştır. Psödostatik analizlerden, artık parametreler de hesaba katılarak elde edilen kritik ivme ve Arias şiddeti oranlarına bağlı olarak değerlendirme yapılmıştır. Kayıtlardan elde edilen 90-100 gal (0.1 g) için elde edilen en yüksek deformasyonlar 2.82 cm ile 7.18 cm arasında hesaplanmıştır. Arazide ölçülebilen kayma miktarı Kretase fliş için 105 cm ile 138 cm, Eosen fliş için 125 cm ile 155 cm ve Pliyosen kil için 110 cm ile 285 cm arasında ölçülmüştür. Arazide ölçülen kaymaların hesaplanandan daha yüksek olmasının sebebi tekrarlanan dinamik ve statik yüklerin etkisi ile ilgili olmalıdır

7. KAYNAKLAR

Aleotti, P and Chowdhury, R, 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58: 21– 44

Ambraseys, N.N, and Menu, J.M, 1988. Earthquake-induced ground displacements. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 16 (7):985–1006

Arias, A, 1970. A measure of earthquake intensity. In: Hansen, R.J. (Ed.), Seismic Design for Nuclear Power Plants. MIT Press, Cambridge, MA : 438–483

Bishop, A. W, 1955.The use of slip circle in the Stability Analysis of Earth Slopes. Geotechnique, 5 (1), 7-17.

Bozbey, I, Gundogdu, O, 2011. A methodology to select seismic coefficients based on upper bound ''Newmark'' displacements using earthquake records from Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31:440–451

Chen, X.L, Liu, C.G, Lin, C.X, 2014 Critical acceleration as a criterion in seismic landslides susceptibility assessment. Geomorphology 217:15-22

Çevik, E., Topal, T, 2003.GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). Environmental Geology 44 (8): 949–962

Dağ, S, Bulut, F, 2012.Cografi bilgi sistemleri tabanli heyelan duyarlilik haritalarinin hazirlanmasina bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). Jeoloji Mühendisliği Dergisi 36 (1): 35-62

Dai, F.C, Lee, C.F, 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 42: 213–238

Elgamal, A.M, Scott R.F, Succarieh, M.F, Yan, L.P, 1990. La Villita dam response during five earthquakes including permanent deformation. Journal of Geotechnical Engineering, 116:1443-1462

Ercanoglu, M, Gokceoglu, C, 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. Environmental Geology, 41: 720–730

Erendil M, Göncüoğlu MC, Tekeli O, Aksay A, Kuşçu İ, Ürgün B, Temren A (1991) Armutlu Yarımadasının Jeolojisi. MTA Raporu-9165.

Gökten, E. 2001. Altınova (Hersek deltası güneyi-Yalova) dolayının neotektonik özellikleri: ATAG 4, 1-15.

Göncüoğlu, C, 1991. Armutlu Yarımadasının Jeolojisi. MTA (no 42529). Hsieh, S.Y, Lee, C.T, 2011. Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration. Engineering Geology 122: 34–42

Janbu, N. 1968. Slope Stability Computations. Institutt for Geotknikk og Fundamenteringslære, Norges Tekniske Høgskole. Soils Mechanics and Foundation Engineering, the Technical University of Norway

Jibson, R.W, Keefer D.K, 1993. Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone. Geological Society of America Bulletin, 105: 521-536

Jibson, R.W, 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. Engineering Geology, 122: 43-50Kayen, R.E,Mitchell, J.K, 1997. Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias intensity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (12): 1162 –1174

Kramer, S., 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, 653 p.

Makdisi, F.I, Seed H.B, 1978. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. Journal of Geotechnical Engineering, 104 (7): 849–867

Mazman, T, 2005. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve istatistiksel analiz teknikleri ile Kumluca havzası (GD Bartın) heyelan duyarlılık değerlendirmesi. Çukurova Üniv FBE, 111s.

Newmark, N.M, 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15 (2): 139–160

Seed H.B, Lee K.L, Idriss, I.M, Makdisi, R, 1973. Analysis of the slides in the San Fernando dams during the earthquake of. EERC 73-2, Earthquake Engineering Research Center, UCB, Berkeley:150 p.

Süzen M.L, Doyuran, V, 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Engineering Geology,71: 303– 321

Terzaghi, K, 1950. Mechanism of landslides. In: Paige, S. (Ed.), Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume). Geological Society of America: 83-123

Varnes, D.J, 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster RL and Krizek RJ (eds), Landslides: Analysis and Control. TRB Special Report: 11–33

WP/WLI (Working Party on world landslide inventory) 1993 A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of International Association Engineering Geollogists, 47:53-57

Westen, V.C.J, 1994. GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. In: Price, M.F and Heywood D.I (Eds). Taylor and Francis, London: 135- 165

Yalçın, A, 2007. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde analitik hiyerarşi yönteminin ve CBS'nin kullanımı. Selçuk Üniv Mühendislik Mimarlık Fakültesi, 22, (3): 1-14

Kaya ve Zeminlerin Jeoteknik Özellikleri ve Kaya Kütlesi Karakterizasyonu

Kayaçların Jeoteknik Özelliklerinin Araştırılması: Doğu Pontidler Bazaltları Üzerine Örnek Bir Çalışma

The Investigation of Geotechnical Properties of Rocks: A Case Study on the Basalts of the Eastern Pontides

A.E. Babacan[1,*], K. Gelişli[1], H. Ersoy[2]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü*
[2] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*
*(*a.babacan@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Kayaçlar farklı jeomekanik özelliklere sahip olup, herhangi bir etki karşısındaki mekanik davranışları bu özellikler tarafından kontrol edilmektedir. Bu çalışmanın amacı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde geniş bir yayılım gösteren Kabaköy formasyonu (Trabzon) üzerinde seçilen bir alanda yapılan 4 adet sondajdan elde edilen karot örneklerinin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi ve indeks özellikleri arasındaki ilişkilerin ortaya konulmasıdır. Ayrıca sinyal analizi ile örnekler içerisindeki süreksizlikler ve çatlakların tespit edilmesidir. Sondajlardan alınan karotlardan kaya kalite göstergesi (RQD) değerleri, toplam karot yüzdesi ve ayrışma dereceleri belirlenmiştir. Deneyler için sondaj karotları değerlendirilerek standartlara uygun toplam 65 adet karot örneği elde edilmiştir. Karotlardan bazaltların doygun ve kuru halleri için ultrasonik hız değerleri laboratuvarda ölçülmüştür. Ayrıca, numunelerin tek eksenli sıkışma dayanımları, görünür poroziteleri, su içerikleri ve ağırlıkça su emme oranları belirlenmiştir. Tayin edilen parametreler basit regresyon analizi kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilmiş ve aralarında anlamlı bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, örneklerden elde edilen ultrasonik sinyallerin analizi de yapılmak suretiyle bazaltlar içerisindeki süreksizlikler ve mikro çatlakların varlığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Trabzon, Ultrasonik Hız, Zaman-Frekans Analizi, Dayanım, Görgül İlişki

ABSTRACT: *Rocks have different geomechnical properties and their mechanical behaviors under any mechanical impactare controlled by these properties. The aim of this study is to determine geotechnical properties of core samples obtained from four boreholes drilled in Kabaköy formation which has a wide expansion in Eastern Black Sea region and demonstrate the relationships between the index properties.In addition, cracks and discontinuities in samples are detected with signal analysis. Rock quality designation (RQD), total core recovery, weathering degree of the core samples, obtained from the boreholes, were determined. Based on the standards, a total of 65 core samples for laboratory tests were obtained from the boreholes. Ultrasonic velocities for saturated and dry samples of basalts were measured in laboratory. Moreover, the uniaxial compressive strength, apparent porosity, water saturation and water absorption in weight of samples were also determined. All parameters were correlated with each other by using the method of simple regression analysis and it was understood that there were a significant relationships between them. In this study, by analyzing ultrasonic signals obtained from core samples, the presence of discontinuities and microcracks in the basalts were defined.*

Keywords: *Trabzon, Ultrasonic Velocity, Time-Frequency Analysis, Strength, Empirical Relationship*

1. GİRİŞ

Baraj, tünel, yol gibi mühendislik yapılarının inşa edileceği alanlardaki kayaçların yapısal ve dokusal özelliklerin belirlenmesi, ileride ortaya çıkabilecek ciddi problemlerin önceden önlenmesini sağlayacak mühendislik çalışmalarının önemli girdi parametrelerindendir.Kayacın dokusu ve tane özelliği ile ilgili olarak kayaç malzemesini tanımlamaya yönelik özellikler, fiziksel özellikler olarak bilinmektedir (Yalçınalp vd., 2008). Kayaçlara ait fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi için,

ultrasonik dalga hızları birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (örn.,Kahraman, 2001; Sharma ve Singh, 2007; Babacan, 2013; Karakul and Ulusay, 2013). Ultrasonik; duyulamayan akustik dalgaların kullanımı ve üretimiyle ilgilenen akustiğin bir dalıdır (Naggy, 2001). Yöntem ilk olarak 1950'li yıllarda İngiltere'de yol araştırma laboratuvarında geliştirilmiştir (Jones ve Gatfield, 1955). Ultrasonik dalga hızları, kayaç numunelerinin yoğunluğuna ve dokusal özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Hasarsız, ucuz, hızlı ve kolay uygulanabilen yöntemlerden biri olan ultrasonik, araziden toplanan kaya numunelerinin enine ve boyuna dalga hızlarının laboratuvar ortamında belirlenmesinde uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Malzemelerin ultrasonik dalga hızlarının belirlenmesi onların elastik özelliklerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Son yıllarda ultrasonik ölçümlerden elde edilen sinyallerin analizi, ilgilenilen fiziksel bilginin belirlenmesinde çok önemli bir yöntem olmaya başlamıştır (Malinaric ve Kostial, 1998). Materyaller içerisindeki süreksizliklerden yansıyan sinyaller, süreksizliğin boyutu ve yeri hakkında bilgi sağlamaktadır (Saka vd., 1989). Sinyalin Fourier dönüşümünü almak suretiyle zaman ortamındaki veri frekans ortamına aktarılır. Ancak verinin sadece frekans ortamındaki içeriğini incelemenin yetersiz olacağı göz önüne alınarak verinin hem frekans hem de zamanla değişimine bakılması gerekmektedir. Bunun için zaman frekans analiz yöntemleri uygulanarak verinin frekans içeriğinin zamanla değişimi incelenmektedir.

Bu çalışmada, Doğu Pontidlerde yer alan Eosen-Neojen yaşlı olan andezit, bazalt ve proklastiklerden oluşan Kabaköy Formasyonunda 4 noktada yapılan sondaj çalışması sonucu elde edilen karotlardan kaya kalite göstergesi (RQD) ve bozunma dereceleri (WD) belirlenmiş ve standartlara uygun olarak hazırlanan 65 adet bazalt örneği üzerinde bir dizi laboratuar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilerek bazı görgül ilişkiler ortaya konulmuştur.

2. YÖNTEM

Ultrasonik hız ölçümleri ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. Boyuna dalga hızlarını belirlemek için farklı frekanslarda alıcı-verici problar bulunmaktadır. Bu çalışmada ise 54 kHz' lik piezoelektriksel özellikteki alıcı-vericiler kullanılmıştır. Piezoelektriksel özellik sayesinde verici probtan üretilen elektriksel sinyal mekanik titreşime dönüştürülerek kaya numunesine gönderilmekte, numune içinden geçen sinyal karşı taraftaki alıcı tarafından kaydedilmektedir. Sinyalin kaya numunesi içindeki yayılım süresinden sinyal hızı belirlenir. Sinyal hızı ölçümü yapılırken, alıcı ve verici başlıklar ile numune arasına bir jel sürülmesi ve numune ile alıcı-verici başlıklara belli bir kuvvet uygulanarak başlıkların numuneye iyi temas ettirilmesi güvenilir sonuçların elde edilmesi bakımından oldukça önemlidir. Ultrasonik ölçüm teknikleri alıcı ve vericinin numune üzerindeki pozisyonlarına göre doğrudan, yarı dolaylı ve dolaylı iletim teknikleri olmak üzere 3 farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, doğrudan iletim tekniği kullanılmıştır. Kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenirken, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır.

Materyaller içerisindeki süreksizlikler, mikro çatlaklar, boşluklar gibi heterojen yapılar ultrasonik sinyallerin analizi ile belirlenebilmektedir. Ultrasonik sinyalleri elde etmek için duyarlı bir osiloskop, hız ölçüm cihazına bağlanır ve elde edilen sinyaller sayısal olarak kaydedilir. Daha sonra kaydedilen sinyallerin zaman-frekans analizi yapılır. Zaman-frekans gösterimleri pek çok değişik uygulama için temel bir sinyal analiz aracıdır (Jones veBaraniuk, 1995). Değişik zaman-frekans analiz yöntemleri olup, bunların en yaygın olanlarından biri dekısa zamanlı Fourier dönüşümüdür (KFZD). Sinyalin kısa bir zaman penceresi boyunca sabit olduğu kabul edilirse,Fourier dönüşümü belli bir zaman içinde sinyalin frekans içeriği ile ilgili bilgi verir. Bu zaman penceresi uygun olarak seçilirse, sinyalin frekans içeriği ortaya çıkartılır. Bu iki boyutlu gösterim kısa zaman Fourier dönüşümü (KZFD) olarak adlandırılır. Matematiksel olarak ifade edilirse; w, frekansı, T ise zamanı göstermek üzere KZFD aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$KZFD_{(T,w)} = \int f(t)g(t-T)e^{-jwt}dt \quad (1)$$

Burada, f(t) zaman ortamında sinyal, g(t) pencere fonksiyonu, e^{-jwt} ise Fourier dönüşüm operatörüdür.

3. ÇALIŞMA ALANI VE GENEL JEOLOJİSİ

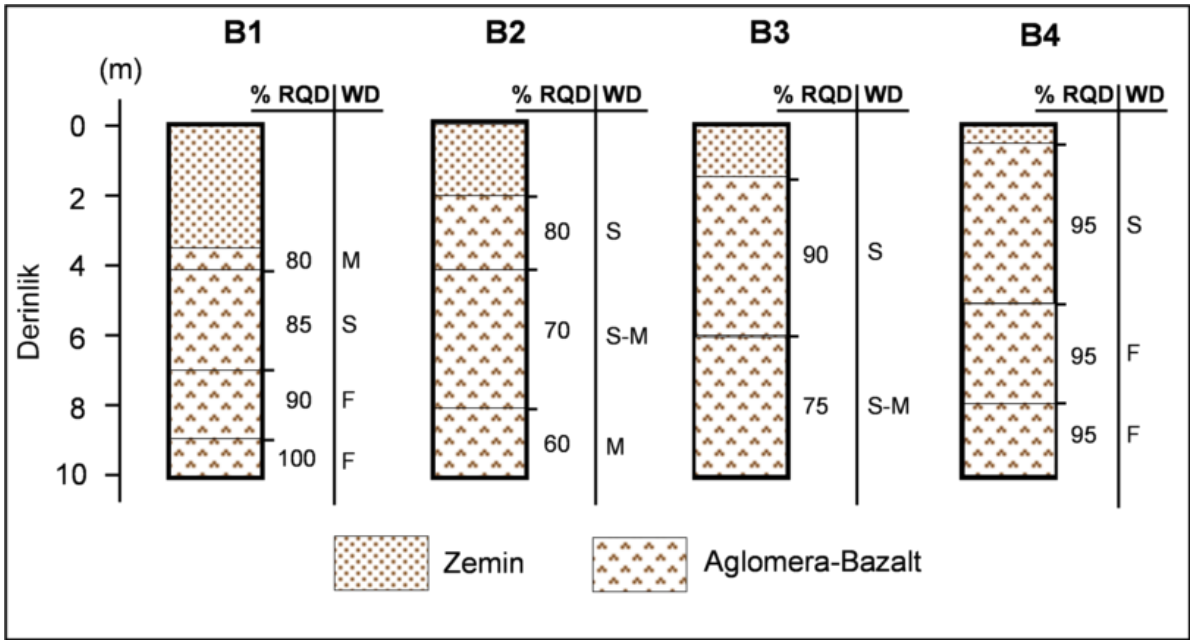
Bu çalışma, Trabzon ili sınırları içerisinde kalan Pelitli beldesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). İnceleme alanı olarak seçilen sahada çalışmalar andezit, bazalt ve piroklastik kayaçlardan oluşan Kabaköy Formasyonu üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

Şekil 1. a) Çalışma alanının yer bulduru ve b) jeoloji haritaları
(Baykan, 2011' den değiştirilerek)

Bölgede, genellikle Liyas'tan Eosen'e kadar belirli zaman aralıklarında gelişimini sürdüren magmatik faaliyetlerin ürünleri olan magmatik kayaçlar ve magmatik faaliyetlerin durduğu dönemlerde çökelen tortul istifler yaygındır. İnceleme alanlarında geniş yüzlekler veren tortul ara katkılı andezit, bazalt ve piroklastitlerden oluşan birim Güven (1993) tarafından tanımlanan Kabaköy Formasyonu ile benzer litolojik ve stratigrafik özellikler gösterdiği için aynı isimle adlandırılmıştır. Formasyona ait volkanik birimler Yomra Pelitli, Çukurçayır, Gölçayır, Kireçhane, Hacımehmet ve Bulak Mahalleleri'nde, tortul birimler ise genellikle Değirmendere vadisi boyunca, İncesu Mevkii'nde geniş yüzleklere sahiptir.

4. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

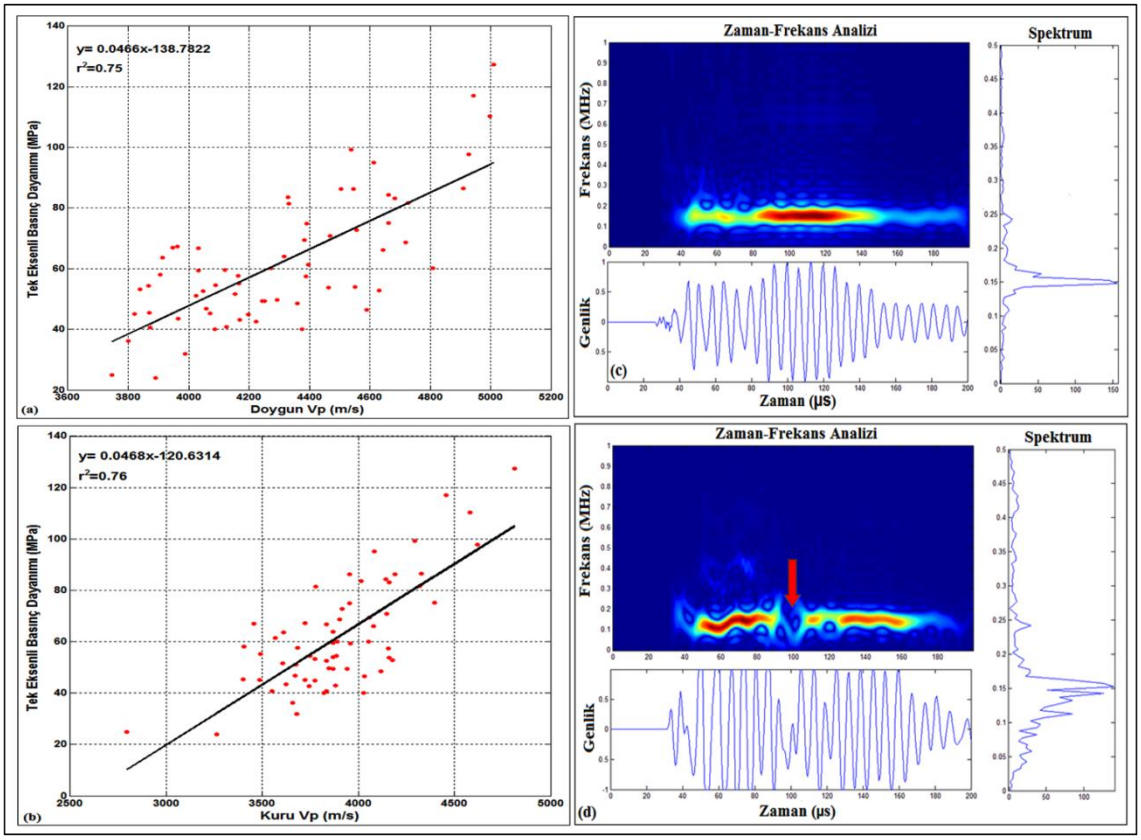
Trabzon ili Pelitli beldesinde Kabaköy formasyonu üzerinde yüzey ve çevre incelemeleri sonucu, her birinin derinliği10 m olmak üzere dört farklı noktada toplam 40 metre sondaj yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen karotlarda her bir kuyu için formasyonun ana kaya derinliği, litolojisi, toplam karot verimi, RQD değerleri ve ayrışma dereceleri belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Dört sondaja ait jeoteknik loglar (M; orta derecede bozunma, S; düşük derecede bozunma, S-M; düşük -orta derecede bozunma; F:bozunmamış-taze)

Sondajlar sonucu kesme ve düzeltme işleminden geçirildikten sonra toplam 65 adet karot örneği laboratuvar deneyleri için hazır hale getirilmişlerdir. Daha sonra en az 24 saat süreyle su ile doyurma işlemine tabi tutulduktan sonra tartılarak doygun ağırlıkları belirlenmiş ve doygun ultrasonik hızları ölçülmüştür. Daha sonra doygun numuneler etüv içersinde 24 saat 105 ^{o}C'de bekletilerek kurutulmuş ve kuru ağırlıkları ve ultrasonik hızları belirlenmiştir. Karot numunelerinin doğal, kuru ve doygun ağırlıklarından yararlanmak suretiyle görünür porozite, su içeriği ve ağırlıkça su emme oranı değerleri hesaplanmıştır. Son aşamada ise, tek eksenli sıkışma dayanımının tayini için karot numuneleri deneye tabi tutulmuştur. Doygun ve kuru P-dalga hızları (V_P) ile tek eksenli sıkışma dayanımı, görünür porozite, su içeriği ve ağırlıkça su emme oranları arasındaki ilişkiler basit regresyon analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 3a ve 3b'de örnek olarak doygun ve kuru V_P hızlarının, tek eksenli sıkışma dayanımı ile olan ilişkisi görülmektedir.

65 adet karot örneğindeki doğal mikro çatlaklar ve süreksizlikler zaman-frekans analiz ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu karotların doğal halleri için ham sinyaller sayısal olarak kayıt edilmiştir. Zaman-frekans analiz yöntemiyle incelenerek herhangi bir zaman aralığında frekans içeriğinde değişimden karot numunelerindeki mikro çatlakların ve süreksizliklerin yerleri belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 3c-d). Şekil 3c'de incelenen örnekte görüldüğü gibi ultrasonik sinyalin yapısı bozulmamış ve zaman-frekans kesitindeki genlik değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum incelenen örneğin sağlam olduğunu, neredeyse hiç mikro kırık veya çatlak içermediği anlamına gelmektedir. Şekil 3d incelendiğinde,kırmızı okla gösterilen bölgede mikro kırık veya çatlak etkisi belirgin bir şekilde genlik azalımına sebep olmaktadır. Ayrıca bu durum, sinyal formunda meydana gelen bozulma ile de uyumludur. Bazaltların zaman-frekans kesitlerine bakıldığında da sinyal formlarının bazı numunelerde oldukça bozulduğu, bazı numunelerde ise fazla bozulmadığı görülmektedir.



Şekil 3. (a-b)Doygun ve kuru $V_P$ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişki, (c-d) ham sinyal, ham sinyalin spektrumu ve ham sinyalin zaman-frekans analiz sonuçları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Doğu Pontidlerdeki yer alan Eosen-Neojen yaşlı bazaltların bazı jeoteknik özellikleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Bazaltların, ortalama ultrasonik hızlara göre orta ve iyi, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değerine göre ise orta dayanımlı bir kaya kalitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan regresyon analiz sonuçlarından ultrasonik P-dalgası hızları ile tek eksenli sıkışma dayanımı, görünür porozite, su içeriği ve ağırlıkça su emme oranları arasında yüksek oranda bir ilişkinin varlığı görülmektedir. Kayaç malzemesini mühendislik sınıflaması açısından tanımlamaya yönelik özellikler indeks özellikler olup, bunların arasında yüksek korelasyon elde edilmesi mümkündür. Doğru indeks deneylerinin seçilmesi koşuluyla, kökenine bakılmaksızın, birbirine yakın indeks değerine sahip kayaçların benzer mühendislik davranışı göstermeleri beklenir. Özellikle tek eksenli sıkışma dayanımı hem kaya mekaniği hem de mühendislik jeolojisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan parametrelerden birisidir. Fakat tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi için deney standartlarına uygun numune bulunması her zaman mümkün olmamaktadır. Ayrıca deney standartlarına uygun bulunan numunenin ise deneye uygun hale getirtilmesi için yapılan işlemler hem maddi anlamda pahalı hem de zaman olarak uzun bir süreç almaktadır. Bu nedenle basit indeks deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak özellikle mekanik özelliklerin tahmin edilmesi ile jeoteknik projelerde ön tasarım amaçlı bilgiler elde edilebilir.

Genel olarak bazalt örneklerinin zaman-frekans kesitleri incelendiğinde, karmaşık bir içyapıya sahip oldukları, bazı numunelerde mikro çatlak, boşluk gibi süreksizliklerinin çok az miktarda olmasına rağmen bazılarında ise fazla miktarda olduğu belirlenmiştir.Mekanik laboratuvar deneylerinin ayrışmamış ve çatlaksız örnekler üzerinde yapılması gerekmektedir. Bu durum gözlemselden ziyade sinyal analizleriyle belirlenmeli, standartlara uygun örnekler bu şekilde diğer örneklerden ayırt edilmelidir.

6. KAYNAKLAR

Babacan, A.E., 2013. Kabaköy formasyonuna ait volkanik kayaçların (Trabzon) mühendislik özelliklerinin sismik tomografi yöntemi ile belirlenmesi.Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,Trabzon.

Baykan, İ., 2011. Trabzon ili kırmızı killerinin jeoteknik özelliklerinin araştırılması.Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin jeolojisi ve 1/250.000 ölçekli kompilasyonu. MTA Yayınları,Ankara, 65s.

ISRM (International Society for Rock Mechanics), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization testing and monitoring.Ulusay, R., Hudson J.A (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, Kozan Ofset, 628 p.

Jones, D.L., Baraniuk,R.G., 1995. An Adaptive Optimal-Kernel time-frequency representation.IEEE Transactions on Signal Processing, 43 (10), 2361-2371.

Jones, R.,Gatfield.,E.N.,1955. Testing concrete by an ultrasonic pulse technique.DSIR Road Research Technical Paper, London.34p.

Kahraman, S, 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock.International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 981-994.

Karakul, H., Ulusay, R., 2013.Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation.Rock Mechanics and Rock Engineering, 46 (5), 981-999.

Malinaric, S.,Kostial.,P.,1998. Contribution to the signal processing of ultrasonic pulses. Journal of Physics D: Applied Physics, 31, 970-977.

Nagy, P.B., 2001. Introduction to ultrasonics. Lecture Notes. University of Cincinnati, Aerospace Engineering and Engineering Mechanics Department, 20-251-728.

Saka, M., Schneider, E., Holder, P.A., 1989.A New approach to detect and size closed cracks by ultrasonic. Research in Nondestructive Evaluation, 1 (2), 65-75.

Sharma, P.K., Singh, T.N., 2007. A correlation between P-wave velocity, impact strenght index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 17-22.

Yalçınalp, B., Ersoy, H., Ersoy, F. A., Keke, C., 2008. Bahçecik (Gümüşhane) travertenlerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 31 (2),25-34.

Isparta Yerleşimindeki Zayıf Bağlara Sahip Volkanik Zeminde Örnekleme Güçlükleri ve Dayanımın Pratik Yaklaşımlarla Tahmini

Difficulties of Sampling from a Weakly Bonded Volcanic Soil in Isparta Settlement and Estimation of its Strength Using Practical Approaches

E. Avşar[1,*], R. Ulusay[2], Ö. Aydan[3], M. Mutlutürk[4]

[1] Selçuk Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya
[2] Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara
[3] Ryukyus Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Bölümü, Okinawa, Japonya
[4] Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta
*(*elifceada@gmail.com)*

ÖZ: Isparta yerleşiminin bir kısmı Gölcük volkanizmasının ürünlerinden olan zayıf bağlara sahip bir tür volkanik zeminin üzerinde yer almakta ve bu zeminde yeni yapılar inşa edilmektedir. Bu çalışmada; bu zeminden deney standartlarına uygun şekilde karot örneklerinin alınmasının oldukça güç olması nedeniyle özel olarak yaptırılan karotiyerlerle karot alımı denemeleri yapılmış ve zeminin dayanımının belirlenmesi için pratik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu kapsamda; zeminin mineralojik-petrografik ve mikro-yapısal özellikleri araştırılmış ve ayrıca bazı fiziksel özellikleri, tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ve iğne batma indeksi (İBİ) tayin edilmiştir. UCS değerleri 29 ile 132 kPa arasında değişim gösteren volkanik zeminin içerdiği zayıf bağlayıcının volkan camının parçalanması sonucu oluşmuş bir tür volkan külü olduğu belirlenmiş ve zeminin doygunluk derecesinin (S_r) %42'yi aşması durumunda UCS'nin önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır. SEM görüntülerinden de yararlanılarak, bu davranışın zeminin su içeriğindeki artışla birlikte malzemenin yumuşaması ve taneler arasındaki bağların kopmasından kaynaklandığı saptanmıştır. Farklı kalınlıktaki iğnelerin denenmesi sonucu bu zemin için uygun olduğu belirlenen 1.7 mm kalınlığındaki iğne kullanılarak tayin edilen İBİ değerleri ile S_r'nin bağımsız değişkenler olarak seçilmesiyle elde edilen görgül ilişkiler kullanılarak UCS'nin oldukça iyi bir performansla tahmin edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Volkanik Zemin, Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, İğne Batma İndeksi, Görgül İlişki, Mikro-Yapı.

ABSTRACT: *The Isparta settlement is partly placed on a weakly bonded volcanic soil, which is one of the products of the Gölcük volcanism, and new buildings are being constructed in this soil. In this study, due to the difficulties in sampling from this soil for the preparation of test specimens of particular sizes in order to fulfil testing standards, trails were performed to obtain cores by using specially manufactured core bits and practical approaches were developed to estimate its strength. In this context, mineralogical and micro-structural features of the soil were investigated and its some physical properties, uniaxial compressive strength (UCS) and needle penetration index were determined. It was determined that the weak bonding of the soil, which has UCS values ranging between 29 and 132 kPa, is a volcanic ash formed by the disintegration of volcanic glass, and as the degree of saturation increases above approximately up to 42%, its UCS considerably decreases. By also using the SEM images, it was concluded that this behaviour was due the increased exposure to water, which apparently softens the bonding, causing some loss of interlocking among the grains. It was also found that the UCS can be inferred from the empirical relationships with a high prediction performance based the values of degree of saturation and İBİ, which were determined using a needle with a thickness of 1.7 mm.*

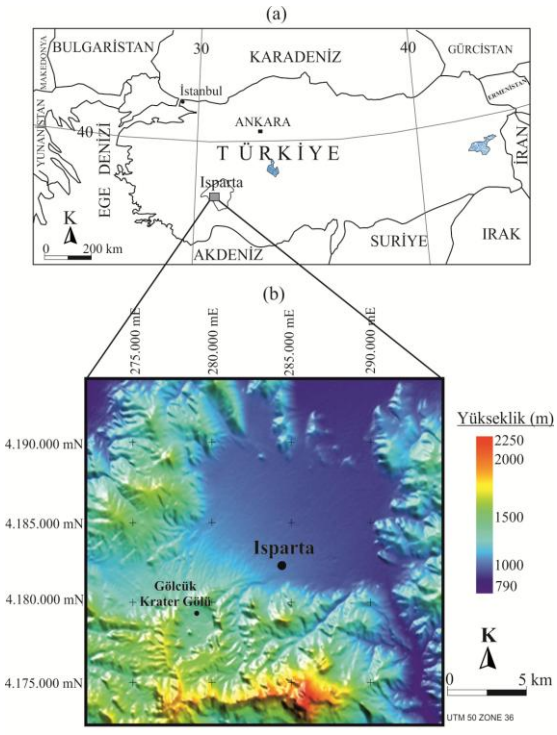
Keywords: *Volcanic Soil, Uniaxial Compressive Strength, Needle Penetration Index, Empirical Relationship, Micro-Structure.*

1. GİRİŞ

Volkanoklastik çökeller, lav akıntıları, piroklastik malzemeler, otoklastik breşler ve volkanik zeminler olmak üzere dört ana birime ayrılmaktadır. Bu birimlerden en düşük dayanıma sahip olan volkanik zeminler, volkanoklastik çökellerden itibaren çeşitli faktörlerle aşınıp depolanan ya da doğrudan

volkanik etkinlik sırasında püskürtülen malzemelerden oluşan çökellerdir. Bu tür zeminler genellikle, ince kum ve silt tane boyutunda malzemeler içeren düşük kuru birim hacim ağırlık ve yüksek gözenekliliğe sahip az pekişmiş çökellerdir. Volkanik zeminlerde başlıca; şev duraysızlıkları, zeminin doygunluk derecesine bağlı olarak dayanım ve deformasyon özelliklerinin ani olarak değişim göstermesi ve içyapı çökmesi gibi sorunlarla karşılaşılabilmektedir (O'Rourke ve Crespo 1988; Hürlimann vd. 2001; Cecconi ve Viggiani, 2000). Dünya genelinde bazı araştırmacılar volkanik ve kalıntı volkanik zeminler ile pekişmemiş güncel volkanik zeminlerin jeomekanik karakterizasyonunu (örn. Viggiani ve Cecconi, 2006; Cattoni vd., 2007) ve bu zeminlerde gelişen şev duraysızlıklarını (örn. Dai vd., 1999; Cecconi ve Viggiani, 2000; Potro ve Hürlimann, 2008) araştırmışlardır. Buna karşın, az pekişmiş volkanik zeminlerde su içeriğinin UCS üzerindeki etkisinin ve bunlardan örnek alımında karşılaşılan güçlüklerle ilgili çalışmalar oldukça sınırıdır (O'Rourke ve Crespo, 1988; Viggiani ve Cecconi, 2006; Cecconi vd., 2010). Türkiye'de gözlenen volkanik zeminlerin jeomekanik özelliklerine ilişkin bilgi ve veri ise oldukça sınırlı düzeydedir.

Isparta kent merkezinin (Şekil 1) temel zeminini Gölcük volkanizması sonucu oluşmuş ve katmanlar halinde çökelmiş tipik volkanik zemin özelliği taşıyan çökeller oluşturmakta (Şekil 2a) olup, kent merkezindeki yüksek yapı sayısı hızla artmakta ve derin kazılar yapılmaktadır (Şekil 2b). Isparta'daki volkanik zeminlerin jeo-mühendislik özellikleri ile ilgili çalışmalar (Mutlutürk vd., 2008; Totiç, 2009; Mutlutürk ve Totiç, 2010) oldukça sınırlıdır. Bu tür zeminlerde bağlayıcı malzemenin zeminin dayanımını kontrol eden önemli bir faktör olduğu dikkate alındığında, zeminin doğal haldeki dayanımının tayini için örselenmemiş örnekler gerekmektedir. Bu nedenle, söz konusu zeminlerin jeo-mühendislik karakteristiklerinin ve neden olabilecekleri mühendislik sorunlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunabilecek veriye gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmada, Isparta yerleşimindeki volkanik zeminin mineralojik, mikroyapısal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, örselenmemiş karot örneklerinin elde edilebilmesi için bazı yöntemlerin denenmesi ve tek eksenli sıkışma dayanımının iğne batma indeksinden (İBİ) kestirimine yönelik görgül ilişkilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda; volkanik zeminin gözenekliliği, birim hacim ağırlığı, doygunluk derecesi, tane boyu dağılımı, iğne batma direnci ve tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenmiş ve petrografik özellikleri ile mikro yapısının belirlenmesi için X-ışınları kırınım analizleri (XRD), ince kesit ve taramalı elektron mikroskop çalışmaları yapılmıştır.

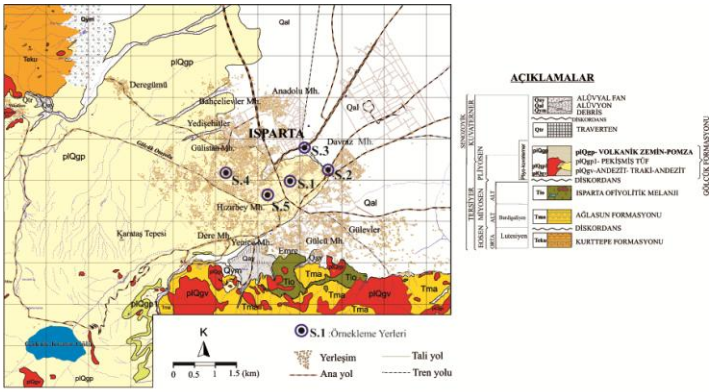


Şekil 1. (a) İnceleme alanının yer bulduru haritası ve (b) Isparta şehir merkezi ve Gölcük kraterini gösteren kabartma haritası.

Şekil 2. (a) Isparta'daki volkanik zemin ve (b) bu zeminde açılmış derin bir inşaat kazısı.

2. VOLKANİK ZEMİNİN JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Isparta Ovası ve çevresinde yer alan jeolojik birimler stratigrafik konumlarına göre Tersiyer'den Kuvaterner'e doğru filişler, ofiyolitik melanj, kumtaşları, kireçtaşları, andezitler, traki-andezitler, pekişmiş tüfler, volkanik zeminler, pomzalar, alüvyon ve alüvyon yelpazeleri şeklindedir (Şekil 3).



Şekil 3. Isparta ve çevresinin jeoloji haritası ve örnekleme yerleri (Totiç, 2009'dan değiştirilmiştir).

Gölcük volkanı Isparta yerleşiminin güneybatısında yer almakta ve içerisinde küçük bir gölün bulunduğu 2.5 km genişliğinde maar krateri ve çevresinde 150 m kalınlığındaki bir tüf konisi ile karakterize edilmektedir (Platevoet vd., 2008) (Şekil 3). Gölcük volkanoklastiklerinden az pekişmiş volkanik zeminler ve pomzalar Gölcük Gölü merkez olmak üzere, Isparta Ovası'nda geniş yayılım göstermektedirler. Bu çalışmada incelenen volkanik zemin, volkanoklastiklerin en üst seviyesini oluşturmakta ve Isparta kent merkezinde yaklaşık 11 km^{2}'lik bir alanı kaplamaktadır. İnşaat kazılarında yapılan gözlemlerde, volkanik zeminin kalınlığının yer yer 15 m'ye kadar ulaştığı görülmüştür. Volkanik zemin sarımsı kahverengi olup, içinde yarı yuvarlak-köşeli, düzensiz-küresel şekilli küçük andezit ve pomza çakılları içermektedir. Genellikle, kötü boylanma gösteren çakılların, alttan üste doğru iriden inceye derecelenmeye sahiptir.

3. ÖRNEKLEME ÇALIŞMALARI VE KARŞILAŞILAN GÜÇLÜKLER

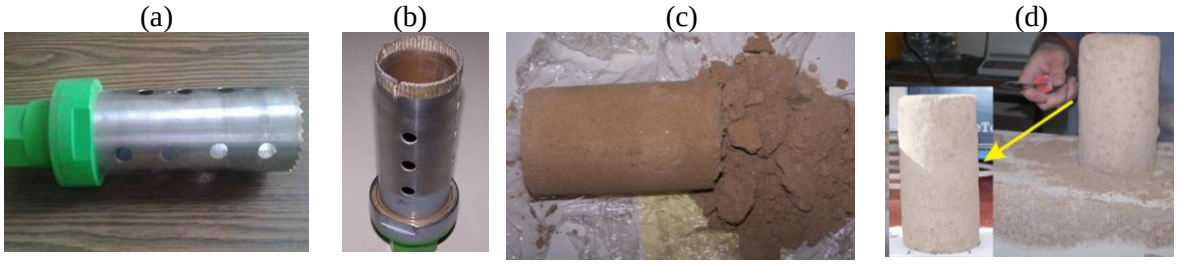
3.1. Arazide Blok ve Karot Örneklerin Alınması

Isparta şehir merkezindeki beş farklı inşaat yerindeki kazı aynalarından spatula ve keski kullanılarak örselenmemiş blok örnekler çıkarılmıştır (Şekil 3). 1 no.lu örnekleme yerinde (Isparta Ticaret ve Kültür Merkezi inşaat alanı) örselenmemiş karot örneği alınması amacıyla 2 sondaj yapılmış ve zayıf kayalardan karot alınması amacıyla tasarımlanmış olan ortadan ikiye ayrılabilen iç tüpe sahip bir karotiyer (54.7 mm) kullanılmıştır. Ancak sulu ve susuz delme işlemlerinin uygulanmasına karşın örselenmemiş karot örnekleri elde edilememiş ve zemin, içerdiği zayıf bağlayıcı malzeme nedeniyle, karotiyerlerden örselenmiş bir biçimde ve suyla temasından dolayı çamur halinde çıkarılmıştır. Ayrıca, Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait arazi örnekleme düzeneği kullanılarak, araziden alınmış bir blok örnek özel bir kalıba alınmış ve 38 mm

çaplı ve şeffaf iç tüplü özel karotiyerle karot örneği alınması denenmiştir. Ancak, taneler arası zayıf bağların kopması nedeniyle şeffaf iç tüpün içindeki örnek tamamen dağılmış, dolayısıyla bu yöntemle de karot alma işlemi gerçekleştirilememiştir.

3.2. Laboratuvarda Karot Örneklerinin Hazırlanması

Blok örneklerden laboratuvarda karot örneği alınabilmesi amacıyla, klasik karotiyerlerden farklı özelliklere sahip karot alıcılar tasarımlanmıştır. Bu amaçla, ince çeperli ve testere ağızlı bir karotiyer (Şekil 4a) ile kesici ağzına çok ince elmas vidyeler yerleştirilmiş olan oldukça ince çeperli NX çaplı (Şekil 4b) bir karotiyer daha tasarımlanarak üreticiye yaptırılmıştır. Her iki karotiyerle örselenmemiş örnek alınması denenmiş, ancak deney standartlarına veya önerilmiş deney yöntemlerine göre uygun boyutta karot örnekleri alınamamıştır. Örnekleme çalışmaları sonucunda, karot örneklerinin doğal durumlarını koruyamadığı, karot alınması sırasında malzemenin yoğrulduğu ve dağılarak parçalandığı görülmüştür (Şekil 4c). Tüm denemelere rağmen, karotiyer kullanarak volkanik zeminden deney standartlarınca önerilen niteliklere sahip örnek alınamadığından, örnekler elle traşlama yöntemiyle hazırlanmış ve yüzey paralellikleri de komparatörle kontrol edilmiştir (Şekil 4d). Bunun yanı sıra, örneklerin çap ölçümleri farklı yönlerde çok sayıda ölçüm alınarak tekrarlanmış ve tüm ölçümler eşit olana değin karot düzeltme işlemine devam edilmiştir. Böylece, standartlara/önerilmiş yöntemlere uygun niteliklere sahip düzgün karot örnekleri hazırlanmıştır.



Şekil 4. (a) Testere biçiminde kesici ağızlı ince çeperli NX karotiyer, (b) ince çeperli NX elmas karotiyer, (c) dağılmış karot, (d) traşlanarak hazırlanan karot ve yüzey paralelliğinin kontrolu.

4. VOLKANİK ZEMİNİN MİNERALOJİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİ

Volkanik zeminden hazırlanan toplam beş adet örneğin ince kesitleri mikroskop altında incelenmiş ve örneklerin hipokristalen dokuya sahip oldukları ve biyotit, hornblend, piroksen ve plajiyoklaz mineralleri ile kayaç parçaları ve pomza içerdikleri belirlenmiştir. Zemindeki hamur volkan külü olup, volkan camının parçalanması sonucu oluşmuştur. XRD çözümlemelerinin (tüm kayaç) sonuçlarına göre, volkanik zemin ana mineral olarak mika mineralleri (45-65%), feldispat (%21-35) ve kil mineralleri (0-16%) ile çok az miktarda kuvars ve dolomit içermektedir. SEM çözümlemelerinde tanelerin arasında bağlayıcı malzemenin bulunduğu ve zeminin boşluklar içerdiği görülmüş olup, volkanik zeminin açık bir mikro yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır (Şekil 5a). Bağlayıcı malzemenin tanımlanması amacıyla SEM'e monte edilmiş Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) cihazı kullanılarak mikro analizler yapılmış ve bağlayıcı malzemenin element içeriklerine ait spektrumlar elde edilmiştir (Şekil 5b). Buna göre bağlayıcı malzemenin yüksek miktarda silisyum (Si) içerdiği ve volkan camı olduğu belirlenmiştir.

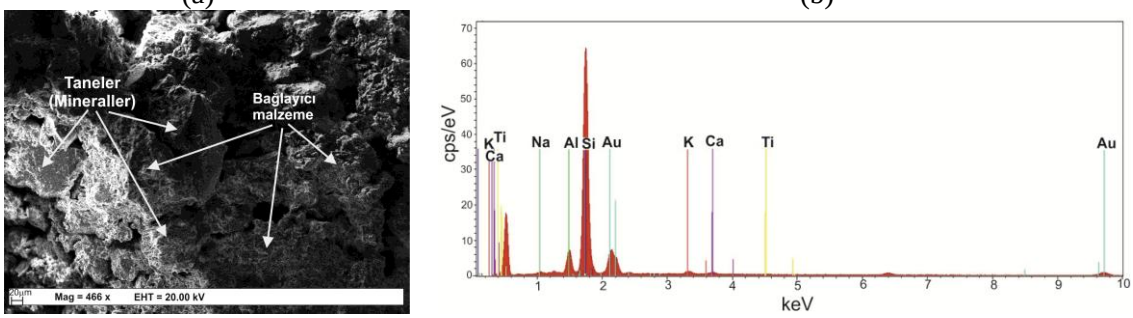
5. VOLKANİK ZEMİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ VE DAYANIMI

5.1. Fiziksel Özellikler ve İğne Batma İndeksi Tayinleri

Laboratuvar deneyleri kapsamında; toplam 45 adet volkanik zemin örneğinin su içeriği (w), doygunluk derecesi (S_r), doğal ve kuru birim hacim ağırlığı (γ_n, γ_d), gözeneklilik (n) ve özgül ağırlık (G_s) gibi fiziksel özellikleri ile İBİ değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler kullanılarak belirlenmiştir (Çizelge 1). Volkanik zeminin kuru birim hacim ağırlığı 12.4 ile 15.8 kN/m^3 ve gözenekliliği ise %33 ile %46 arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara benzer şekilde; O'Rourke ve Crespo (1988), Hürlimann vd. (2001) ve Cecconi vd. (2010) tarafından incelenen volkanik zeminler

de düşük kuru birim hacim ağırlığa ve yüksek gözenekliliğe sahiptirler. Volkanik zemin örneklerinin ağırlıklı olarak kum (52-67%) ve silt (18-33%) tane boyutunda malzeme içerdiği belirlenmiştir.

(a) (b)



Şekil 5. Örnek 1'e ait (a) SEM görüntüsü ve (b) bağlayıcı malzemenin kimyasal içeriğini gösteren spektrum (Al:Alüminyum, Au:Altın, Ca:Kalsiyum, K:Potasyum, Na: Sodyum, Si: Silisyum).

Çizelge 1. Volkanik zeminin fiziksel ve dayanım özellikleri

w (%)	S_r (%)	G_s	γ_d (kN/m^3)	γ_n (kN/m^3)	n (%)	İBİ (N/mm)	UCS (kPa)
4-25	14-83	2.35-2.65	12.4-15.8	14.0-16.7	33-46	1.2-6.5	29-132
(9.3)	(33.5)	(2.45)	(14.3)	(15.3)	(40)	(4)	(81.6)

w: Su içeriği, S_r: Doygunluk derecesi; G_s: Özgül ağırlık; γ_d: Kuru birim hacim ağırlık; γ_n: Doğal birim hacim ağırlık; n: Gözeneklilik; İBİ: İğne batma indeksi; UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı; parantez içinde verilenler ortalama değerlerdir.

UCS için deney standartlarına uygun örneklerin hazırlanmasıyla ilgili yaşanan güçlük dikkate alınarak, UCS'nin İBİ'den kestiriminin araştırılması amacıyla örnek hazırlamayı gerektirmeyen ve pratik bir yöntem olan iğne batma deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, SH-70 model iğne batma ölçer aleti kullanılmıştır (Şekil 6a). Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda bu deney, ISRM'nin önerdiği deney yöntemlerinden biri olmuştur (Ulusay vd., 2014; ISRM, 2014). Kent içindeki inşaat kazılarında ve laboratuvarda blok örnekler üzerinde (Şekil 6b) 120 adet iğne batma deneyi yapılmıştır. Volkanik zeminin dayanımının, aletin 0.84 mm çapındaki mevcut iğnesi kullanılarak belirleyebildiği dayanım sınırları içinde olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, farklı çaplarda iğneler (1.7, 2, 2.3, 2.5, 3 mm) tasarımlanarak üretilmiş ve sınama amacıyla yapılan iğne batma deneylerinde en iyi performansı 1.7 mm çaplı iğnenin gösterdiği belirlenmiştir. Bu iğne kullanılarak deneyler yapılmış ve daha sonra $İBİ_{(1.7)}$ değeri tayin edilen her bloktan birer adet karot örneği elde edilmiştir. Volkanik zeminin $İBİ_{(1.7)}$ değerleri 1.2 N/mm ile 6.5 N/mm arasında değişim göstermektedir (bkz. Çizelge 1).

(a) (b)

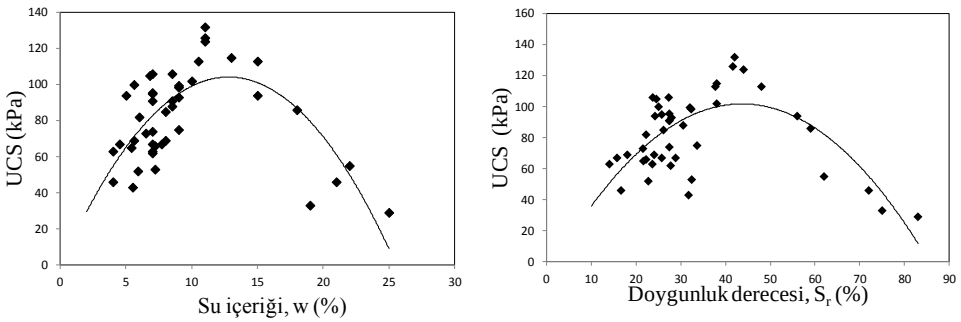
Şekil 6. (a) Maruto Co. (2006) tarafından üretilmiş olan iğne batma ölçer ve (b) bloklarda üzerinde iğne batma deneyinin uygulanması.

5.2. Volkanik Zeminin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Farklı nem içeriğine sahip örneklerde ISRM (2007)'ye göre yapılan UCS deneyleri sonucunda 45 adet zemin karotunun UCS değerlerinin 29 ile 132 kPa arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir (bkz. Çizelge 1).Volkanik zeminin ortalama UCS değeri 81.6 kPa olup, Shaffi-Rad ve Clough (1982) tarafından kumlu zeminler için önerilen sınıflamaya göre, bu çalışmada incelenen volkanik zemin "az

pekişmiş (orta dayanımlı) zemin" olarak sınıflandırılmıştır. Deneylere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri incelendiğinde, 42 adet volkanik zemin örneğinde birim deformasyon yumuşaması davranışı, diğer 3 örnekte ise kırılgan davranış gözlenmiştir. Bağlayıcı malzemenin zayıf tutucu bir karakterde olması nedeniyle, volkanik zemin kuruduğunda kolaylıkla dağılabilen (ufalanan) bir özelliğe sahiptir. Bunun yanı sıra, çalışma süresince özellikle yaz döneminde yapılan gözlemlerde inşaat kazılarında zeminin yüzeyden itibaren kuruyarak yer yer kum şeklinde döküldüğü ve kazı topuğunda biriktiği gözlenmiştir. Zeminin su içeriği yükseldikçe dayanımında bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, örnekler tümüyle su içine konulduklarında ya da nem odasında bekletilerek tam doygun hale getirildiklerinde dağılmakta ve çamur kıvamına dönüşmektedirler. Söz konusu hususlar dikkate alınarak, w ve S_r ile UCS arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır. Doğal su içeriğine sahip 38 karotun su içerikleri %4 ile %13 ve doygunlukları %14 ile %40, nem odasında tutulan diğer 7 karotun su içerikleri ve doygunluk dereceleri ise sırasıyla %15 ile %25 ve %48 ile %83 arasında değişim göstermektedir. Bu iki özellik ile UCS arasındaki ilişkiyi ikinci dereceden polinom olan eğrisel eşitliklerin temsil ettiği belirlenmiştir (Şekil 7a-b).

Şekil 7a-b'deki ilişkilere göre, w ve S_r değerlerinin sırasıyla %11 ve %42'yi aşması halinde UCS belirgin şekilde azalmaktadır. Bu durum zeminin içerdiği kilin ve bağlayıcı malzemenin suyun etkisiyle yumuşaması ve buna bağlı olarak taneler arası bağların kopmasıyla ilişkilendirmiştir. Buna benzer bir ilişki, bu çalışmada incelenen volkanik zeminlerle benzer özellikler taşıyan And Dağları civarındaki volkanik zeminleri inceleyen O'Rourke ve Crespo (1988) tarafından da elde edilmiştir. Isparta kent merkezinde yerel olarak gelişebilecek alt yapı arızaları (su borularının patlaması vb. gibi), ya da aşırı yağışlara bağlı olarak su içeriğinin ya da doygunluk derecesinin yukarıda belirtilenden daha yüksek değerlere çıkması gibi genellikle beklenmeyen durumlar için UCS'deki azalma dikkate alınmalıdır.



Şekil 7. Volkanik zemin örneklerine ait (a) w(%) – UCS ve (b) S_r (%) - UCS arasındaki ilişkiler.

6. TEK EKSENLİ SIKIŞMA DAYANIMININ TAHMİNİ İÇİN GÖRGÜL İLİŞKİLER

Isparta'daki volkanik zeminlerden standartlara ve/veya önerilmiş yöntemlere uygun boyutlarda örselenmemiş deney örneklerinin alınması konusunda önemli sınırlamalar söz konusu olup, zeminin UCS'sinin doğrudan tayini oldukça güçtür. Bu durum dikkate alınarak UCS'nin kestirimi amacıyla; $İBİ_{(1.7)}$ (N/mm) değerleri ile UCS (kPa) arasındaki ilişki incelenmiş ve bu iki özellik arasında yüksek bir belirleme katsayısına (R^2=0.724) sahip doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (Eş.1) (Şekil 8a).

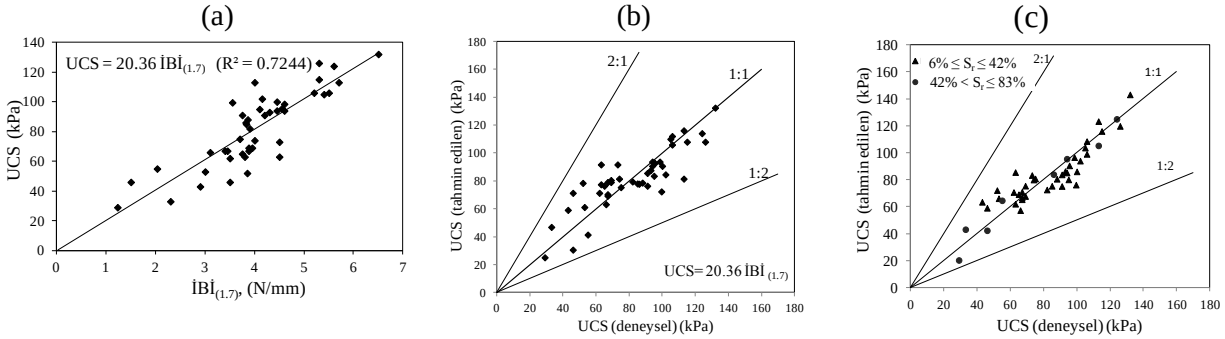
$$UCS = 20.36*(İBİ_{(1.7)}) \qquad (R^2=0.724) \qquad (1)$$

Eş. 1'deki ilişkiden kestirilen UCS ile deneysel olarak tayin edilen UCS değerleri Şekil 8b'deki grafikte karşılaştırılmıştır. Eş.1 kullanılarak kestirilen değerlere ait veri noktalarının 1:1 çizgisine oldukça yakın olarak konuşlandığı görülmektedir. Dolayısıyla önerilen eşitlik kullanılarak, UCS'nin çok düşük bir hata payı ile kestirilebileceği anlaşılmaktadır. Volkanik zeminin doygunluk derecesinin (S_r) artmasına koşut olarak UCS'nin azalması; S_r'nin UCS üzerinde etkili bir parametre olduğunun göstergesidir. Bu nedenle, UCS'nin kestirimi için $İBİ_{(1.7)}$ ve S_r'nin bağımsız değişkenler olarak kullanıldığı çok değişkenli doğrusal regresyon analizleri de yapılmıştır. Bu analizlerde; UCS üzerinde belirgin bir etkisi olan doygunluk derecesinin kritik değeri S_r=%42 de dikkate alınarak, UCS'nin bu iki özellik kullanılarak kestirilebileceği iki adet görgül ilişki elde edilmiştir (Eş. 2 ve Eş. 3).

$6 < S_r(\%) \leq 42$: $UCS = -25.34 + 19.12\ İBİ + 1.05S_r$ ($R^2 = 0.77$) (2)

$42 < S_r(\%) \leq 83$: $UCS = 161.14 + 7.78\ İBİ - 1.81S_r$ ($R^2 = 0.96$) (3)

Eş. 2 ve 3'ten tahmin edilen UCS ile deneysel olarak tayin edilen UCS değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 8c), belirleme katsayıları oldukça yüksek olan bu eşitliklerden kestirilen UCS veri noktalarının 1:1 çizgisine oldukça yakın olarak dizildikleri görülmektedir. Buna göre, volkanik zeminin UCS değeri, görgül modellerle iyi bir performansla tahmin edilebilmektedir. Bu eşitliklerin regresyon katsayılarının önemlilik dereceleri t- ve F-testleriyle de kontrol edilmiş ve modellerin F değerleri; $6 < S_r(\%) \leq 42$ ve $42 < S_r(\%) \leq 83$ koşulları için sırasıyla, 55.731 ve 64.576 olup, bunlara karşılık gelen anlamlılık düzeyleri (p değerleri) 0.001 olarak belirlenmiştir. p değerleri α=0.05 yanılma düzeyinden küçük olduğu için, en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, önerilen modellere ait t değerlerine karşılık gelen anlamlılık düzeyleri (p), α=0.05 yanılma düzeyinden küçük ve regresyon katsayılarının sıfırdan farklı olup, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişkilerin olduğu belirlenmiştir. F- ve t- testleri sonucunda; $İBİ_{(1.7)}$'nin UCS'nin kestiriminde kullanılabilecek güvenilir bir parametre olduğu anlaşılmış ve iki bağımsız değişkenin birlikte kullanıldığı çok değişkenli regresyon analizleri ile elde edilen modellerin (Eş.2 ve 3), performansının basit regresyondan elde edilen eşitlikten (Eş.1) daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra, S_r'nin tayini ve iğne batma deneyleri kolaylıkla uygulanabilen pratik deneyler olduğundan, önerilen modeller kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 8. (a) UCS ve $İBİ_{(1.7)}$ arasındaki doğrusal ilişki, (b) Eş. 1 ve (c) Eş. 2 ve Eş. 3'ten tahmin edilen ve deneylerde belirlenen UCS değerlerinin karşılaştırılması.

7. SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda; incelenen volkanik zeminin yüksek gözenekliliğe ve düşük kuru birim hacim ağırlığa sahip ve içerdiği zayıf bağlayıcı malzemenin volkan camının parçalanmasıyla oluşmuş bir tür volkan külü olduğu belirlenmiştir. Volkanik zeminde karşılaşılan en önemli sınırlama, örselenmemiş karot örneklerinin alınmasıdır. Bu nedenle, UCS'nin İBİ'den kestirebilmesi amacıyla penetrometrenin iğnesi modifiye edilmiş ve 1.7 mm çapındaki iğnenin bu zemin için uygun olduğu saptanmıştır. Volkanik zeminde $İBİ_{(1.7)}$ değerlerinin 1.2 ile 6.5 N/mm ve farklı nem içeriklerine göre UCS'nin 29 ile 132 kPa arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Doygunluk derecesi ile UCS arasındaki eğrisel ilişkiye göre, doygunluk derecesinin %42'yi aşması durumunda UCS önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durum, volkanik zemindeki zayıf bağların suyun etkisiyle yumuşamasına koşut olarak taneler arası bağların kopmasıyla ilişkilendirmiştir.

Basit regresyon analizleri, volkanik zeminin UCS ile belirlenen $İBİ_{(1.7)}$ değerleri arasında anlamlı bir ilişkinin ve $İBİ_{(1.7)}$'nin volkanik zeminin UCS değerlerinin kestirimi için güvenilir bir parametre olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, çok değişkenli doğrusal regresyon analizlerinde $İBİ_{(1.7)}$ ve S_r'nin bağımsız değişkenler olarak birlikte kullanılması halinde üretilen tahmin modellerinin daha yüksek belirleme katsayılarına sahip oldukları ve UCS'nin kestirimi için daha yüksek performans gösterdikleri belirlenmiştir. Ayrıca, Türkiye'de ve diğer ülkelerdeki az pekişmiş volkanik zeminlerin UCS değerlerinin pratik bir şekilde tahmini için penetrometre iğnesinin modifiye edilerek kullanılmasının uygun olacağı da anlaşılmıştır.

8. KATKI BELİRTME

Yazarlar; sağladığı maddi destek için Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne, saha çalışmalarındaki yardımları için Emre Balcıoğlu, Onur Köroğlu, Yunus Koku ve Fatih Adil'e, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden mobil örnekleme cihazının kullanılmasında yardımcı olan Mehmet Ekmekçi'ye, ince kesit ve SEM çözümlemelerinde destek veren öğretim elemanları Erdal Şen ve Lütfiye Akın ile saha ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen laboratuvar teknisyenleri Ahmet Bay ve Özgür Erol'a içten teşekkürlerini sunarlar.

9. KAYNAKLAR

Cattoni, E., Cecconi, M., Pane, V., 2007. Geotechnical properties of an unsaturated pyroclastic soil from Roma. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 403–414.

Cecconi, M., Viggiani, G.M.B., 2000. Stability of sub-vertical cuts in pyroclastic deposits. GeoEng 2000: International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, Paper No. SNES0558 (CD'de).

Cecconi, M., Scarapazzi, M., Viggiani, G.M.B., 2010. On the geology and the geotechnical properties of pyroclastic flow deposits of the Colli Albani. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69, 185–206.

Dai, F., Lee, C.C., Wang, S., Feng, Y., 1999. Stress–strain behaviour of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures. Engineering Geology, 53, 359–370.

Hürlimann, M., Ledesma, A., Marti, J., 2001. Characterisation of a volcanic residual soil and its implications for large landslide phenomena: application to Tenerife, Canary Islands. Engineering Geology, 59, 115–132.

ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (Eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.

ISRM, 2014. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. R. Ulusay (Ed.) Springer, Berlin.

Maruto Testing Machine Company, (1999). Instructions for SH-70 penetrometer (Nangan-Penetorokei), Tokyo (Japonca).

Mutlutürk, M., Totiç, E., 2010. Isparta ovası volkanik zeminlerinin mühendislik özellikleri. 63. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, Ankara, s.138.

Mutlutürk, M., İsmailov, T., Balcı, V., 2008. Isparta volkanik zeminlerinin çökme potansiyeli, 61. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özleri, Ankara, 276-278.

O'Rourke, T.D., Crespo, E., 1988. Geotechnical properties of cemented volcanic soils. Journal of Geotechnical Engineering,114(10), 1126–1147.

Platevoet, B., Scaillet, S., Guillou, H., Blamart, D., Nomade, S., Massault, M., Poisson, A., Elitok, Ö., Özgür, N., Yağmurlu, F., Yılmaz, K., 2008. Pleistocene eruptive chronology of the Gölcük volcano, Isparta Angle, Turkey. Quaternaire, 19(2), 147–156.

Shafii-Rad, N., Clough, G.W., 1982. The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands. John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 59, Stanford, California.

Totiç, E., 2009. Isparta Ovası'ndaki volkanik kökenli zeminlerde fiziksel ve mekaniksel özellikler arasındaki ilişkilerin araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Anabilim Dalı, Isparta.

Ulusay, R., Aydan, Ö., Erguler, Z.A., Ngan-Tillard, D.J.M., Seiki, T., Verwaal, W., Sasaki, Y., Sato, A., 2014. ISRM suggested method for the needle penetration test. Rock Mechechanics and Rock Engineering, 47, 1073-1085.

Viggiani, G.M.B., Cecconi, M., 2006. Pyroclastic flow deposits from the Colli Albani: the example of the Pozzolana Nera. In: Phoon, K.K., Hight, D.W., Leroueil, S., Tan, T.S. (Eds.), Proceedings of the Second International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore, Vol. 2. Taylor & Francis, Singapore, 2411–2447.

Kaya Malzemelerinin Dolaylı (Brezilyan) Çekilme Dayanımı Deneyinde Farklı Yükleme Düzeneklerinin Kullanımı

The Use of Various Loading Apparatus in Indirect (Brazilian) Tensile Strength Test of Rock Materials

E. Kömürlü[1,*], A. Kesimal[1], F.S. Ozkan[2]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye*
[2] *Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye*
*(*ekomurlu@ktu.edu.tr; erenkomurlu@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, 8 farklı kaya malzemesine ait 100'den fazla numune üzerinde dolaylı çekilme dayanımı deneyi (Brezilya deneyi) uygulanmıştır. Standart olarak önerilen 8,1 cm yay çapına sahip çene ve düz platen kullanımına alternatif olarak, disk ile aynı çapa sahip ve temas açısı sabit olan farklı çeneler alternatif olarak test edilmiştir. Standart çene altında çoğu numune ideal yenilme şekli göstermemiş, düz platen ile yüklenen numunelerde ise düşey çap boyunca ideal yenilme şekli gözlenmiş olmakla beraber, genellikle temas bölgesinde oluşan sıkışma gerilmeleri neticesinde ilk çatlak oluşumları gelişmiştir. Bu durum deneyin geçersiz olmasına sebebiyet veren önemli bir olgudur. Bu çalışma kapsamında, farklı yükleme düzeneklerinin dolaylı çekilme dayanımı tayinlerinde kullanılan numunelerin kırılma toklukları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Temas açısı artışıyla ilk çatlak verilen yük seviyesinin ve ilk çatlak ile yenilme gerilmeleri arasındaki yük farkının artış göstermesi nedeniyle yanıltıcı dayanım değerlerinin dikkate alınabileceği gözlenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, ideal temas açısı ve yükleme düzeneğinin kaya malzemesi türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, standart bir çenenin tüm kaya malzemelerinin dolaylı çekilme dayanımı tayinlerinde kullanılmaması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çekilme Dayanımı, Dolaylı Çekilme Dayanımı, Brezilya Testi, Yükleme Çeneleri

ABSTRACT: *In this study, the indirect tensile strength (ITS) of more than 100 disc specimens for 8 different rock types was determined. Steel loading arcs with various contact angles and flat platens were used in experiments to investigate whether they can be used as alternatives for standard Brazilian jaws that have 8.1 cm arc diameter. Many of the disc specimens tested under the standard jaws did not show ideal failure pattern, whereas simple splitting cracks were obtained along the vertical diameter of most of the discs tested under the flat platens. However, flat platens caused cracks initiated in the compressive zone just under the loading points. This is an important outcome for criticizing the validity of the test. In this study, the effects of different loading apparatus on fracture toughness of rock disc specimens were evaluated. Because of increasing in both load level for crack initiation and load difference between failure stress and first cracking stress, misleading strength values could be obtained with increase of the contact angle. It was understood that ideal contact angle and loading apparatus differ depending on rock type. Therefore, the standard Brazilian jaws are not recommended to be used for all rock types to determine the ITS.*

Keywords: *Tensile Strength, Indirect Tensile Strength, Brazilian Test, Loading Apparatus, Jaws*

1. GİRİŞ

Brezilya deneyi (dolaylı çekilme dayanımı deneyi) sağladığı pratiklik nedeniyle yaygın şekilde uygulanan bir deney yöntemidir. Deney Brezilyalı Profesör Fernando L.L.B. Carneiro tarafından geliştirilmiştir. Önemli bir beton danışmanı olan Profesör Carneiro danışmanlık yaptığı bir çalışmada eski bir kilisenin beton silindirler üzerinde yürütülerek taşınması esnasında yüklenen silindirlerin düşey çapları boyunca çatladığını görünce Brezilya testinin geliştirilmesi için önemli bir bulguya sahip olmuştur. Silindirik beton numunelerinin çapsal sıkışma nedeni ile oluşan çekilme gerilmeleri altında

test edilmesine yönelik geliştirdiği deneysel yöntemini ilk kez 1943 yılında paylaşmıştır (Carneiro, 1943; Fairbairn ve Ulm, 2002). Carneiro (1943) tarafından deney yönteminin geliştirilmesinden 2 ay sonra Japonya'lı bilim adamı Tsunei Akazawa, aynı yöntem ile yarmada çekilme dayanımı deneyini doktora tezi olarak yayınlamıştır (Akazawa, 1943).

Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) tarafından1978 yılında önerilen dolaylı çekilme dayanımı deney yöntemi olan ve yaygın adı ile Brezilya deneyi olarak bilinen yarmada çekilme dayanımı deneyi ile kaya malzemelerinin dolaylı çekilme dayanımı (σ_{tB}) değeri Eşitlik 1'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (ISRM, 1978; ISRM, 2007):

$$\sigma_{tB} = -\frac{2P}{\pi dt} \tag{1}$$

Burada, d ve tsırasıyla, kaya malzemesi disk numunesinin çapı (mm) ve kalınlığı (mm) olup,P ise numuneye uygulanan yüktür (N). Eşitlik 1 çapsal olarak yüklenen çizgisel yük altındaki disklerin gerilme dağılımını veren Muskhelishvili denklemlerinden türetilmiştir (Muskhelishvili, 1963). Maksimum çekilme gerilmesinin düşey çap üzerinde ve disk merkezinde oluşması sebebiyle yenilmenin disk merkezinden başlaması beklenmektedir.

Standart Brezilya deneyi çenesi (yükleme düzeneği) iç bükey ve 8.1 cm çapına sahip bir yay şeklinde numune ile temas sağlamaktadır. Yüklemenin devam etmesiyle disk ve çene arasında çizgisel olarak kabul edilemez derecede yüksek temas alanları oluşmaktadır (Jaeger ve Cook, 1976). Özellikle deformasyona yüksek derecede müsaade edebilen yumuşak kaya malzemeleri için temas koşullarını çizgisel olarak dikkate almak dolaylı çekme dayanımı tayinlerinde yanlış değerlerin ölçülmesine yol açmaktadır. Aono vd. (2012) ve Kömürlü ve Kesimal (2012) standart çene ile benzer olarak düz platen kullanımı ile de pek çok kaya malzemesi için temas koşulunun çizgisel olarak kabul edilemeyeceğini belirtmişlerdir. Değişen kaya malzemelerinin deformasyon özelliklerine bağlı olarak standart çene ve düz platen gibi temas açısı belirli olmayan yükleme aparatları altında ölçülen değerler etkilenmektedir.

Temas açısı (2α) bilinen ve temas yüzeyi üzerinde düzgün dağılım gösteren radyal gerilme altındaki diskler için Hondros (1959) tarafından gerilme dağılımı bağıntıları önerilmiştir. Ancak, standart çene ile yapılan yükleme koşullarında belirli bir temas açısı değeri bulunmaması nedeniyle Hondros bağıntılarının bu koşullar için kullanımı uygun olmamaktadır. Hondros (1959), pratik olarak temas açısı 11^o'denküçük olduğunda ($2\alpha < 11^o$) disk içerisindeki gerilme dağılımlarının çizgisel yükleme koşulları ile pratik olarak aynı kabul edilebileceğini önermiştir. Ancak, standart çenenin kaya malzemesi türüne bağlı olarak çoğu zaman daha yüksek değerlerde temas alanına sahip olduğu bilinmektedir. Kömürlü vd. (2015) farklı kaya malzemeleri için standart çene ile disk temas açısının tipik olarak 10^o – 30^o aralığında değişmekte olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar son yıllarda disk ile aynı çapa sahip temas açısı belirli olan yükleme düzeneklerinin kullanımını incelemektedirler. Erarslan ve Williams (2012), Kömürlü ve Kesimal (2014), Kömürlü vd. (2015) sabit temas açısına sahip yükleme düzenekleriyle daha iyi sonuç alınabileceğini, ancak numunelerin kırılma tokluğunun temas açısına bağlı olarak önemli ölçüde değişim gösterdiğini ve yüksek temas açıları altında ilk çatlak ve yenilme arasında önemli yük farklarının oluşabileceğini belirtmişlerdir.

Yükleme düzenekleri ve disk arasında oluşan sürtünme kuvvetlerinin de çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemeleri üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Kourkoulis vd., 2013; Markides ve Kourkoulis, 2013; Lanaro vd., 2009). Disk üzerine düzgün (uniform) dağılıma sahip radyal gerilmeler etkidiği takdirde, sürtünmelerin disk merkezindeki etkisi pratik olarak göz ardı edilebileceği, ancak temas alanının altında oluşan sıkışma bölgesinden başlayan yenilmelere yol açabileceği bilinmektedir. Öte yandan, Markides vd. (2012) tarafından, düzgün dağılıma sahip olmayan radyal gerilmeler altında disk numunesinin her konumda gerilme dağılımlarının etkilendiği ve temas alanındaki radyal gerilmelerin genellikle düzgün olarak dağılmadığı belirtilmiştir. Markides vd. (2012; 2010) veKourkoulis vd. (2013) temas alanındaki sürtünme ve gerilmelerin disk içinde oluşan gerilme dağılımları üzerindeki etkilerine yönelik detaylı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Kaya ve beton gibi gevrek malzemelerin sıkışma dayanımlarının çekilme dayanımlarına kıyasla oldukça yüksek olması nedeniyle yarmada çekilme dayanımı deneyi numunesi merkezinden (maksimum çekilme gerilmesi bölgesinden) başlayan geçerli yenilmeler gözlenebilmektedir. Ancak, sıkışma dayanımının çekilme dayanımına olan oranının (σ_c/σ_t) azalması, temas alanı ve yakınlarında oluşan sıkışma gerilmeleri nedeniyle çekilme dayanımının tayini için geçersiz yenilmeler gözlenebilmektedir (Fairhurst, 1964).

Brezilya deneyi için numune kalınlığı dikkate alınması gereken diğer bir değişkendir. Disk kalınlığı arttıkça aynı yük/kalınlık oranı şartlarında yenilme bölgesindeki gerilme yoğunlukları da artmaktadır. Bu sebeple, kalınlık artışıyla daha az oranda yük artışı ve daha düşük çekilme dayanımı değerleri ölçülmektedir (Yu vd., 2006; Kömürlü ve Kesimal, 2012). ISRM tarafından önerilen deney yöntemine göre disk kalınlığının çapına oranının 0,5 ve 1 arasında olması gerekmektedir.

Brezilya deneyi diski düşey çap doğrultusunda oluşan radyal gerilmeler ve yatay çap doğrultusunda oluşan teğetsel gerilmeler kontrolünde yenilme gösterdiği için, tayin edilen dayanım değerleri tek eksenli çekilme dayanımını temsil etmemektedir. Radyal gerilmelerin çekilme dayanımına olan etkilerinin malzeme özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermesi deney açısından önemli bir dezavantajdır (Chen ve Stimpson, 1993; Kömürlü, 2012).

Bu çalışmada,yukarıda verilen bilgiler ışığında kaya malzemesinin deformasyon karakterinin farklı yükleme düzenekleri ile elde edilen dolaylı çekilme dayanımı değerleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

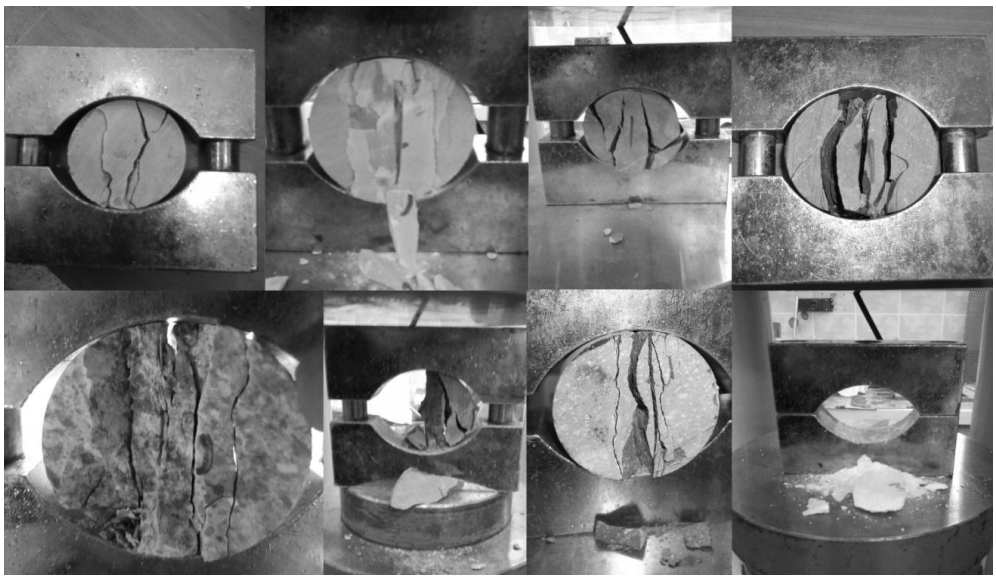
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

NX çapında karotiyer kullanılarak hazırlanmış farklı kaya malzemelerine ait disk numuneleri standart çene, düz platen, temas açısı 15° ve 30° olan farklı sabit temas açısına sahip yükleme düzenekleri kullanılarak test edilmiştir. Standart çene altında yenilen malzemelerin çoğu düşey çap boyunca ideal yenilme şekli göstermeyerek ve birden çok dağınık çatlak serileri sergileyerek yenilmişlerdir. Standart çene altında yenilen bazı kaya malzemelerinde çok sık çatlaklar gözlenmiştir. Kömürlü ve Kesimal (2012), benzer bir çalışmayı granit, andezit, dasit, riyodasit ve mermer numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş ve bu çalışmaya paralel olarak ideal olmayan yenilme şekilleri gözlemlemişlerdir (Şekil 1).

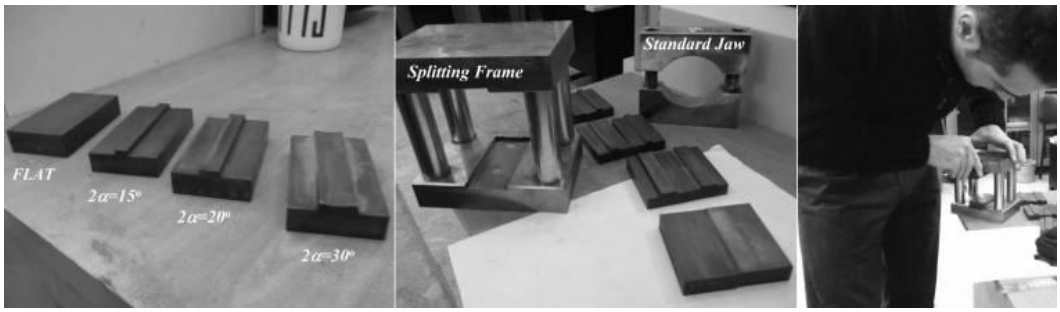
Testlerde yükleme hızı ISRM tarafından önerildiği üzere 0.2 kN/saniye olarak seçilmiştir (ISRM, 2007). Deneysel sonuç tablolarında numunelere ait ortalama değerler verilmektense numune kalınlıklarının etkisinin görülmesi açısından değerler açıkça yazılmıştır. Testlerde kullanılan ISRM tarafından önerilmiş standart sertlik değerlerine sahip çelikten üretilmiş olan farklı yükleme düzenekleri Şekil 2'de görülmektedir. Bu çalışmada Giresun ilindeki Lahanos bakır madeninden dasit ve cevher numuneleri, Bayburt ilinden tüf numuneleri, Gümüşhane ilinden kireçtaşı numuneleri ve Karadeniz bölgesine ait farklı kireçtaşı, andezitik bazalt ve marn numuneleri farklı yükleme düzenekleri kullanılarak test edilmiştir (Çizelge 1-3).

Genellikle ilk çatlak ve yenilme yükleri arasındaki farkın temas açısı artışı ile artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3'te 30° temas açısına sahip yükleme düzeneği altında çatlak oluşumu gözlenen, ancak ilk çatlak oluştuktan sonra %28 yük artışına müsade eden bir andezitik bazalt numunesi görünmektedir. Bu görüntü ilk çatlak oluşumundan hemen sonra fotoğraflanmıştır. Bu disk,bu çalışma kapsamında yenilme ve ilk çatlak oluşumu yük değerleri arasında en büyük farka sahip olan numune özelliğini taşımaktadır.

Düz platen altında genellikle numuneler düşey çapları boyunca yarılma çatlağı göstererek yenilmişlerdir. Ancak temas alanı altında sıkışma bölgesinde ince çatlaklar, ezilmeler görülebilmiştir. Şekil 4'te düz platen altında kırılmış bazı numuneler görülmektedir. Sık çatlak oluşumları bazen düşey



Şekil 1. Standart çene altında yenilmiş numuneler (Kömürlü veKesimal, 2012).



Şekil 2. Yükleme düzenekleri (Flat: düz, Standard jaw: standart çene, Splittingframe: yarma çerçevesi)

çap boyunca oluşan çatlağın ardından yarılmış olan parçaların yüksek temas açısı nedeniyleayrılamaması ve yük artışına müsade edilmesi nedeniyle oluşmuştur (Şekil 3 ve 5d).Bu durum, 30° temas açısı altında yenilen birçok numune için gözlenmiştir. Ancak, Bayburt tüfü numuneleri için 30° temas açısı altında yenilme farklı olarak düşey çap boyunca tek çatlak oluşumu ile gerçekleşmiştir.

Çizelge 1. Lahanos cevheri ve dasiti numunelerinin dolaylı çekilme dayanımı değerleri

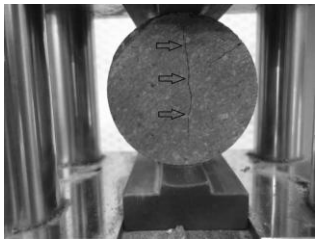
Bakır cevheri (Lahanos)			Dasit 1 (Lahanos)			Dasit 2 (Lahanos)		
Yükleme türü	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yükleme türü	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yükleme türü	t(mm)	σ_{tB} (MPa)
SÇ	33	6.1	SÇ	28	8.1	SÇ	27	6.1
SÇ	24	6.5	SÇ	36	8.0	SÇ	27	6.2
SÇ	28	8.3	SÇ	29	10.6	SÇ	22	6.5
SÇ	23	7.9	Düz	29	13.0	Düz	33	4.9
Düz	32	5.3	Düz	33	11.2	Düz	30	5.4
Düz	25	7.9	Düz	40	10.5	Düz	28	5.4
Düz	26	5.3	30°	29	21.8	30°	26	10.3
30°	30	8.2	30°	37	17.5	30°	25	11.0
30°	34	7.6	30°	31	19.8	30°	30	9.2
30°	25	8.5						

Çizelge 2. Andezitik bazalt, kireçtaşı 1, marn ve tüf numunelerinin dolaylı çekilme dayanımı değerleri (SÇ: Standart çene)

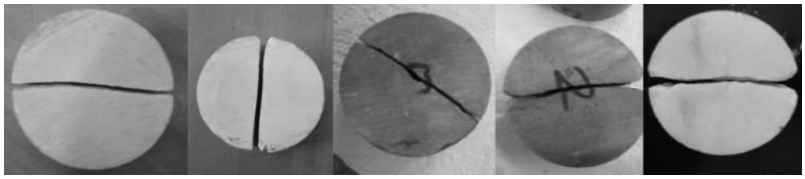
Andezitik bazalt			Kireçtaşı 1			Marn			Bayburt Tüfü		
Yükleme düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yükleme düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yükleme düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yükleme düzeneği	t (mm)	σ_{tB} (MPa)
Düz	31	11.2	Düz	31	6.1	Düz	31	8.6	Düz	40	5.4
Düz	29	13.2	Düz	29	7.7	Düz	27	9.4	Düz	36	5.2
Düz	31	13.3	Düz	31	7.5	15°	30	18.8	Düz	27	6.2
Düz	25	15.1	15°	31	9.9	15°	32	15.1	Düz	26	6.0
30°	27	25.6	15°	28	6.3	30°	30	17.6	15°	46	5.4
30°	27	30.8	15°	40	4.7	30°	28	19.5	15°	24	6.3
30°	32	25.0	30°	29	9.2	SÇ	30	14.9	15°	45	4.6
30°	30	26.9	30°	31	11.7	SÇ	31	13.6	15°	30	5.7
SÇ	31	15.6	30°	38	12.5	SÇ	27	15.5	30°	45	6.1
SÇ	27	16.5	SÇ	28	7.9	SÇ	27	13.7	30°	33	7.2
SÇ	32	15.7	SÇ	30	7.0				30°	32	7.8
SÇ	30	14.6	SÇ	29	8.3				30°	29	7.0
SÇ	30	16.9	SÇ	28	7.3				SÇ	31	8.2
									SÇ	25	9.3
									SÇ	30	9.2
									SÇ	28	8.4

Çizelge 3. Kireçtaşı 2 (Gümüşhane) numunelerinin dolaylı çekilme dayanımı değerleri

Yüklem e düzeneği	t (mm)	σ_{tB} (MPa)	Yüklem e düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yüklem e düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)	Yüklem e düzeneği	t(mm)	σ_{tB} (MPa)
Standart çene	45	8.76	Düz platen	41	6.18	15°	41	8.23	30°	34	9.19
	36	9.01		48	7.56		50	6.82		40	10.50
	27	8.79		35	5.15		32	8.89		31	10.72
	40	9.07		34	2.69		28	10.07		55	8.08
	43	8.82		30	4.74		42	8.51		50	7.16
	47	5.60		38	5.27						



Şekil 3. 30° temas açılı yükleme düzeneğinde yüklenen andezitik bazalt numunesi



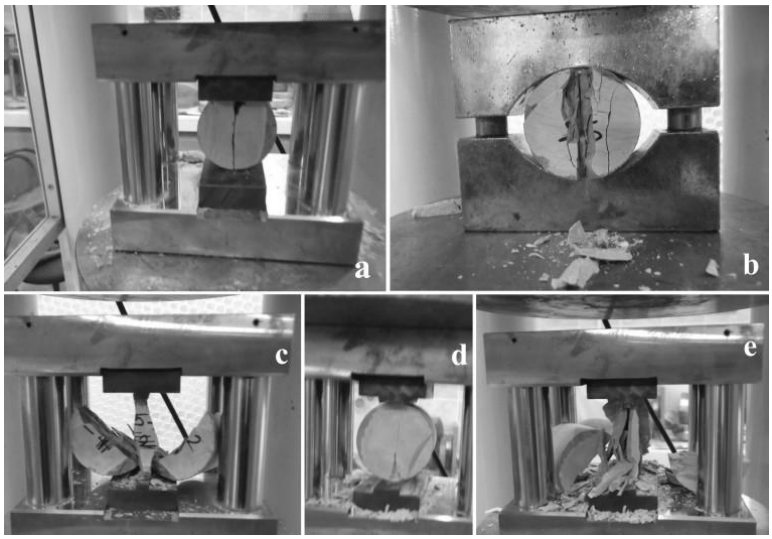
Şekil 4.Düz platen altında yenilen numuneler

Standart çene altında yenilen Gümüşhane kireçtaşı (Kireçtaşı 2) numuneleri için ilk çatlama ve yenilme arasında, gerilme farkı olmaksızın, ani olarak sık çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. 30° temas açısı altında ise, düşey çap boyunca çatlak oluşumu ardından yük artışına müsade edilmiş ve

sonrasında şiddetli biçimde sık çatlak oluşumuylayenilme gerçekleşmiştir (Şekil 5). Dasit numuneleri de 30° temas açısı altında benzer şekilde yenilme göstermişlerdir. Genellikle, sık çatlak gösteren kaya malzemelerinde temas alanı kenarlarına doğru oluşan çatlaklar görülmüştür. Ancak, nispeten deformasyona yüksek oranda izin verebilen tüf (Bayburt) numunelerinde temas alanı kenarlarına doğru çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular yenilme yükü ve disk deformasyon özelliklerinin yükleme düzeneği türüne bağlı olarak değişmekte olduğunu göstermiştir. Aynı yükleme düzeneği ile yüklenen farklı kaya malzemelerinin de farklı deformasyon özellikleri nedeniyle yenilme yükleri ve şekillerinin önemli ölçüde değişiklik gösterebildiği görülmüştür. Deneysel çalışmalardan farklı kaya türleri için elde edilen ortalama dolaylı çekilme dayanımı değerleri Çizelge 4'teverilmiştir.

Çizelge 4. Ortalama dolaylı çekilme dayanımı değerleri

Kaya türü	SÇ	Düz	15^o	30^o
Gümüşhane kireçtaşı	8.34	5.27	8.50	9.13
Bayburt tüfü	8.78	5.70	5.50	7.03
Dasit 1 (Lahanos)	8.90	11.57	-	19.70
Dasit 2 (Lahanos)	6.27	5.23	-	10.16
Bakır Cevheri (Lahanos)	7.20	6.17	-	8.10
Andezitik Bazalt	15.86	13.20	-	27.08
Kireçtaşı 1	7.63	7.10	6.97	11.13
Marn	14.43	9.0	16.95	18.55



Şekil 5. Test edilen Gümüşhane kireçtaşı numuneleri: a) düz platen altında, b) standart çene altında, c) 15° temas açılı yükleme düzeneği altında, d) 30° yükleme düzeneği altında düşey çap boyunca çatlak oluşumu ve yük artışına müsaade edilmesi, e) 30° yükleme düzeneği altında yenilme

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Temas açısının artışıyla çekilme dayanımı değerlerinde genel bir artış olduğu görülmüştür. Tüf (Bayburt) dışında tüm numuneler için maksimum dolaylı çekilme dayanımı değerleri 30° temas açılı yükleme düzenekleri kullanılarak elde edilmiştir. Ancak, tüf (Bayburt) için maksimum yenilme yükleri standart çene altında ölçülmüştür. Tüm numune türleri için standart çenenin düz platene göre daha yüksek dolaylı çekilme dayanımı değerleri verdiği görülmüştür. Aynı şekilde, daha yüksek temas alanı nedeniyle 30° temas açılı yükleme düzenekleri ile test edilen numunelerin 15° temas açılı yükleme düzenekleri altında test edilen numunelere nazaran daha yüksek yüklerde yenildikleri belirlenmiştir. Temas açısı belirli düzenekler ile standart çene ve düz platen kullanılarak elde edilen dolaylı çekilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki kaya malzemesine bağlı olarak farklılık

göstermiştir. Temas açısı belirli olmayan çenelerin farklı kaya malzemelerine yönelik büyük ölçüde değişen temas koşullarına sahip olduğu ve temas açısı gözetilmeksizin kullanılan standart bir bağıntı ile çekilme dayanımının tayin edilmesinin önemli ölçüde hatalı sonuç elde edilmesine yol açabileceği dikkate alınmalıdır.Hondros (1959), temas açısı 11° altında olan yükleme koşullarının analitik çözümü için pratik olarak çizgisel yük koşullarının dikkate alınabileceğini önermiştir. Ancak, pek çok orta sertlikteki kaya malzemeleri ve deformasyona yüksek oranda izin verebilen kaya malzemeleri için çizgisel yükleme koşullarının dikkate alınması ve standart bağıntının kullanımı doğru olmayacaktır (Aono vd., 2015; Erarslan ve Williams, 2012; Kömürlü ve Kesimal, 2014). Temas açısı düşük olan numuneler için ise temas bölgesinde sıkışma gerilmeleri kontrollü olarak yenilme gerçekleşebileceği, bu neden ile deney sonuçlarının çekilme dayanımını yansıtmayacağı ve geçersiz olacağı unutulmamalıdır (Fairhurst, 1964; Kömürlü vd., 2015). Bu sebeple, düz platen ile yükleme koşullarında sıkışma zonunda yenilme başlangıcı deney geçerliliği açısından dikkate alınmalıdır. Sıkışma zonunda başlayan yenilme nedeniyle kaya malzemelerinin dolaylı çekilme dayanımı değerleri nispeten düşük hesaplanmaktadır. Sert ve düz platen altında küçük temas açılarına sahip kaya malzemeleri için çoğu kez sıkışma zonundan başlayan yenilme nedeni ile dolaylı çekilme dayanımı deneyi sonuçları geçersiz olmaktadır.

Temas geometrisi, temas açısı ve kaya malzemesinin deformasyon özellikleri dolaylı çekilme dayanımı değerini, ilk çatlak yükünü ve çatlak ilerleme direncini belirlemektedir. Yüksek temas açısı koşulları altında yenilme yükü ve ilk çatlak yükü arasında önemli farklılıklar olabileceği ve bu sebeple yanıltıcı dayanım değerlerinin tayin edilebileceği görülmüştür. Bu çalışmadaki bulgulara paralel olarak, Erarslan ve Williams (2012) çatlak ilerleme direncinin temas açısı artışı ile artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında bir diğer bulgu ise, disk numunesinin kalınlığı ile ilgilidir. Önceki çalışmalara (Yu vd., 2006; Kömürlü ve Kesimal, 2012) paralel olarak, disk kalınlığı artışıylahesaplanan dolaylı çekilme dayanımı değerlerinde azalma görülmüştür. İdeal yenilmenin gerçekleşmesiiçin disk merkezinde çatlak başlangıcı olmalı ve çatlağın disk düşey çapı boyunca ilerlemesi gerekmektedir. Ancak, standart çene altında çoğu kaya malzemesi sık çatlaklar ile birçok parçaya ayrılmış olarak yenilmiştir. Disk numunesindeki sık çatlak oluşumu, ideal yenilme koşulları için gerekenden daha çok enerjiye gereksinim duyulduğunu yansıtmaktadır. Benzer mineralojik içerikte aynı tür kaya malzemelerinin deformasyon özellikleri gibi farklılıkları dolayısıyla aynı yükleme düzeneği altında yenilme şekilleri değişiklik gösterebilmektedir. Yazarlar tarafından bu çalışmadakilerden ayrı olarak standart çene altında test edilen farklı bazalt numunelerinden ideal yenilme şekilleri gözlemlenmiştir (Kömürlü ve Kesimal, 2014). 30° temas açısına sahip yükleme düzeneği altında sert kaya malzemelerinin yükleme düzeneği temas alanı kenarlarına doğru çatlak ilerlemeleri olduğu görülmüştür. Bu çatlaklar bazen düşey çap boyunca tamamlanan çatlak ilerlemesine rağmen yük artışına müsade edilmesi nedeni ile olmuştur. Nispeten yumuşak Bayburt tüfü numuneleri ve 30° temas açısına sahip yükleme düzeneği altında ek olarak daha önce yazarlar tarafından test edilen yumuşak killi kireçtaşı ve fosilli kumtaşı numuneleri için temas alanının kenarlarına doğru çatlak oluşumu görülmemiş ve numuneler düşey çap boyunca oluşan bir çatlak ile yenilmişlerdir (Kömürlü ve Kesimal, 2014). Bu bulgu, daha önce Brisbane tüfü için 30° temas açısına sahip yükleme düzenekleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ileuyumludur (Erarslan vd. 2012; Erarslan ve Williams, 2012). Ayrıca, Kömürlü vd. (2015) tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modelleme çalışmalarından kaya malzemesinin elastisite modülünün artışıyla temas alanı kenarları altındaki gerilme değerlerinde artış meydana geldiğinin gözlenmiş olması, bu çalışmada elde edilen bulgularla uyumludur. Sonuç olarak, dolaylı çekilme dayanımının yükleme düzeneği seçimine ve kaya malzemesine bağlı olarak büyük oranda değişim gösterdiği görülmüştür. Bu sebeple, standart çenenin kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri ile yenilme şekli dikkate alınarak hassasiyetle kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmanın sonuçları ışığında, tüm kaya malzemelerinin dolaylı çekilme dayanımı deneyinde kullanılmak üzere standart bir çene önerilmemektedir.

4. KAYNAKLAR

Akazawa, T., 1943. New test method for evaluating internal stres due to compression of concrete (the splitting tension test) (part 1). Journal of Japan Society of Civil Engineering, 29, 777-787.

Aono, Y.,Tani, K., Okada, T., Sakai, M., 2012.Failure mechanism of the specimen in the splitting

tensile strength test. In: Proceedings of the 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, South Korea, 615-623.

Carneiro, FLLB, 1943. A new method to determine the tensile strength of concrete. Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules, 126-129.

Chen, R.,Stimpson, B., 1993. Interpretation of indirect tensile strength when moduli of deformation in compression and in tensionare different. Rock Mechanics and Rock Engineering, 26(2), 183-189.

Erarslan, N., Williams, D.J., 2012. Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 49, 21-30.

Erarslan, N.,Liang, Z.Z., Williams, D.J., 2012. Experimental and numerical studies on determination of ındirect tensile strength of rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(5), 739-751.

Fairbairn, E.M.R., Ulm J.F., 2002.A tribute to Fernando L. L. B. Carneiro (1913 - 2001) engineer and scientist who invented the Brazilian test. Materials and Structures, 35, 195-196.

Fairhurst, C., 1964. On the validity of the Brazilian test for brittle materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science,1, 535-546.

Hondros, G., 1959. The evaluation of Poisson'sratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by Brazilian test with particular reference to concrete. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 10, 243–68.

ISRM, 1978. International society for rock mechanics suggested methods for determining tensile strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 15, 99–103.

ISRM, 2007. The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, R.Ulusay and J.A.Hudson (eds.), Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 p.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1976. Fundamentals of Rock Mechanics. London, Chapman and Hall.

Komurlu, E., 2012. Effects of rock and granular material horizontal stresses on support design (in Turkish). MSc thesis, Karadeniz Technical University Mining Engineering Department, Trabzon, Turkey.

Komurlu, E.,Kesimal, A., 2012. Jaw effects on ındirect tensile strength test discfailure mechanism. In: Proc. ofthe 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, South Korea, 624-637.

Kourkoulis, S.K.,Markides, C.F., Chatzistergos, P.E, 2013. The standardized Braziliandisc test as a contact problem. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 57, 132-141.

Komurlu, E.,Kesimal, A., 2014. Evaluation of ındirect tensile strength of rock susing different types of jaws. Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI 10.1007/s00603-014-0644-3

Komurlu, E.,Kesimal, A., Demir, S., 2015. An experimental and numerical study on determination of indirect tensile strength of rocks under various load apparatus. Canadian Geotechnical Journal (Under review)

Kourkoulis, S.K., Markides, C.F., Hemsley, J.A., 2013. Frictional stresses at the disc-jaw interface during the standardized execution of the Brazilian disc test. Acta Mechanica, 224(2), 255-268.

Lanaro, F.,Sato, T., Stephansson, O., 2009. Micro crack modelling of Brazilian tensile tests with the boundary element method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 46, 450-461.

Markides, C.F., Pazis, D.N., Kourkoulis, S.K., 2010. Closed full-field solutions for stresses and displacements in the Brazilian disc under distributed radial load. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 47(2), 227–237.

Markides, C.F.,Pazis, D.N., Kourkoulis, S.K., 2012. The Brazili and iscundernon-uniform distribution of radial pressure and friction. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 50, 47-55.

Markides, C.F.,Kourkoulis, S.K., 2013. Naturally accepted boundary conditions for the Brazilian disc test and the corresponding stressfield.Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(5), 959-980.

Muskhelishvili, N.I., 1963. Some basic problems in mathematical theory of elasticity. Noordh off, Leyden.

Yu, Y.,Yin, J., Zhong, Z., 2006. Shapeeffects in the Brazilian tensile strength test and a 3D FEM correction. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 623-627.

Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyinde Örneğin Boy/Çap Oranının Belirlenmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım

A New Approach for Determination of Length to Diameter Ratio of Specimen Used for Uniaxial Compressive Strength Test

E. Tuncay[1,*], N. Tunar Özcan[1], A. Kalender[1]

[1] *Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, ANKARA (*etuncay@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Amerikan Test Standartları (ASTM) ve Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) tarafından tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) deneyinde kullanılan kaya örneğinin boy/çap (L/D) oranı, sırasıyla 2-2.5 ve 2.5-3 olarak önerilmektedir. Bunun yanı sıra, bazı önerilen düzeltme eşitliklerinde 2.5 L/D oranındaki örnekten belirlenen UCS değeri standart kabul edilirken, bazı eşitliklerde bu oran 2 olarak seçilmiştir. Literatürde L/D oranı seçiminde ortak bir kabulün olmaması nedeniyle, bu çalışmada, UCS üzerinde L/D oranı etkisinin farklı kaya türleri için ayrıntılı olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, farklı kayalardan 1'den 3'e kadar değişen L/D oranlarına sahip örnekler hazırlanmış ve UCS deneylerine ek olarak derlenen kayaların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kuramsal yaklaşımlar ve deneysel verinin istatistiksel değerlendirmeleri dikkate alınarak, en küçük L/D oranının ($(L/D)_{lim}$) deney öncesinde belirlenmesine olanak sağlayan bir sınıflama oluşturulmuştur. Ayrıca, gerekli $(L/D)_{lim}$ değerlerinden daha küçük oranlara sahip örneklerde belirlenen UCS değerleri için bir genelleştirilmiş düzeltme eşitliği önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boy/Çap Oranı, Düzeltme Eşitliği, Kırılma Yüzeyi, Sınıflama, Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı.

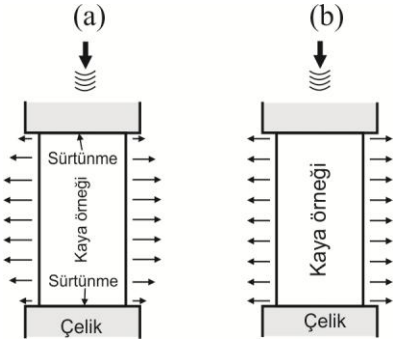
ABSTRACT: *Length to diameter ratio (L/D) of rock specimen used for uniaxial compressive strength (UCS) test is suggested as 2-2.5 and 2.5-3 by American Society for Test methods (ASTM) and International Society for Rock Mechanics (ISRM), respectively. In addition, while the UCS determined from the specimen having an L/D ratio of 2.5 was accepted as standard in some of the proposed correction equations, this ratio was selected as 2 in some of the other equations. Because there has not been any consensus on the selection of the L/D ratio in literature, more detailed investigation of the effect of L/D ratio on UCS for different rock types was aimed in this study. For this purpose, specimens having L/D ratios from 1 to 3 were prepared from different rock types, and in addition to UCS experiments, some physical and mechanical properties of the compiled rocks were determined. By considering the theoretical approaches and statistical evaluation of test data, a classification which makes possible the determination of the required minimum L/D ratio ($(L/D)_{lim}$) before the experiment was established. Besides, a generalized correction equation was proposed for the UCS values determined from specimens having less ratios than the required $(L/D)_{lim}$ values.*

Keywords: *Length to Diameter Ratio, Correction Equation, Fracture Surface, Classification, Uniaxial Compressive Strength.*

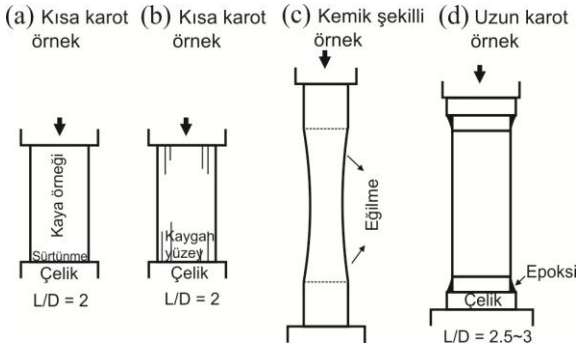
1. GİRİŞ

Kaya malzemesinin laboratuvar koşullarında belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımını (UCS) etkileyen parametrelerden biri de deneyde kullanılan karot örneğinin boy/çap (L/D) oranıdır. Deney örneğinin L/D oranı değiştikçe UCS değeri de değişebilmektedir. Bunun en önemli nedeni, kaya malzemesinin ve çelik yükleme başlığının elastik parametreleri arasında oldukça büyük farklılığın olmasıdır (Obert ve Duwall, 1967). Bu farklılık, yükleme esnasında, kaya karot örneğinin çelik yükleme başlığına temas ettiği yüzeyde merkez noktadan kenara doğru ışınsal olarak değişen makaslama kuvvetlerinin gelişmesine ve silindirik kaya örneğinin (karot) alt ve üst yüzeylerinde mengene/kıskaç (clamp) etkisinin oluşmasına neden olmaktadır (Filon, 1902 - Mogi, 2007'den)

(Şekil 1a). Bu durum, küçük L/D oranına sahip örneklerde yenilme yüzeyinin herhangi bir etki olmaksızın genişlemesini engellemektedir. Başka bir ifadeyle, örneğin alt ve üst yüzeylerinde gelişen kenetlenme etkisi ile, serbest kırılması engellenmekte bu yüzeylerdeki etkiye bağlı olarak, olması gerekenden farklı dayanım belirlenmektedir. Deneyde kullanılan kaya örneklerinin L/D oranı belirli bir büyüklükte iken bu etki ortadan kalkmakta, ancak düşük L/D oranlarında söz konusu etkiden dolayı UCS değerleri olması gerekenden daha büyük değerler alabilmektedir. Örneğin alt ve üst yüzeyleri ile çelik yükleme başlıkları arasında herhangi bir sürtünme etkisinin olmadığı varsayıldığında, UCS deneylerinde olması gereken ideal davranış biçiminde, örneğin ortasında gelişen yanal şekil değiştirmeler ile alt ve üst yüzeylerinde gelişenler eşit olmalıdır (Şekil 1b). UCS deneyi esnasında bu model sağlanabildiği taktirde, deney de kullanılan karotların L/D oranının UCS üzerindeki etkisi de ortadan kalkmış olacaktır. Ancak, klasik UCS deneylerinde örneğin alt ve üst yüzeyleri ile yükleme başlıkları arasındaki sürtünmeyi tamamen ortadan kaldırmak mümkün olamamaktadır. Bugüne değin L/D oranı arttırılarak, örnek alt ve üst yüzeyleri yağlanarak ya da deney örnekleri zahmetli işlemler sonucu hazırlanarak bu duruma çözüm getirilmeye çalışılmıştır (Şekil 2). Örnek uçlarının yağlanması sürtünmeyi önemli oranlarda azaltmasına rağmen, yükleme esnasında yağlama amaçlı kullanılan malzeme örnek içine nüfus ederek düşey çatlakların oluşabilmesine neden olmaktadır (Mogi, 2007) (Şekil 2b). Örneğin değişik şekillerde hazırlanması (Şekil 2c) ise, zahmetli ve zaman alıcı olması ya da bazı diğer sorunlar içermesi nedeniyle kaya mekaniği çalışmalarında araştırmacılar tarafından tercih edilen bir yöntem olmamıştır. Deneylerde kullanılması gereken L/D oranlarına ilişkin standartlar ve kurumsal öneriler (ASTM, 1994; ISRM, 2007) bulunmakla birlikte, ASTM (1994) tarafından L/D oranı için 2 -2.5 değeri kabul edilirken, ISRM (2007) tarafından 2.5 - 3 değeri önerilmektedir. UCS değerinin hangi L/D oranından sonra sabitlendiğini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalarda (örneğin, Mogi, 1966; Mogi, 2007; John, 1972; Thuro vd., 2001; Ünlü ve Yılmaz, 2008; Tuncay ve Hasancebi, 2009) ise, deney karotları için kullanılması gereken en düşük L/D ($(L/D)_{lim}$) oranına ilişkin ortak bir sonuca varılamamıştır. Bazı araştırmacılar ya da kurumlar tarafından (Obert at al., 1946; Protodyakonov, 1969; ASTM, 1994; Tuncay ve Hasancebi, 2009) daha düşük L/D oranlarındaki karotlardan belirlenen UCS değerlerinin standart bir L/D oranındaki değere çevrilmesi amacıyla düzeltme eşitlikleri önerilmesine rağmen, bu çalışmalarda kullanılan kaya örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki farklılığa bakılmaksızın, aynı olduğu kabul edilmiş ya da dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, bu eşitliklerin kiminde standart L/D oranı 2, kiminde ise 2.5 olarak kabul edilmiştir. Bu konuda yapılmış önceki çalışmalara ilişkin ayrıntılı bir değerlendirme, Tuncay ve Hasancebi (2009), Tuncay ve Tunar Ozcan (2011) ve Tuncay vd.(2012) tarafından sunulmuş olup, burada bu çalışmalara tekrardan değinilmemiştir.



Şekil1. Örnek yüzeyi ile yükleme başlıkları arasında (a) sürtünme etkisinin olduğu ve (b) olmadığı durumlarda yanal şekil değiştirme.



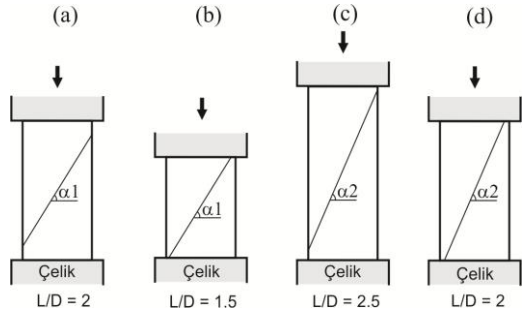
Şekil 2. Farklı L/D oranlarındaki örneklerde yükleme başlıkları ile örnek alt ve üst yüzeyleri arasındaki sürtünme etkisi ve bu etkiyi gidermeye yönelik uygulamalar (Mogi, 2007'den düzenlenmiştir).

Gerek ASTM ve ISRM tarafından önerilen L/D oranı aralığının farklılık göstermesi gerekse literatürde önerilen düzeltme eşitliklerinin farklı L/D oranındaki UCS'yi standart kabul etmeleri, UCS deneyinde kullanılan örneğin L/D oranının seçiminde halen bir ortak kabulün olmadığını göstermektedir. Yukarıda da değinildiği gibi, kırılma yüzeyinin herhangi bir etkiden bağımsız gelişebilmesi için deney

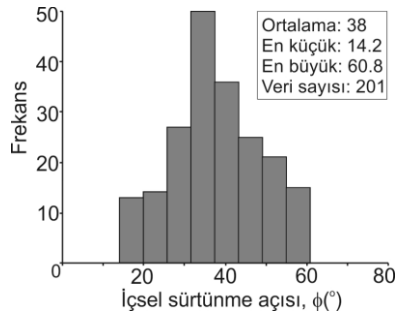
örneğinin L/D oranının yeterince büyük olması önem arz etmektedir. UCS deneyinde karot örneklerinin kırılma yüzeyi açısı (α), herhangi bir etki olmaması durumunda kuramsal olarak Eş. 1 ile ifade edilmektedir. Bu nedenle, kırılma yüzeyinin yükleme başlıkları ile deney örneği arasındaki sürtünmeden etkilenmeden serbestçe ilerleyebilmesi için örneğin en küçük L/D oranının ($(L/D)_{lim}$), kayanın içsel sürtünme açısıyla (ϕ) ilişkili ve farklı içsel sürtünme açısına sahip kayalarda farklı olması gerektiği anlaşılmaktadır.

$$\alpha=45+\phi/2 \quad (1)$$

Şekil 3a'da görüldüğü gibi, deney örneğine ait L/D oranı yeterince büyük olduğu taktirde, yenilme yüzeyi örneğin yan yüzeylerinde sonlanmaktadır. Aynı kaya türü için, kısa bir karot örnek (L/D oranı küçük) kullanıldığında ise, yenilme yüzeyi yükleme başlıkları ile örneğin alt ve üst yüzeyinin arakesişimine doğru ilerleme eğilimi göstermektedir (Şekil 3b). Örnek ile yükleme başlıkları arasındaki sürtünme, örneğin yenilme yüzeyinin serbest gelişimini birinci durumda (Şekil 3a) nisbeten etkilemezken, ikinci durumda (Şekil 3b) etkilemektedir. İçsel sürtünme açısı farklı olan başka bir kaya türündeki tek eksenli yüklemede ise, yenilme yüzeyi farklı bir eğimde gelişecek ve bu nedenle gerekli en düşük L/D oranı da değişecektir (Şekil 3c ve 3d). Sheorey (1997), farklı kaya türleri için farklı içsel sürtünme açısı değerlerini derlemiştir. Bu veri kullanılarak Mohr-Coulomb ölçütüne göre doğrusal yenilme zarfları çizilmiş ve kayaların içsel sürtünme açılarının yaklaşık 14° ile 60° arasında, çoğunlukla da 25° ile 55° arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. İki farklı içsel sürtünme açısına sahip kaya türü için karot örneklerinin L/D oranları ile yenilme yüzeylerinin eğiminin temsili olarak gösterimi.



Şekil 4. Sheorey (1997) tarafından derlenen veriden hesaplanmış içsel sürtünme açısı değerlerinin dağılımı.

Eş. 1 dikkate alındığında; 25°-55° ϕ'na sahip kayalar için, yenilme yüzeylerinin 57.5°-72.5° arasında açılara (α) sahip olması gerekmektedir. Bu durumda, yenilme yüzeyinin Şekil 3a'dakine benzer olarak örneğin yan yüzeylerinde sonlanması için deneyde kullanılan karotun ($(L/D)_{lim}$ oranı (Eş. 2), kaya örneğinin ϕ'sı 25° ise en az 1.57, ϕ'sı 55° ise en az 3.17 olmalıdır. Bu belirleme, literatürdeki farklı çalışmalarda bazı kaya türleri için farklı $(L/D)_{lim}$ oranı değerlerinin bulunmasının nedenini bir ölçüde açıklamaktadır. Bu durum dikkate alınarak, bu çalışmada, UCS üzerinde L/D oranı etkisinin farklı kaya türleri için daha ayrıntılı olarak araştırılması amaçlanmış ve 7 sedimanter, 2 metamorfik, 8 magmatik kökenli olmak üzere toplam 17 farklı kaya örneği derlenerek (Çizelge 1) hazırlanan karotlar üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

$$(L/D)_{lim} = \tan(45+\phi/2) \quad (2)$$

2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Çalışmanın amacı doğrultusunda öncelikle, ISRM (2007) önerileri dikkate alınarak kayaların makaslama dayanımı parametreleri ile bazı fiziksel ve mekanik özellikleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir (Çizelge 2). İkinci aşamada, NX ve NQ çaplı ve 1'den 3'e kadar değişen L/D oranlarına sahip örneklerde (Şekil 5) deneyler yapılarak, farklı L/D oranlarındaki karotlar için UCS değerleri belirlenmiş olup, ayrıca Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen eşitlikle 50mm'lik çap için

düzeltme yapılmıştır. Tüm kaya örneklerinde belirlenen UCS değerleri, L/D oranına bağlı olarak değişim göstermiş ve L/D oranının artışına bağlı olarak düşüş göstermiştir (Şekil 6). Ayrıca, deneylerden elden edilen veriler incelendiğinde, her kaya örneği için belirli bir L/D oranından daha büyük oranlardaki karotlarda belirlenen UCS değerlerinin hemen hemen sabitlendiği, ancak bu oranın tüm kaya örnekleri için aynı olmadığı tespit edilmiştir. Örneğin, 1 no'lu örnek için yaklaşık L/D=2'den sonra UCS sabit bir değere ulaşırken, 10 no'lu örnek için L/D=2.5'tan sonra sabitlenmektedir. Eşitlik 2 ve üç eksenli deneylerle belirlenmiş içsel sürtünme açılarından yararlanılarak hesaplanan kuramsal $(L/D)_{lim}$ değerleri de Şekil 6'daki grafiklerde verilmiştir. Kuramsal olarak hesaplanan $(L/D)_{lim}$ değerlerinin deneylerde UCS'nin sabitlenmeye başladığı L/D oranları ile genel olarak uyumlu oldukları görülmüştür.

Çizelge 1. Derlenen kaya bloklarına ilişkin genel bilgiler.

Örnek no	Kaya ismi[+]	Renk*	Taş ocağının yeri	Temin edildiği yer
1	Rekristalize kireçtaşı	Beyaz	Limra/Antalya	Ankara
2	Mermer	Açık gri	Afyon	Ankara
3	Mermer	Beyaz	Uşak	Ankara
4	Bazaltik andezit	Pembe / Açık kahveremgimsi gri	Gölbaşı/Ankara	Ankara
5	Andezit	Gri	Gölbaşı/Ankara	Ankara
6	Granit	Açık gri	Bergama/İzmir	Ankara
7	Jips	Beyaz	Bala/Ankara	Ankara
8	İgnimbirit	Beyaz / Pembemsi gri	Bayburt	Bayburt
9	Silttaşı	Grimsi turuncu	Bayburt	Bayburt
10	Litik kumtaşı	Sarımsı kahve	Bayburt	Bayburt
11	İgnimbirit	Soluk kırmızı	Kayseri	Ürgüp
12	İgnimbirit	Grimsi sarı	Nevşehir	Nevşehir
13	Olivin-bazalt	Gri	Kayseri	Kayseri
14	Marn	Açık yeşilimsi gri	Milas/Muğla	Milas
15	Feldispatik kumtaşı	Çok açık gri	Yatağan/Muğla	Yatağan
16	Gabro	Açık mavimsi yeşil	Antalya	Ankara
17	Kuvarslı alkali feldispat siyenit	Grimsi pembe	İspir/Erzurum	Ankara

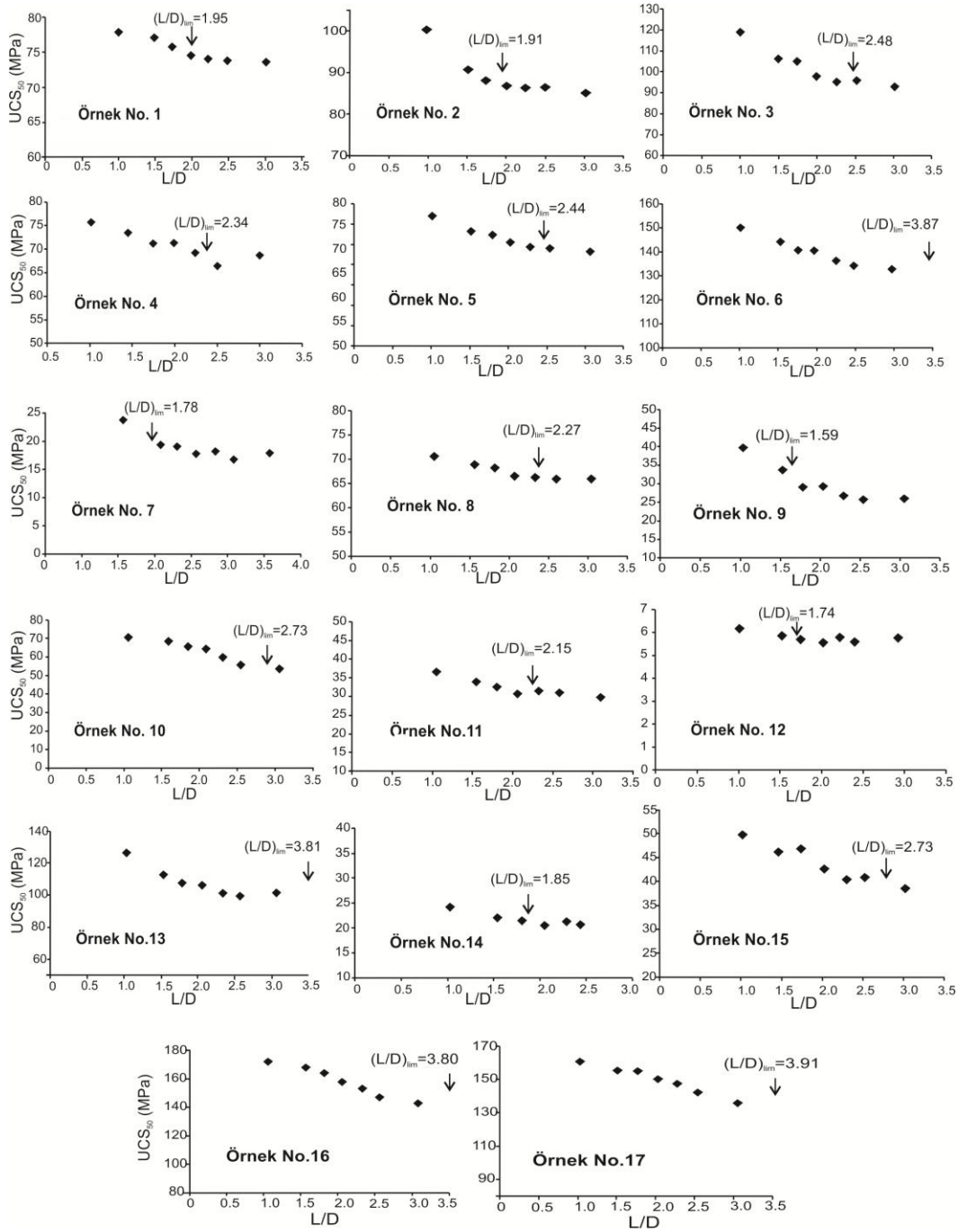
[+]İnce kesitlerin analizleri sonucu belirlenmiştir. * Kaya Renk Kartlarından (ANON, 1963) yararlanılmıştır.

Çizelge 2. Derlenen kaya türlerine ait bazı ortalama fiziksel ve mekanik özellikler.

Örnek no	γ (kN/m^3)	n (%)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	σ_t (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	E (GPa)	ν
1	23.58	5.68	4280	1837	3.96	17.83	35.78	46.1	0.22
2	26.45	0.12	4524	1815	5.30	21.13	34.70	58.9	0.22
3	26.54	0.20	4342	2038	6.73	19.46	46.09	57.8	0.19
4	22.19	11.17	3264	1233	5.40	13.71	43.82	27.1	0.3
5	20.56	7.63	3636	1353	7.00	13.75	45.49	27.9	0.25
6	26.13	1.09	4553	1584	7.85	16.66	61.09	61.8	0.22
7	21.73	6.13	3328	1124	1.83	4.99	31.46	22.6	0.33
8	17.42	19.49	2388	1178	5.06	14.87	42.46	19.3	0.28
9	19.17	18.05	2327	1172	3.39	7.12	25.69	12.6	0.34
10	22.42	10.25	4067	1441	6.87	9.95	49.77	25.6	0.30
11	16.84	28.33	2418	1035	2.94	7.42	40.22	8.3	0.24
12	15.18	32.55	1709	702	0.62	1.94	30.24	4.6	0.34
13	25.67	3.18	4446	1657	7.82	14.68	60.65	41.6	0.21
14	14.47	42.30	1396	745	2.09	3.92	33.31	2.1[+]	0.25[+]
15	23.42	9.37	3720	1528	4.98	7.31	49.78	21.4	0.24
16	28.55	1.66	4452	1729	10.15	17.72	60.62	58.0	0.20
17	24.83	2.77	3720	1528	9.20	17.66	61.35	47.4	0.22

*γ: Kuru birim hacim ağırlık, n: Görünür porozite, V_p: P dalga hızı, V_s: S dalga hızı, σ_t: Brasilian çekilme dayanımı, c: Kohezyon, ϕ: İçsel sürtünme açısı, E: Ortalama elastik modül, ν: Poisson oranı[+] L/D oranı 2 olan örneklerden belirlenen.

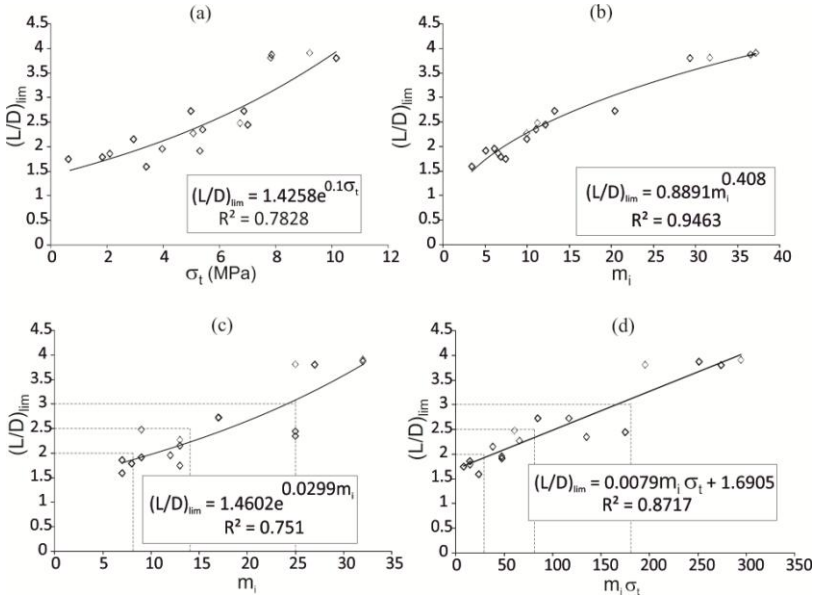
Şekil 5. UCS deneyleri için derlenen bloklara, bloklardan hazırlanan farklı L/D oranlarındaki karotlara ve deneylerde gözlenen tipik kırılma yüzeylerine örnek görünümler.



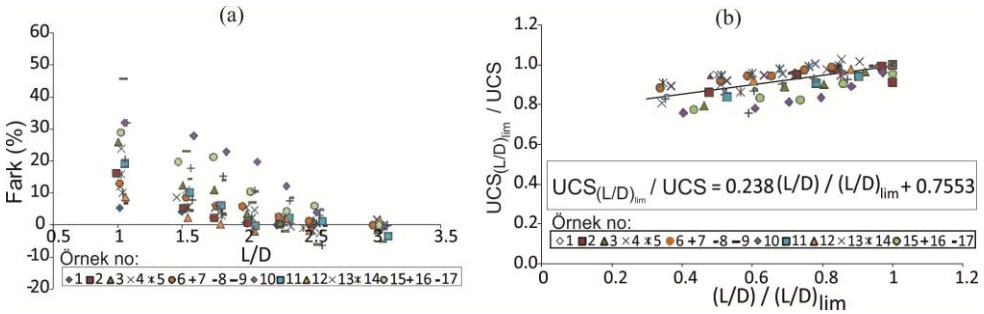
Şekil 6. Deney karotlarının L/D oranına bağlı olarak UCS değerlerinin değişimi.

3. DENEYLERDE KULLANILMASI GEREKEN BOY-ÇAP ORANININ BELİRLENMESİNE İLİŞKİN DEĞERLENDİRMELER

$(L/D)_{lim}$ değerinin deney öncesi basit bir ilişkiyle bulunabilmesi amacıyla, derlenen kaya örneklerinin çalışma kapsamında belirlenen birim hacim ağırlık, porozite, P ve S dalga hızları ve elastik sabitleri ile $(L/D)_{lim}$ değerleri arasındaki ilişkiler istatistiksel olarak araştırılmış, ancak anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Bununla birlikte, çalışma kapsamında yapılan üç eksenli deney sonuçlarından hesaplanan Hoek-Brown "m_i" sabiti ve Brazilian çekilme dayanımı (σ_t) değerleri ile $(L/D)_{lim}$ değerleri arasında daha anlamlı ilişkilerin olduğu görülmüştür (Şekil 7a ve 7b). Bu nedenle, Hoek ve Brown (1980) tarafından kaya türlerine bağlı olarak önerilen m_i değerlerinden yararlanılarak, çalışma kapsamındaki kayalar için m_i parametreleri belirlenmiş ve $(L/D)_{lim}$ ile ilişkileri araştırılmıştır (Şekil 7c). Ayrıca, söz konusu m_i parametreleriyle σ_t değerlerinin çarpımından elde edilen değerlerin $(L/D)_{lim}$'lerle ilişkisi de Şekil 7d'de sunulmuştur. Her kaya türü için Eşitlik 2 ile hesaplanan $(L/D)_{lim}$ oranlarından daha büyük karotlardaki deneylerden elde edilen UCS'larının ortalamaları ($UCS_{(L/D)lim}$) belirlenmiş ve farklı L/D oranları için belirlenen UCS'larının bu ortalama değerlerden olan yüzde farkları hesaplanmıştır. Şekil 8a'da görüldüğü gibi bu farklar, farklı kayalarda farklı L/D oranlarında önemsenmeyecek düzeye gelmektedir. L/D oranının 2.5 ve daha fazla olması durumunda ise, tüm kayalar için % 10'un, L/D'nin 3 olması durumunda da %5'in altına düşmektedir. $UCS_{(L/D)lim}$ / UCS oranının $(L/D)/(L/D)_{lim}$ oranına bağlı değişimi ise, Şekil 8b'de görüldüğü gibidir.



Şekil 7. (a) Brazilian çekilme dayanımı (σ_t), (b) üç eksenli deney sonuçlarından hesaplanmış m_i parametreleri (c) Hoek (2007) tarafından kaya türlerine göre önerilen m_i parametreleri ve (d) m_i σ_t çarpımı ile $(L/D)_{lim}$ değerleri arasındaki ilişkiler.



Şekil 8.(a) UCS değerlerinin $UCS_{(L/D)lim}$'lere göre yüzde farklarının L/D oranına bağlı değişimi ve (b) $(L/D)/(L/D)_{lim}$ oranına karşılık $UCS_{(L/D)lim}$ / UCS oranı ilişkisi.

Şekil 7c ve 7d'deki eşitliklerden yararlanılarak deneyi yapılacak kayanın $(L/D)_{lim}$ değerinin önceden belirlenmesi mümkün olmakla birlikte, deney verisinin regresyon eğrisi/doğrusu etrafında bir miktar dağılım göstermesi nedeniyle, $(L/D)_{lim}$ değerinin eşitlikle belirlenecek tek bir değer yerine, aralık olarak önerilmesinin doğru olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle, söz konusu şekillerdeki kesikli çizgilerle gösterilen alanlar dikkate alınarak, L/D oranının deney öncesinde seçilmesine yönelik bir sınıflama oluşturulmuştur (Çizelge 3). Bu çizelgede ayrıca, farklı özellikteki kayaların $(L/D)_{lim}$ değerleri dikkate alınarak, daha küçük L/D oranlarına sahip örneklerdeki deneylerden belirlenen UCS değerleri için, Şekil 8b'deki ilişkiden yararlanılarak, genelleştirilmiş bir düzeltme eşitliği de önerilmiştir. Çizelge 3'te görüldüğü gibi, hiç bir özelliğine bakılmaksızın tüm kayalar için L/D oranının 3 alınabileceği, mümkün olmaması durumunda ISRM (2007) tarafından önerilen 2.5-3 aralığının seçilebileceği önerilmektedir (Öneri 1). UCS deneyi yapılacak kaya örneğinin Brazilian çekilme dayanımı belirlenmişse, Hoek ve Brown (1980) tarafından önerilen m_i parametresi de dikkate alınarak m_i ve σ_t'nin çarpımından elde edilen değere bağlı olarak $(L/D)_{lim}$ aralığının belirlenmesi 2. öneri olarak sunulmaktadır. Sadece m_i parametresini esas alan sınıflama dikkate alınarak $(L/D)_{lim}$ aralığının belirlenmesi ise, son seçenek olarak önerilmektedir (Öneri 3). Bu önerilerdeki $(L/D)_{lim}$ aralığında örnek alınamaması durumunda ise, 1'den küçük olmaması şartıyla daha küçük L/D oranına sahip karotlardaki deneylerden belirlenen UCS değerleri için düzeltme eşitliğinin kullanılması gerekmektedir.

Çizelge 3. UCS deneylerinde kullanılması gereken $(L/D)_{lim}$ oranının seçimine yönelik sınıflama önerileri ve belirlenen $(L/D)_{lim}$'den daha küçük L/D oranlarındaki karotlardan belirlenen UCS için düzeltme eşitliği.

ÖNERİ	KAYA ÖZELLİĞİ	$(L/D)_{lim}$
1	Tüm kayalar için	3*
2 (Brazilian deneyi ile çekilme dayanımının (σ_t) belirlenmiş olması durumunda)	$m_i \sigma_t < 30$	1.7 - 2.0
	$30 \le m_i \sigma_t < 80$	2.0 - 2.5
	$80 \le m_i \sigma_t < 180$	2.5 - 3.0
	$m_i \sigma_t > 180$	3*
3 (Sadece Hoek-Brown m_i parametresi kullanılarak)	$m_i < 8$	1.7 - 2.0
	$8 \le m_i < 14$	2.0 - 2.5
	$14 \le m_i < 25$	2.5 - 3
	$m_i > 25$	3*
DÜZELTME EŞİTLİĞİ (2 veya 3 no'lu önerilerde olması gereken $(L/D)_{lim}$ aralığında karot alınamaması durumunda kullanılmalıdır.)	$UCS_c = UCS\ [0.238\ ((L/D) / (L/D)_{lim}) + 0.755]$ *Eşitlik, $1 \le L/D < (L/D)_{lim}$ durumu için geçerlidir.* UCS_c : Düzeltilmiş (olması gereken) tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa). UCS : L/D oranındaki karotta yapılan deneyden belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa). L/D : Deneyde kullanılan karotun L/D oranı. $(L/D)_{lim} = 0.0079\ m_i\ \sigma_t + 1.69$ m_i : Hoek (2007) tarafından önerilen çizelgeden seçilmelidir. σ_t : Brazilian deneyi ile belirlenmiş çekilme dayanımı (MPa).	

* Mümkün olmaması durumunda 2.5-3 arasında bir L/D oranı da seçilebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) deneylerinde kullanılan karotların Boy/Çap (L/D) oranının UCS üzerindeki etkisi araştırılmış ve 17 farklı kayada yapılan deneyler ve verilerin analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

a. UCS deneylerinde; deney örneklerinin (karot) L/D oranı arttıkça UCS'nin azaldığı, belirli bir L/D oranından sonra da sabitlendiği, ancak UCS'nin sabitlenmeye başladığı L/D oranının tüm kayalar için aynı olmadığı belirlenmiştir.

b. Bu çalışmada derlenen kaya türlerinin içsel sürtünme açılarından (ϕ) yararlanılarak kuramsal olarak belirlenen en küçük L/D oranlarının ($(L/D)_{lim}$), 1.59 ile 3.91 arasında değiştiği ve bu değerlerin deneysel sonuçlara göre UCS'nin sabitlenmeye başladığı L/D oranlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

c. Kayaların belirlenen jeomekanik özellikleri ile $(L/D)_{lim}$ arasındaki ilişkiler regresyon analizleri ile araştırılmış olup, $(L/D)_{lim}$ ile gözeneklilik, birim hacim ağırlık, P dalga hızı ve S dalga hızı arasında anlamlı bir ilişki yakalanamamıştır. Bununla birlikte, Hoek Brown m_i parametresi ve Brazilian çekilme dayanımı (σ_t) ile kuramsal olarak hesaplanan $(L/D)_{lim}$ arasında nispeten yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkilerin varlığı tespit edilmiştir.

d. Amarikan Test Standartları (ASTM) tarafından alt sınır olarak önerilen L/D=2 oranının tüm kayalar için kullanılması durumunda, bazı kayalar için olması gerekenden yaklaşık %20 oranında daha yüksek UCS'lerin belirlenebileceği görülmüştür. Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği (ISRM) önerisi olan L/D=2.5-3 aralığının dikkate alınması durumunda ise, en büyük değişimin %10'un altında kalacağı anlaşılmıştır.

e. Kayaların Hoek Brown m_i parametresi ve σ_t değerlerine bağlı olarak, UCS deneylerinde kullanılması gereken L/D oranlarının seçimi için, 1.7-2, 2-2.5, 2.5-3 ve 3 aralıklarında bir sınıflama oluşturulmuştur. Bu sınıflama ile tek bir L/D oranı yerine kayaların söz konusu özelliklerine bağlı olarak farklı L/D aralıklarında UCS deneyleri yapılmasına olanak sağlanmıştır. Kayaların m_i ve σ_t değerleri kullanılarak belirlenen $(L/D)_{lim}$ aralığında karot örneği alınamaması durumunda, kısa örneklerde yapılan deneylerden elde edilen UCS değerleri için bir düzeltme eşitliği önerilmiştir.

5. KATKI BELİRTME

Bu bildiri, yazarların 109Y307 no'lu TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirdikleri çalışmadan üretilmiştir.

6. KAYNAKLAR

ANON, 1963. Rock Color Chart, Geological Society of America.

ASTM, 1994. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards, Vol: 04.08, Philadelphia, PA, USA, pp 978.

Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. http://www.rocscience.com/ education/hoeks_corner

Hoek, E., Brown E.T., 1980. Underground excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons Ltd., Hertford, London, pp 527.

ISRM, 2007. The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Eds: Ulusay R. and Hudson J.A., Kozan Ofset, Ankara.

John, M., 1972. The influence of length to diameter ratio on rock properties in uniaxial compression; A contribution to standardisation in rock mechanics testing. Rep S Afr CSIR No ME1083/5.

Mogi, K., 1966. Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 4, 41-55.

Mogi, K., 2007. Experimental Rock Mechanics. Taylor & Francis, London.

Obert, L., Duvall, W.I., 1967. Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. John Willy & Sons, London.

Obert, L., Windes, S.L., Duvall, W.I., 1946. Standardized tests for determining the physical properties of mines rocks. US Bureau of Mines Report of Investigations 3891.

Protodyakonov, M.M., 1969. Method of determining the strength of rocks under uniaxial compression. Eds: Protodyakonov M.M. et al, Mechanical properties of rocks.

Sheorey, P.R., 1997. Empirical Rock Failure Criteria, AA Balkema, Rotterdam.

Thuro, K., Plinninger, R.J., Zäh, S., Schütz, S., 2001. Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test, ISRM Regional Symposium, EUROCK 2001, Rock Mechanics – A Challenge for Society, Finland, 169-174.

Tuncay, E., Hasançebi, N., 2009. The effect of length to diameter ratio of test specimen on uniaxial compressive strength of rock. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 68(4), 491-497.

Tuncay, E., Tunar Ö.N., 2011. An evaluation on the effect of test core shape on uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock. Proceeding of Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety, EngeoPro2011, Moscow-Russia, 591-595.

Tuncay, E., Tunar Ö.N., Kalender, A., 2012. Kayaların tek eksenli sıkışma dayanımı üzerinde deney örneği şeklinin (boy/çap oranı) etkisinin araştırılması. TÜBİTAK, Proje no: 109Y307, 104s.

Ünlü, T., Yılmaz, O., 2008. Investigation of the shape effect on the uniaxial compressive strength of the intact rock, 9th Regional Rock Mechanics Symposium, İzmir, 121-141.

Granitlerde Tek Eksenli Sıkışma Dayanımının Mineral ve Dokusal Özelliklerle İlişkisi

The Relationship Between the Uniaxial Compressive Strength and Mineral and Textural Properties of Granites

S. Acar[1,*], H. Ersoy[2]

[1] TTS Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Ltd. Şti, Kozyatağı, İstanbul
[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon
*(*serhat__acar@windowslive.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölümü'ndeki granitik kayaçların dayanım özelliklerinin petrografik özelliklerle ilişkisi aranmış, bu amaçla 9 farklı bölgeden 200 adet örnek temin edilmiştir. Mineralojik tayinler sonucunda monzonit, monzogranit, granodiyorit, siyenogranit ve tonalit olarak adlandırılan kayaçlarda % 20-45 plajiyoklaz, % 5-40 ortoklaz, % 25-35 kuvars ve % 5-20 oranlarında mafik mineral tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda, ağırlıkça su emme değerlerinin % 0.14-0.55, görünür porozite değerlerinin % 0.38-1.47 ve birim hacim ağırlık değerlerinin 22-27 kN/m^3 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin 130-210 MPa, boyuna dalga hızı değerlerinin kuru örneklerde 3100-5750 m/sn, suya doygun örneklerde ise 3760-5900 m/sn arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kuvars gibi sert minerallerin varlığının granitlerin dayanımını arttırmadığı ve tane boyutu büyüdükçe granitlerin tek eksenli sıkışma dayanımlarının kısmen azaldığı belirlenmiştir. Granitlerin mafik mineral içeriğinin artması dayanımı düşürmüştür. En yüksek dayanım tek tip mineralin baskın olduğu granitlerde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Doğu Karadeniz, Granit, Petrografi, Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

ABSTRACT: *In this study, relationship between the strength properties and petrographic features of the granitic rocks in Eastern Black Sea Region with was investigated and 200 samples were obtained from 9 different regions for this purpose. According to the mineralogical determinations, in rocks named as monzonite, monzogranites, granodiorite, siyenogranit, and tonalite, %20-45 plagioclase, %5-40 orthoclase, %25-35 quartz, and %5-20 mafic minerals were identified. As a result of the experiments, it was determined that water absorption percents by weight vary between %0.14-0.55, apparent porosity values vary between %0.38-1.47, and unit weight of the granites vary between 22-27 kN/m3. In the meantime, it was observed that uniaxial compressive strength values range between 130-210 MPa, and longitudinal wave velocity values range between 3100-5750 m/sn for dry condition, and 3760-5900 m/sn for saturated condition. In the light of the evaluations, it was observed that, presence of hard minerals, such as quartz, does not increase the strength of the granites, and increase in grain size couses decrease partially of uniaxial compressive strength of the granites. Increasing the content of mafic mineral reduced resistance. It was determined that the highest strength generally occurs in granites dominated by a monotype mineral*.

Keywords: *Eastern Black Sea, Granite, Petrography, Uniaxial Compressive Strenght*

1. GİRİŞ

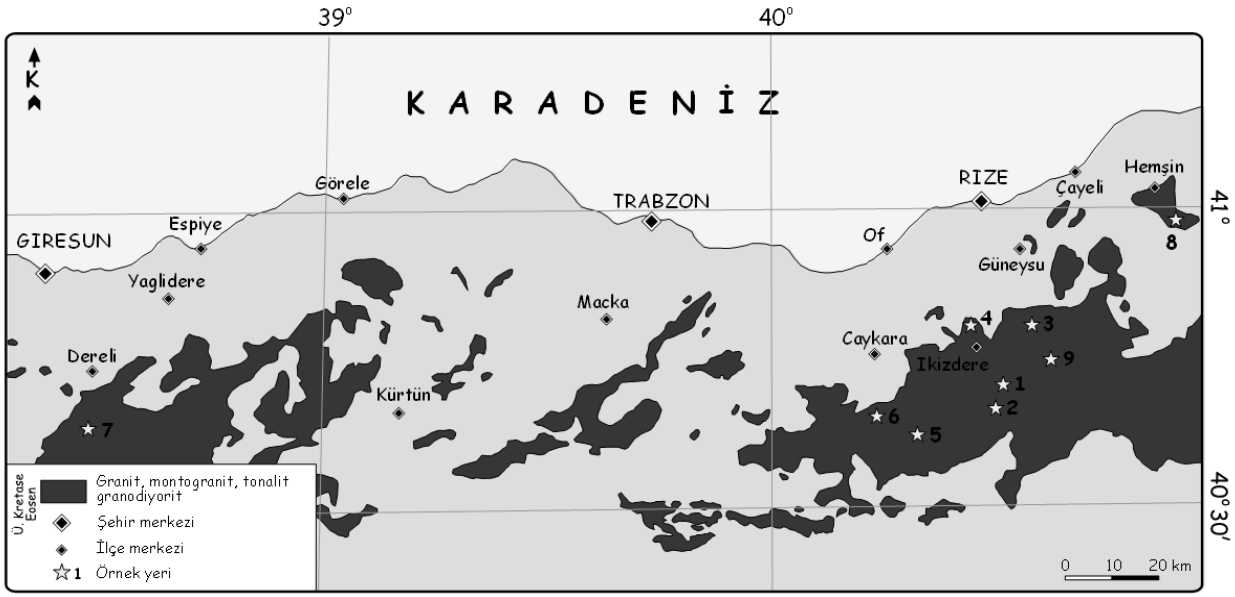
Kaya mekaniği çalışmalarında karşılaşılan en önemli güçlük yeterli büyüklükte ve sayıda numune temin edilmesi ve temin edilen numunelerin deneye uygun hale getirilebilmesi için yapılması gereken işlemlerdir. Bu nedenle birçok araştırmacı, indeks parametreler, nokta yükü dayanım indeksi, Schmidt çekici geri tepme sayısı, ultrasonik hız ve kayaçların petrografik özellikleri gibi basit deney yöntemlerinden elde edilen verileri tek eksenli sıkışma dayanımının (UCS) tahmininde kullanmaktadırlar. Bu çalışmada dokuz farklı bölgeden alınan granitik kayaç kütlelerinden elde edilen küp örnekler üzerinde yapılan deneyler ile kayaçların indeks özellikleri belirlenmiştir. İndeks özellikleri belirlenen

kayaçlar tek eksenli sıkışma dayanımı testine tabi tutulduktan sonra kırılan her numuneye ait parça üzerinden ince kesit yaptırılmıştır. İnce kesitler mikroskop üzerinde incelenerek, nokta sayım yöntemi ile kayaçların mineral yüzdeleri belirlenmiş ve kayacı oluşturan minerallerin boyut ölçümleri yapılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANININ ÖZELLİKLERİ

İnceleme alanı Karadeniz Bölgesinin Doğu Karadeniz Bölümü içerisinde olup, çalışma kapsamında 9 farklı bölgeden alınan granitik kayaçlardan örnekler üzerinde çalışılmıştır.

Doğu Karadeniz bölgesinin doğu kesimlerinde yer alan Kaçkar Dağları, Doğu Pontid kuzey zonu içindeki granitotidlerin en yoğun alandır. Bu yörede geniş ölçüde Üst Kretase yaşlı birimlerin ve daha sonraki yenilenmesi ile de Eosen yaşlı birimlerin içine sokulan intrüzif kayalar Güven (1993) tarafından, intrüzyon yaşına bakılmaksızın Kaçkar granitoyidleri adı ile tanımlanmıştır. Üst Kretase yaşlı birimleri kesen ve Eosen birimleri tarafından transgrasif olarak örtülen granitoyidler Kaçkar Granitoyidi-I, Eosen yaşlı birimler içine intrüzyon yapmış granitoyidler Kaçkar Granitoyidi-II olarak ayırt edilmiştir. Çalışmada temin edilen granitik kayaç gruplarının hepsi Kaçkar granitoyidinin bulunduğu alanlardan alınmıştır.



Şekil 1. Örnekleme noktaları

3. GRANİTLERİN PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz Bölümü'nün çeşitli yerlerinden derlenen 9 farklı gruba ait granitik kayaç bloklarından 162 adet ince kesit yaptırılmıştır. İnce kesitler mikroskopta incelenerek kaya gruplarının mineral yüzdeleri ve minerallerin ortalama, maksimum ve minimum boyut ölçümleri yapılarak petrografik özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 1).

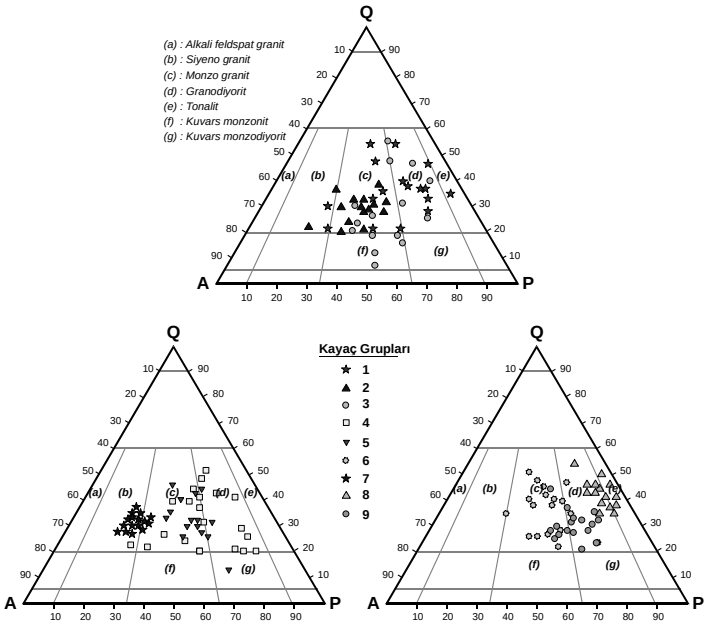
İnce kesitler, James Swift (Model MP3500MBL) marka polarizan mikroskopta ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kayaçların mineral yüzdelerinin ve boyut oranlarının belirlenmesi için modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan modal analiz sonucunda elde edilen veriler üçgen diyagramlar üzerine işlenerek kayaçların adlamaları yapılmıştır (Çizelge 2, Şekil 3).

Çizelge 1. İncelenen granitik kayaçların lokasyonları ve petrografik özellikleri.

Örnek	Loksayon	Doku	Mineraloji	Kayaç adı
1	İkizdere (Rize)	Porfirik, Monzonitik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, Hornblend, biyotit	Monzogranit, granodiorit
2	İkizdere (Rize)	Mikrolitik, Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, klorit, sfen	Monzogranit, siyenogranit,
3	Ilıcaköy (Rize)	Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit klorit, sericite	Monzogranit, granodiorit, kuvars monzonit
4	İkizdere (Rize)	Mikrolitik, Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, Hornblend, biyotit	Monzogranit, granodiorit
5	Çaykara (Trabzon)	Porfirik, Monzonitik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit, klorit	Monzogranit, granodiorit
6	Çaykara (Trabzon)	Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit, klorit, epidot	Monzogranit, granodiorit
7	Dereli (Giresun)	Mikrolitik, Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit, klorit,	Siyenogranit, monzogranit
8	Hemşin (Rize)	Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit, klorit, epidot, serizit	Granodiorit, tonalit
9	Ilıcaköy (Rize)	Mikrolitik, Porfirik	Plajiyoklaz, kuvars, ortoklaz, hornblend, biyotit, klorit,	Granodiorit, monzogranit

Çizelge 2. Örnek gruplarının modal analiz özet çizelgesi

Örnek Grupları	Kuvars (%)			Plajiyoklaz (%)			Ortoklaz (%)			Mafik (%)	Opak (%)
	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.		
1 (n: 18)	55	21	34.38	55	20	37.59	52	5	19.60	8.68	0.49
2 (n: 19)	40	20	28.26	42	20	31.56	60	25	35.94	4.04	0.38
3 (n: 17)	56	10	24.79	55	25	37.22	45	10	31.70	5.93	0.73
4 (n: 20)	50	20	30.44	68	30	40.75	50	20	22.69	6.08	0.42
5 (n: 15)	46	24	29.64	48	25	36.62	45	20	24.77	9.85	0.00
6 (n: 17)	51	22	33.43	48	20	33.28	44	15	25.69	8.08	0.14
7 (n: 21)	40	25	26.02	30	15	19.02	60	42	39.86	17.57	0.12
8 (n: 18)	52	33	37.06	60	30	44.45	15	3	6.33	12.63	0.24
9 (n: 18)	48	28	33.55	65	35	45.54	35	11	19.65	5.65	0.18



Şekil 3. Kayaç gruplarına ait modal analiz sonuçlarının QAP diyagramında dağılımı

Kayaçların mineralojik bileşimleri kadar içerdikleri minerallerin boyutları da kayaçların mekanik davranışları üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle bu çalışmada, kayaçları oluşturan minerallerin boyut analizleri yapılarak tek eksenli sıkışma dayanımı ile ilişkisi araştırılmıştır. İstatistiksel ilişkilerde kullanılan veriler Çizelge 3'de sunulmuştur.

Çizelge 3. Örnek gruplarının içerdikleri minerallerin boyut analizi özet çizelgesi

Örnek Grupları	Kuvars (%)			Plajiyoklaz (%)			Ortoklaz (%)			Mafik (%)	Opak (%)
	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.	Mak.	Min.	Ort.		
1 (n: 18)	6,06	0,34	1,61	3,30	0,36	1,34	9,20	0,60	3,21	0,90	0,17
2 (n: 19)	4,00	0,20	0,96	3,40	0,36	1,08	13,00	0,40	1,74	0,70	0,40
3 (n: 17)	6,00	0,20	1,36	4,00	0,32	1,27	11,80	0,48	3,83	0,69	0,28
4 (n: 20)	3,90	0,30	1,29	5,50	0,56	1,58	18,20	0,52	2,52	0,99	0,30
5 (n: 15)	6,70	0,30	1,53	3,00	0,30	1,18	5,20	0,34	1,35	0,74	0,17
6 (n: 17)	7,40	0,60	2,00	3,00	0,40	1,31	6,40	0,50	1,59	0,85	0,19
7 (n: 21)	3,00	0,30	1,09	1,80	0,30	0,86	8,50	0,68	2,56	0,69	0,24
8 (n: 18)	5,26	0,40	1,46	2,90	0,40	1,37	1,40	0,30	0,82	0,74	0.26
9 (n: 18)	6.20	0.55	1.98	3.95	0.30	1.25	2.90	0.25	1.16	0.65	0.21

4. GRANİTLERİN JEOMEKANİK ÖZELLİKLERİ

Kayaçların indeks özelliklerinin mekanik davranışlarına doğrudan etkisi olduğu birçok çalışma ile ispatlanmıştır. Bu çalışmada da, Doğu Karadeniz Bölümü'nde bulunan farklı granitik kayaç örnekleri üzerinde basit deneyler ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmış ve kayaçların mineralojik ve dokusal özellikleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Kayaç grupları üzerinde yapılan UCS deneyleri sonucunda; en yüksek ortalama UCS değerine 211 MPa ile 9 numaralı örneklerin, en düşük ortalama UCS değerine 134 MPa ile 7 numaralı örneklerin sahip olduğu görülmektedir. Tüm örnekler içinde hesaplanan maksimum UCS değeri 261 MPa ile 9 numaralı örnek grubu içerisinde, minumum UCS değeri ise 64 MPa ile 7 numaralı örnek grubu içerisinde hesaplanmıştır. UCS parametresi hesaplarında standart sapma değeri ise 16 ile 41 arasında değişmektedir. İstatistiksel ilişkilerde kullanılan UCS değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Kayaç grupları üzerinde yapılan sonik hız ölçüm deneyleri sonucunda; en yüksek doygun sonik hız değerine 5721 (m/sn) ile 8 numaralı, en düşük doygun sonik hız değerine 4407 (m/sn) ile 3 numaralı örneğin sahip olduğu belirlenmiştir. Tüm örnekler içinde hesaplanan maksimum doygun sonik hız değeri 5888 (m/sn) ile 8 numaralı örnek grubu içerisinde, minumum doygun sonik hız değeri ise 3759 (m/sn) ile 3 numaralı örnek grubu içerisinde hesaplanmıştır. Doygun sonik hız parametresi hesaplarında standart sapma değeri ise 123 ile 263 arasında değişmektedir.

En yüksek kuru sonik hız değerine 5535 (m/sn) ile 8 numaralı, en düşük kuru sonik hız değerine 3888 (m/sn) ile 4 numaralı örneğin sahip olduğu belirlenmiştir. Tüm örnekler içinde hesaplanan maksimum kuru sonik hız değeri 5743 (m/sn) ile 8 numaralı örnek grubu içerisinde, minumum kuru sonik hız değeri ise 3163 (m/sn) ile 3 numaralı örnek grubu içerisinde hesaplanmıştır. Kuru sonik hız parametresi hesaplarında standart sapma değeri ise 102 ile 258 arasında değişmektedir.

Su emme deneyleri sonucunda; ortalama değerler dikkate alınarak, en yüksek ağırlıkça su emme değerine % 0,49 ile 9 numaralı, en düşük ağırlıkça su emme değerine % 0,22 ile 8 numaralı örneklerin sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tüm örnekler için maksimum ağırlıkça su emme değeri % 0,56 ile 5 numaralı, minumum ağırlıkça su emme değeri ise % 0,14 ile 8 numaralı örnekte hesaplanmıştır. Ağırlıkça su emme hesaplarında standart sapma değeri ise 0.02 ile 0.05 arasında değişmektedir. İstatistiksel ilişkilerde kullanılan ağırlıkça su emme değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Görünür porozite deneyleri sonucunda; ortalama değerler dikkate alınarak, en yüksek görünür porozite değerine % 1.30 ile 9 numaralı, en düşük görünür porozite değerine % 0.58 ile 8 numaralı örneklerin

sahip olduğu görülmektedir. Tüm örnekler için maksimum görünür porozite değeri % 1.47 ile 5 numaralı, minumum görünür porozite değeri ise % 0.38 ile 8 numaralı örnekte hesaplanmıştır. Görünür porozite hesaplarında standart sapma değeri ise 0.04 ile 0.14 arasında değişmektedir. İstatistiksel ilişkilerde kullanılan görünür porozite değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. Örnek gruplarının boyuna dalga hızı ve tek eksenli basınç direnci deney verileri

Örnek Grupları	P-Dalga Hızı (Kuru, m/s)				P-Dalga Hızı (Doygun, m/s)				Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)			
	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma
1 (n: 18)	4588	3773	4230	222	5464	4568	5108	243	189	121	157	24
2 (n: 19)	4319	3709	3978	159	5148	4547	4850	124	243	126	188	34
3 (n: 17)	4291	3163	3906	274	4891	3759	4407	263	184	100	150	28
4 (n: 20)	4272	3688	3888	153	5268	4548	4972	154	182	123	158	16
5 (n: 15)	4758	4345	4585	102	5510	4854	5324	152	243	124	182	33
6 (n: 17)	4820	3969	4374	253	5449	4778	5137	237	185	109	152	20
7 (n: 21)	4922	4070	4390	258	5634	4854	5192	203	203	64	134	41
8 (n: 18)	5743	4857	5535	203	5888	5402	5721	123	226	84	141	39
9 (n: 18)	4764	3800	4206	246	5293	4479	4802	227	261	134	211	35

Su içeriği deneyleri sonucunda; ortalama değerler dikkate alınarak, en yüksek su içeriği değerine % 0,2 ile 5 numaralı, en düşük su içeriği değerine % 0,08 ile 1 numaralı örneklerin sahip olduğu görülmektedir. Tüm örnekler için maksimum su içeriği değeri % 0.24 ile 5 numaralı, minimum su içeriği değeri ise % 0,03 ile 6 numaralı örnekte hesaplanmıştır. Su içerği hesaplarında standart sapma değeri ise 0.01 ile 0.05 arasında değişmektedir. İstatistiksel ilişkilerde kullanılan görünür su içeriği değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

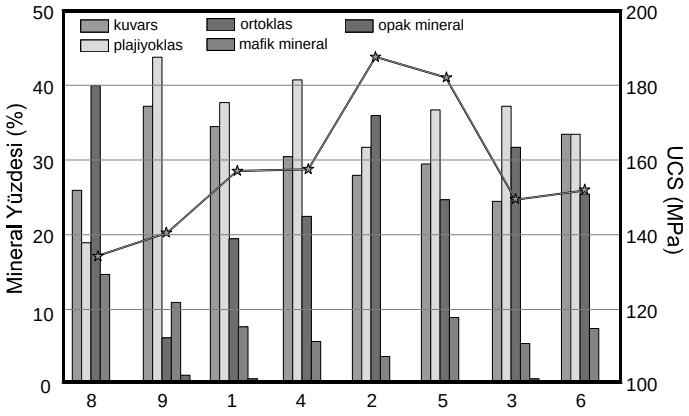
Çizelge 5. Örnek gruplarının ağırlıkça su emme, görünür porozite ve su içeriği değerleri

Örnek Grupları	Ağırlıkça Su Emme (%)				Görünür Porozite (%)				Su İçeriği (%)			
	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma	Mak.	Min.	Ort.	Std. Sapma
1 (n: 18)	0.32	0.26	0.28	0.02	0.82	0.66	0.73	0.05	0.10	0.07	0.08	0.01
2 (n: 19)	0.38	0.32	0.35	0.02	1.01	0.84	0.91	0.04	0.19	0.13	0.16	0.02
3 (n: 17)	0.42	0.27	0.32	0.04	1.11	0.72	0.84	0.10	0.13	0.08	0.10	0.01
4 (n: 20)	0.41	0.32	0.36	0.03	1.08	0.81	0.93	0.08	0.16	0.11	0.13	0.02
5 (n: 15)	0.56	0.42	0.45	0.03	1.47	1.11	1.18	0.09	0.24	0.18	0.20	0.01
6 (n: 17)	0.48	0.27	0.37	0.05	1.24	0.70	0.96	0.13	0.22	0.03	0.13	0.05
7 (n: 21)	0.34	0.21	0.26	0.05	0.88	0.54	0.68	0.14	0.15	0.06	0.09	0.03
8 (n: 18)	0.29	0.14	0.22	0.03	0.78	0.38	0.58	0.08	0.23	0.13	0.19	0.03
9 (n: 18)	0.55	0.35	0.49	0.04	1.47	0.91	1.30	0.11	0.23	0.13	0.17	0.03

5. PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİN JEOMEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

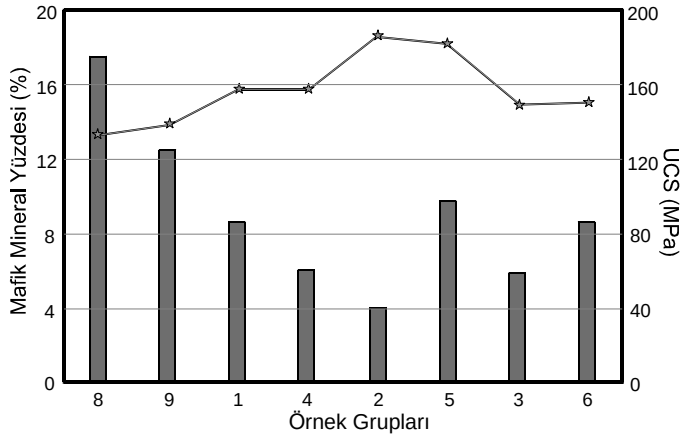
Kayaçların mekanik davranışları üzerinde etkili olan en önemli parametreler porozite, su içeriği ve su emme gibi kayaç dokusu ile ilişkili özelliklerdir. Bu nedenle literatürde mekanik özelliklerle indeks özellikler arasından birbirinden farklı birçok istatistiksel ilişki kurulmuştur. Örneğin Lashkaripour (2002), Yenice (2002), Chen ve Hu (2003) Chang vd (2006), Yalçınalp vd (2008) ve birçok araştırmacı indeks parametrelerden yola çıkarak indeks parametreler ile dayanım özellikleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı tespit etmeye çalışmışlardır.

Bu çalışmada ise mineral içeriğine bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımının değişimi araştırılmıştır. Sonuç olarak mineral yüzdesi birbirine yakın olan kayaçlarda tek eksenli sıkışma dayanımının arttığı görülmüştür (Şekil 4). 7 numaralı örnek ayrışma derecesinin yüksek olması nedeniyle değerlendirmelere alınmamıştır.



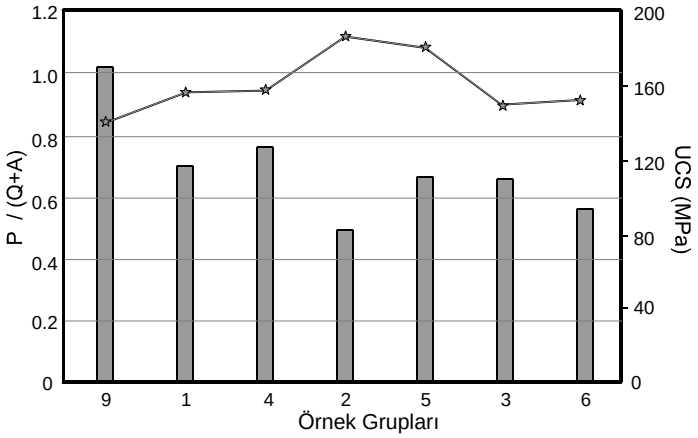
Şekil 4. Ortalama mineral yüzdeleriyle ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren histogram

Kayaçlarda genel olarak mafik mineral (biyotit ve hornblend) oranı yüzdesinin 4.04-17.57 arasında değiştiği görülmektedir. Homojen mineralli kayaçlarla heterojen mineralli kayaçların mekanik davranışı birbirinden farklı olacağından, bu çalışmada mafik mineral yüzdesinin kuvars. plajiyoklaz ve ortoklaz yüzdesine oranının tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmış ve düşük mafik mineral yüzdesine sahip kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımlarının yüksek mafik mineral yüzdesine sahip kayaçlara göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5).



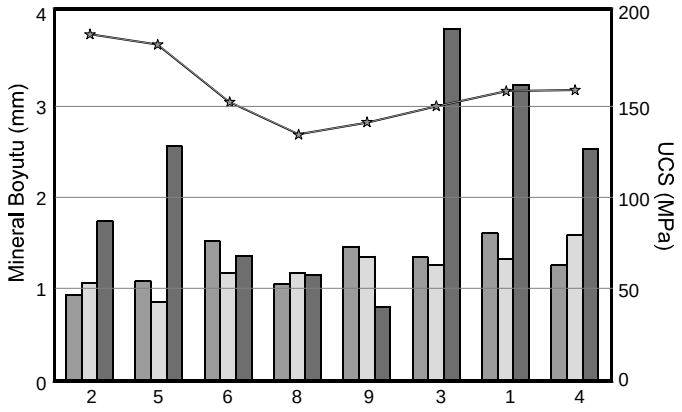
Şekil 5. Mafik mineral yüzdesinin tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisi

Bilindiği gibi, ortoklaz ve kuvars düşük sıcaklık mineralleri iken, Ca'lu plajiyoklazlar ve yüksek Na'lu plajiyoklazlar düşük sıcaklık mineralleridir. Bu kriter dikkate alınarak, plajiyoklaz mineralleri diğer iki mineralden bağımsız tutulmuş ve tek eksenli sıkışma dayanımı Plajyoklas/(Kuvars+Ortoklaz) oranı ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 6). Şekil 6'ya göre, genel olarak Plajyoklas/(Kuvars+Ortoklaz) oranı düşük olan kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımı yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Plajyoklas/(Kuvars+Ortoklaz) oranının tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisi

Kayaçların mineralojik bileşimleri kadar içerdikleri minerallerin boyutları da kayaçların mekanik davranışları üzerinde etkili bir parametredir. Bu çalışmada, ortalama tane boyutu ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında ilişkiler araştırılmış ve kayacı oluşturan minerallerin boyutlarının birbirine yaklaşık eşit olmasının dayanımı azaltmakta olduğu minerallerin boyutları arasında farklılık olmasının ise kayaçların dayanımını arttırmakta olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, mineral boyutunun küçülmesinin tek eksenli sıkışma dayanımını arttırdığını da göstermektedir. Aslında tane boyutunun yaklaşık eşit olması tek eksenli sıkışma dayanımını arttıran bir özellik olabilir. Ancak incelenen kayaçlardaki ortoklazın ortalama tane boyutunun diğer minerallere göre yüksek olması (yer yer 1cm) granitik kayaçların dayanım parametresinde ortoklazın çok etkin olduğu sonucunu doğurmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Minerallerin boyutlarının tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki etkisi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, petrografik parametreler ve tek eksenli sıkışma dayanımı arasında ilişkiler araştırılmıştır. Petrografik veriler ve tek eksenli sıkışma dayanımı verileri aynı grafikler üzerine düşürülerek arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Petrografik incelemeler sonucu mineral yüzdesi birbirine yakın olan kayaçlarda tek eksenli sıkışma dayanımının arttığı ve düşük mafik mineral yüzdesine sahip kayaçların tek eksenli sıkışma

dayanımlarının yüksek mafik mineral yüzdesine sahip kayaçlara göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmada kayacın yaklaşık %85-90'ını oluşturan kuvars, plajiyoklaz ve ortoklaz ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında bir ilişki araştırılmış. Bu ilişki araştırılırken, ortoklaz ve kuvarsın düşük sıcaklık minerali, ancak Ca'lu plajiyoklazların yüksek Na'lu plajiyoklazların düşük sıcaklık mineralleri olması göz önüne alınmış ve plajiyoklaz mineralleri diğer iki mineralden bağımsız tutularak tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri Plajyoklas/(Kuvars+Ortoklaz) oranı ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda Plajiyoklaz/(Kuvars+Ortoklaz) oranı arttıkça kayacın tek eksenli sıkışma dayanımının düştüğü gözlenmiştir.

Petrografik incelemeler sonucunda granitik kayacı oluşturan minerallerin boyutlarının birbirine yakın değerlerde olması tek eksenli sıkışma dayanımını azalttığı, mineral boyutlarının birbirinden farklı değerlerde olması ise tek eksenli sıkışma dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Ortaya çıkan sonuçta ortoklazın ortalama tane boyutunun diğer minerallere göre yüksek olması (yer yer 1cm) göz önüne alınırsa granitik kayaçlardaki dayanım parametresinde ortoklazın önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Çalışmada benzer indeks ve petrografik özelliklere sahip kayaçlarda dahi farklı dayanım değerleri elde edilmiştir. Her ne kadar taze ve ayrışmamış granit örnekleri seçilmiş olsa da, özellikle bazı ince kesitlerde serisitleşme ve kaolenleşme izlerine rastlanmıştır. Bu durum, deney sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle bu tür çalışmalarda ayrışma şekli ve derecesi mutlaka bir girdi parametresi olarak düşünülmelidir.

6. KAYNAKLAR

Chang, C., Zoback, M. D., Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum and Engineering, 51, 223-237.

Chen, H., Hu, Z., 2003. Some factors affecting the uniaxial strength of weak sandstones. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62, 323-332.

Ersoy, H., Kanık, D., 2012, Multicriteria decision-making analysis based methodology for predicting carbonate rocks' uniaxial compressive strength, Earth Sciences Research Journal, 16(1), 65–74.

Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara.

Kılıç, A., Teymen, A., 2007. Determination of mechanichal properties of rocks using simple methods. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

Lashkaripor, G.R., 2002. Predicting mechanical properties of mudruck from index parameters. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 61, 73-77.

Sönmez, H., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 2004. Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 849-857.

Tuğrul A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from turkey. Engineering Geology, 51, 303-317.

Yalçinalp, B., Ersoy, H., Ersoy, A.F., Keke, C., 2008. Bahçecik (Gümüşhane) travertenlerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 25-34.

Yenice, H., 2002. Bazı Kayaçların tek eksenli basınç dayanımları ile diğer malzeme özellikleri arasındaki ilişkiler. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 4, 65-71.

Doğrudan Makaslama Deneyinde Makaslama Hızının Kumların Makaslama Dayanımı Parametrelerine Olan Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Shear Rate Effect on the Shear Strength Parameters of Sands ın Direct Shear Test

M. Beren[1,*], İ. Çobanoğlu[2], S. B. Çelik[2]

[1] *İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar Kampüsü İstanbul, Türkiye*

[2] *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 20017, Kınıklı Kampüsü, Denizli, Türkiye*

*(*murat.beren@istanbul.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışma, doğrudan makaslama deneyinde makaslama hızının, makaslama dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla Denizli ilindeki kum çökellerinden alınan iki farklı kum örneği üzerinde doğrudan makaslama dayanımı deneyleri yapılmıştır. İlk grup örnek elek setinde #60 ile #200 No'lu elekler arasından, ikinci grup örnek ise #40 ile #60 No'lu elekler arasından alınmıştır. Deneylerde, örselenmiş kum örnekleri 6x6x2 cm boyutlarında makaslama kutusuna yerleştirilmiş, 54,5, 109, 218 kPa normal gerilmeler altında 0.05 mm/dak ile 5 mm/dak arasında değişen 9 farklı makaslama hızında 96 adet makaslama dayanımı deneyi gerçekleştirilmiş. Deney sonuçlarına göre hem drenajlı hem de drenajsız koşullarda makaslama hızı arttıkça; içsel sürtünme açısı (ϕ) ve doruk makaslama dayanımı değerlerinde artış gözlenirken, kohezyon (c) değerlerinde ise ya azalma gözlenmiş ya da herhangi bir değişiklik kaydedilmemiştir. Drenajsız koşuldaki makaslama hızı etkisinin drenajlı koşula göre daha az olduğu görülmüştür. Tüm deneylerde, makaslama hızı değerleri, 0.05 mm/dak'dan 5 mm/dak'ya doğru arttıkça drenajlı ve drenajsız koşullar için içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri sırasıyla 3.5° ve 3° civarında artışlar göstermiştir. Bunun yanı sıra, makaslama hızı artışıyla doruk makaslama dayanımı değerlerinde, her iki örnek için, drenajlı ve drenajsız koşullarda sırasıyla 5 ve 3 kPa dolayında artışlar gözlenmiştir. Öte yandan drenajsız koşulda, kohezyon (c) değerlerinde 3 kPa civarında değişiklik gözlenirken drenajlı koşulda ikinci grup örnek için makaslama hızının kohezyon değerleri üzerinde herhangi bir etkisinin olduğu görülmemiştir. Sonuçlara bağlı olarak, doğrudan makaslama deneyinde, konsolidasyon deneyinden elde edilen hız yerine, 0.7 veya 1 mm/dak gibi ortalama hızların kullanılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğrudan Makaslama Deneyi, İçsel Sürtünme Açısı, Kohezyon, Doruk Makaslama Dayanımı, Makaslama Hızı

ABSTRACT: *This study was performed to investigate the effects of different shear rates on the shear strength parameters in direct shear test. For this purpose, direct shear tests were performed fort wo sand samples which collected from sand deposits in Denizli. The first group was taken between #60 and #200 sieves and second one is between #40 and #60 sieves. Before each test, disturbed sand samples were placed in 6x6x2cm sized shear box and totally 96 tests were carried out at 9 different shear rates (0.05 to 5 mm/min), under 54.5, 109, 218 kPa normal stresses. According to test results, it is observed that in both drained and undrained conditions, while the shear rate was increased, internal friction angle (ϕ) and peak shear strength values increased up to a certain amount however no change or a decrease was observed for the cohesion (c) values. In undrained condition, the effect of shear rate was found less than in drained condition. For all tests, with increasing the shear rate from 0.05 to 5 mm/min, internal friction angle (ϕ) values increased about 3.5 and 3 degree for drained and undrained conditions respectively. In addition, for both samples, in drained and undrained conditions peak shear strength values increased about 5 kPa and 3 kPa respectively. On the other hand, variation of cohesion (c) values in undrained condition found about 3 kPa..In drained condition, especially for 2nd group of sample it is shown that the shear rate has no effect on cohesion values. Depending on these results, for direct shear test, usage of the average rates such as 0.7 or 1 mm/min has been proposed instead of shear rate which derived from the consolidation test.*

Keywords: *Direct Shear Test, Internal Friction Angle, Cohesion, Peak Shear Strength, Shear Rate*

1. GİRİŞ

Zeminlerin makaslamadayınımı parametreleri,şev duraylılığı ve tasarımı, taşıma kapasitesi hesaplamaları ve zemin iyileştirmesi gibi mühendislik jeolojisi ve jeoteknik mühendisliği uygulamalarında oldukça önemli bir parametrelerdir.

Jeoloji ve jeoteknik mühendisliğinde, zeminin makaslama dayanımı parametrelerini belirlemede, doğrudan makaslama dayanımı deneyinde boşluk suyu basıncının ölçülememesinden dolayı, üç eksenli sıkışma deneyien uygun deney olarak görünmektedir.Fakat üç eksenli sıkışma deneyindeartık (rezidüel) dayanım parametrelerinin tayin edilmesi söz konusu değildir ve doğrudan makaslama dayananımı deneyi çok daha pratiktir. Bu yüzden doğrudan makaslama deneyi de makaslama dayanımı parametrelerini belirlemede kullanılabilmektedir.

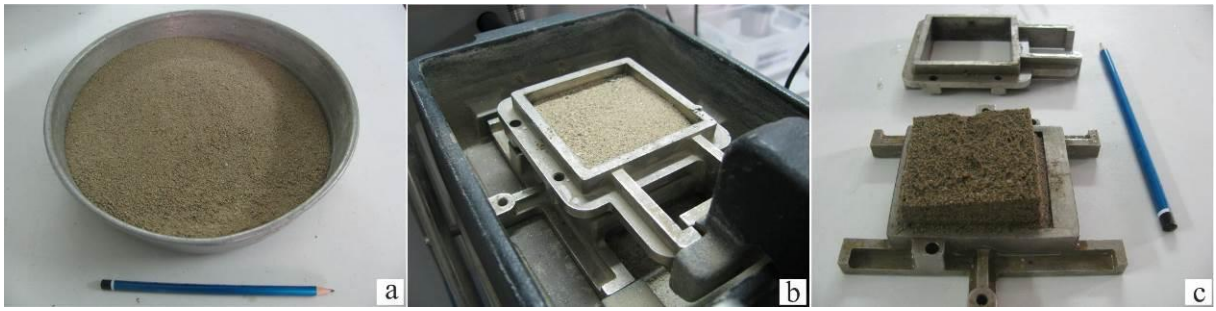
Bu çalışmanın amacı doğrudan makaslama deneyinde, makaslama hızının, makaslama dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini incelemek ve makaslama hızı arttıkça makaslama dayanımı parametrelerinin de arttığını göstermektir.ASTM D 3080 (2012) standardı doğrudan makaslama deneyi için önerilen standart olup, bu çalışmadaki tüm deneyler bu standarda uygun olarak yapılmıştır. Bu standartta makaslama hızının belirlenmesi, konsolidasyon yüzdelerinin bir fonksiyonu olarak önerilmektedir. Ancak bu yöntemle elde edilen hız, zaman alıcı olduğu için ve deney yöntemi de dikkate alındığında zamanı daha fazla uzatacağı için pratik değildir.

Uygun makaslama hızının seçilmesi, makaslamaya dayalı olarak gelişen aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle de çok büyük önem taşımaktadır. Yavaş makaslama hızlarında efektif boşluk suyu basıncıyla karşılaşılmamaktadır. Bunun aksine yüksek makaslama hızlarında ise, kayma düzleminde efektif boşluk suyu basıncı aniden artış göstermektedir. Bu artış daha yüksek makaslama dayanımı parametreleri elde edilmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada da yüksek makaslama hızlarında, daha yüksek makaslama dayanımı parametrelerinin elde edileceği gösterilmeye çalışılmıştır.

Makaslama hızının, makaslama dayanımı parametrelerine olan etkisini incelemek amacıyla daha önce yapılmış olan çalışmalarda Therman vd. (2006), akarsu sediman örnekleri için 0.5, 0.05 ve 0.005 mm/dak makaslama hızlarını seçmiş ve yüksek makaslama hızlarında, gözenek suyu basıncının artmasıyla efektif gerilemelerin azaldığını belirtmiştir. Saito vd. (2006), dört farklı makaslama hızı (0.01 mm/dak, 0.1 mm/dak, 1 mm/dak ve 10 mm/dak)ile silis kumunda artık içsel sürtünme açısını her hızda yaklaşık olarak 34° olarak belirlemiştir. İllit ve bentonit ile karıştırılmış örneklerde 1 ve 10 mm/dak makaslama hızlarında sürtünme açısı yaklaşık olarak aynı bulunurken, düşük makaslama hızlarında daha da düşük olduğu görülmüştür (Saito vd.).Nakao vd. (2009), iri taneli dolgu malzemesi için makaslama deneyleri gerçekleştirmiş ve 7.06 mm/dak, 0.63 mm/dak ve 0,05 mm/dak makaslama hızlarında büyük makaslama kutusu için doruk ve artık içsel sürtünme açılarını sırasıyla 33.4º, 37.1º, 36.2º ve 32.4º, 34.3º, 34.3º olarak tespit etmiştir. Küçük makaslama kutusunda ise 6.7 mm/dak ve 0.44 mm/dak hızlarda doruk ve artık içsel sürtünme açılarını sırasıyla 30.2º ve 31.6º olarak belirlemişlerdir. Wang vd. (2009), halka tipi makaslama kutusu kullanarak serpantinit örnekleri üzerinde deneyler gerçekleştirmiş ve makaslama hızı arttıkça artık makaslama dayanımının da önemli derecede arttığını tespit etmiştir. Teuten (2012), farklı oranlarda kil/silt içeriğine sahip örnekler üzerinde yaptığı deneylerde; %43 kil içeriğine sahip örnekler için 0.158 mm/dak makaslama hızının yüksek olduğunu belirlerken, 0.528 mm/dak makaslama hızında ise aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle doruk makaslama dayanımında artış tespit etmiştir. Al-Mhaidib (2006), doğrudan makaslama deney aleti kullanarak kohezyonsuz örnekler üzerinde yaptığı çalışmada makaslama hızı arttıkça içsel sürtünme açısının da arttığını belirlemiş ve eşitlikler ile bunu göstermiştir. Beren (2014) ise, kum örnekleri üzerinde 0.05 mm/dak ile 5 mm/dak arasındaki farklı hızlarda deneyler gerçekleştirmiş ve bu makaslama hızlarının kayma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir.

2.ÖRNEK HAZIRLAMA

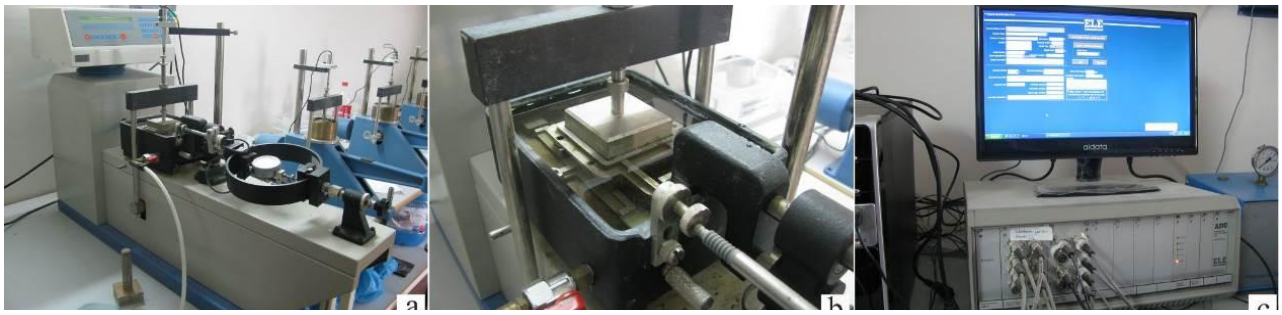
Bu çalışmada kullanılan deney örnekleri Denizli ilindeki Neojen yaşlı sedimanlardan ve Denizli iline bağlı Yenice ilçesindeki kum ocaklarından alınmıştır. Farklı tane büyüklüğündeki kum örnekleri üzerinde makaslama hızı etkisinin değişimlerini incelemek için #200 No'lu ve #60 No'lu elekler üzerinde iki tip örnek hazırlanmıştır. Tüm örnekler %7.5 su içeriğinde homojen bir şekilde karıştırılıp makaslama kutusu içerisine yerleştirildikten sonra tokmak yardımıyla sıkıştırılmış ve her örneğin aynı deney koşullarında deneye tabi tutulması sağlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. (a) #200 No'lu elek üzerinde kalan deney örneği, (b) örneğin deneye hazırlanması ve (c) deneye tabi tutulduktan sonra örneğin görüntüsü

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışmadaki tüm deneyler, Pamukkale Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Makaslama hızının makaslama dayanımı parametreleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki grup örselenmiş kum örneği üzerinde 0.05 mm/dak'dan 5 mm/dak'ya kadar değişen 9 farklı makaslama hızı uygulanmıştır. Toplam 96 laboratuvar deneyi yapılmıştır. Doğrudan makaslama deneyi genellikle elle yapılmasına rağmen, bu çalışmada makaslama kutusu cihazına bağlı olan otonom veri toplama ünitesi (ADU) kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. (a-b) Makaslama kutusu cihazı, (c) otonom veri toplama ünitesi

Deney aleti elektronik olarak kontrol edilebilmekte ve çok yavaş makaslama hızlarından (örn. 0.05 mm/dak) çok yüksek makaslama hızlarına (örn. 5 mm/dak) kadar deney yapabilmektedir. Tüm veriler (yanal deformasyonlar, düşey deformasyonlar, kayma gerilmeleri) elektronik olarak kaydedilip DS7 yazılımı kullanılarak makaslama dayanımı parametreleri (içsel sürtünme açısı, kohezyon ve doruk makaslama dayanımı) hesaplanmıştır.

Her örnek için deneyler drenajlı (suyun uzaklaştırılmasına izin verilerek-1. deney yöntemi) ve drenajsız (su kaçışına engel olunarak-tamamen su içerisinde-2. deney yöntemi) koşullarda üç farklı normal gerilme altında (54.5, 109 ve 218 kPa) gerçekleştirilmiştir. 9 farklı makaslama hızı (0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2, 4, 5 mm/dak) kullanılmıştır ve her hız için 3 deney olmak üzere toplam 96 adet deney yapılmıştır.Deneyler tamamlandıktan sonra tüm örnekler için Mohr zarfları çizilmiş ve içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri belirlenmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI

Tüm deneyler; birinci grup #60 No ile #200 ikinci grup #40 ile #60 No.lu elekler arası örnek olmak üzere, iki grup şeklinde yapılmıştır. Her makaslama hızı için tüm deney verileri DS7 programında analiz edilmiş ve içsel sürtünme açısı, kohezyon ve doruk makaslam adayanımı değerleri elde edilmiştir. #60 No ile #200 No.lu elekler arası örnek için drenajsız koşullarda örnek eksikliğinden dolayı 5 set deney yapılmıştır. Çizelge 1'de #60 No ile #200 No.lu elekler arası kum örneği için drenajlı ve drenajsız koşullarda elde edilen deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 1. #60 No ile #200 No.lu elekler arası kum örneği için makaslama hızı artışıyla değişen makaslama dayanımı parametreleri

Makaslama hızı (mm/dak)	Drenajlı durum (1.deney yöntemi)			Drenajsız durum (2.deney yöntemi)		
	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (kPa)	Doruk makaslama dayanımı (218 kPa normal gerilme için) (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (kPa)	Dorukmakaslama dayanımı (218 kPanormalgerilme için) (kPa)
0.05	31.25	4.40	139.7	30.67	3.81	133.5
0.1	31.18	4.10	138.1	30.69	4.04	133.4
0.3	31.68	3.00	139.9	31.10	4.69	135.6
0.5	31.38	4.20	139.2	31.65	3.96	136.4
0.7	32.06	3.04	141.2	31.88	4.11	137.5
1	32.10	2.61	139.3	---	---	---
2	32.54	2.05	141.1	---	---	---
4	32.77	2.01	142.1	---	---	---
5	33.33	1.36	143.7	---	---	---

Birinci grup örnekler için, makaslama hızı arttıkça içsel sürtünme açısı makaslama dayanımı değerlerinde önemli derecede artış gözlenirken, kohezyon değerlerinde azalma gözlenmiştir.

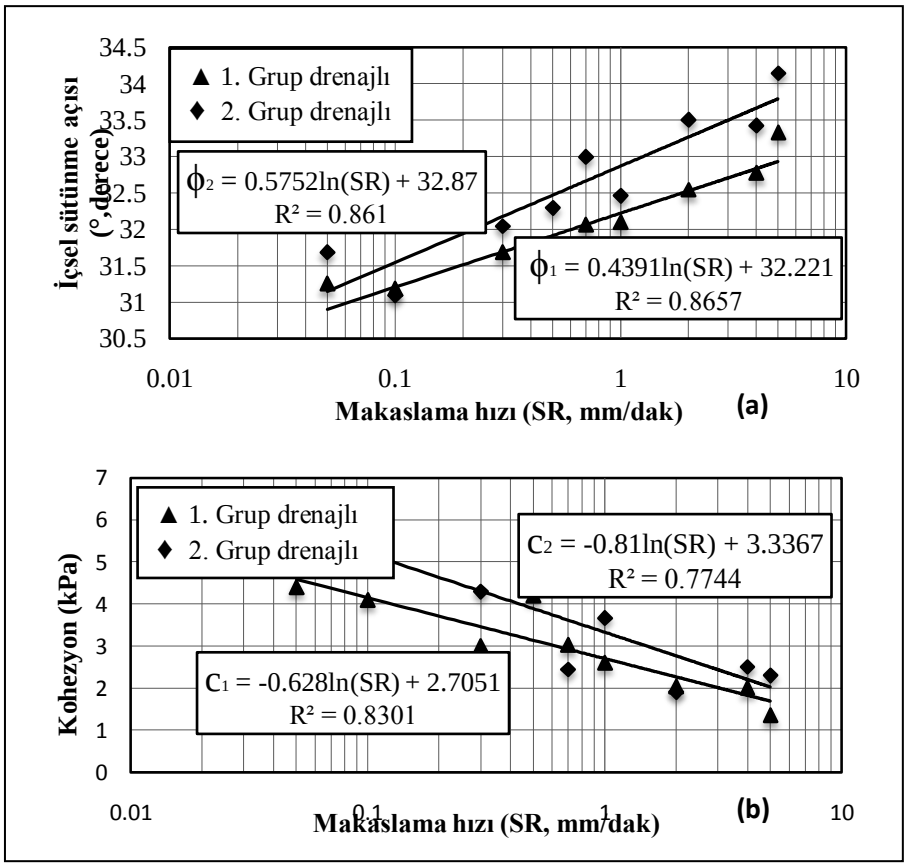
İkinci grup deneyler ise,#40 ile #60 No.lu elekler arasında kalan kum örneği üzerinde yapılmıştır. Bu grup örnekler, birinci gruba göre daha iri taneler içermektedir. İkinci grup örnek için drenajlı ve drenajsız koşullarda yapılan deneylerin sonuçları ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. #40 ile #60 No.lu elekler arası kum örneği için makaslama hızı artışıyla değişen makaslama dayanımı parametreleri

Makaslama hızı (mm/dak)	Drenajlı durum (1.deney yöntemi)			Drenajsız durum (2.deney yöntemi)		
	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (kPa)	Dorukmakaslamadayanımı (218 kPanormalgerilme için) (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Kohezyon (kPa)	Dorukmakaslama dayanımı (218 kPa normal gerilme için) (kPa)
0.05	31.68	5.58	143	31.78	1.21	140.3
0.1	31.09	5.4	143.6	31.87	1.18	139.8
0.3	32.04	4.3	142.6	31.68	1.23	141.7
0.5	32.29	5.03	143	32.05	1.03	139.1
0.7	32.99	2.45	143.5	32.15	0.72	140.9
1	32.46	3.67	144.3	32.9	0.7	143.1
2	33.5	1.91	146.2	33.1	1.06	144
4	33.42	2.51	145.7	32.67	0.8	142.4
5	34.14	2.31	148.5	33.08	0.75	143.8

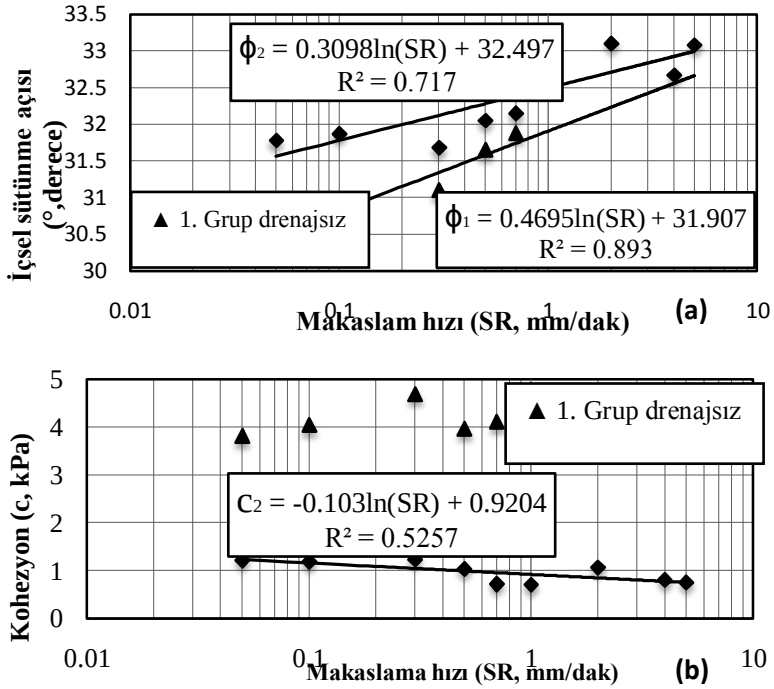
İkinci grup örnek için birinci gruba benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Makaslama hızının kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, iki grup kum örneklerinin deney verisi grafiğe işlenmiş ve yenilme zarfları çizilmiştir. Birinci grup örneklerin drenajlı durumdaki deney sonuçlarında, 0.05 mm/dak hızdan 5 mm/dak hıza kadar içsel sürtünme açısında 2°, doruk makaslama dayanımında 4kPa'lık bir artış gözlenirken, kohezyon ise 3kPa azalmıştır. Ayrıca, ikinci grup örneklerin drenajlı durumdaki deney sonuçlarına bakıldığında, içsel sürtünme açısı 2.5°, doruk makaslama dayanımı (218 kPa normal gerilme altında) 5.5 kPa artarken, kohezyon 3 kPa azalmıştır.Her iki grup örneğin drenajlı koşullardaki deney sonuçlarına göre makaslama hızına karşılık gelen kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişimler ve bunlara ait korelasyon katsayıları Şekil 3'tegrafiklerle gösterilmiştir.



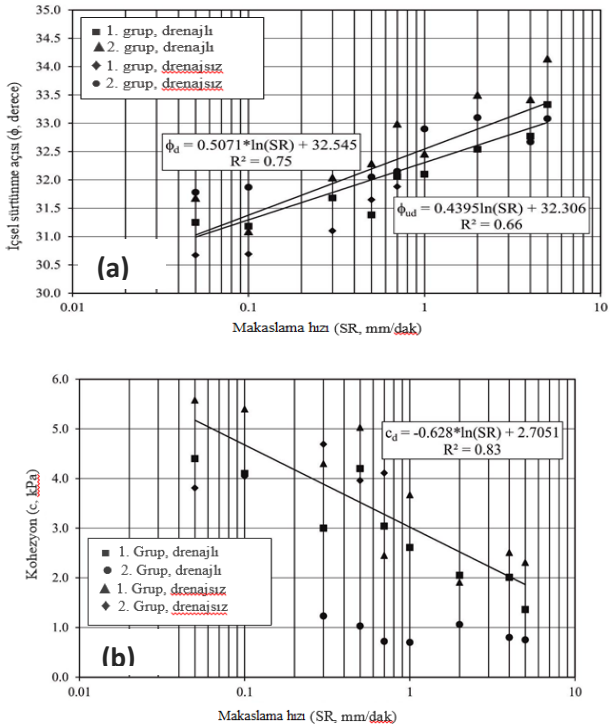
Şekil 3. Drenajlı koşullarda kesme hızı artışıyla birinci ve ikinci grup örneklerdeki içsel sürtünme açısı (a) ve kohezyon değeri (b)değişimleri

Birinci grup örnek için drenajsız koşullarda, 0.05 mm/dak'dan0.7 mm/dak hıza kadar içsel sürtünme açısında 1°, doruk makaslama dayanımında (218 kPa normal gerilme altında) 4 kPa artış, kohezyonda ise 0.5 kPa civarında bir değişim gözlenmiştir. Drenajsız koşullarda ikinci grup örnekte, 0.05 mm/dak'dan 5 mm/dak'ya kadar içsel sürtünme açısında 1.5°, doruk makaslama dayanımında (218 kPa normal gerilme altında)3.5 kPa artış, kohezyon değerlerinde ise 0.5 kPa bir azalma söz konusudur. Drenajsız koşullarda makaslama hızının artışıyla hesaplanan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinin değişimi korelasyon katsayıları Şekil 4'te verilmiştir. Ancak ilk grup için örnek yetersizliği ve sınırlı veri olması nedeniyle kohezyon değerlerinde bir korelasyon sağlanamamış ve ilgili grafik çizilmemiştir.



Şekil 4. Drenajsız koşullarda makaslama hızı artışıyla birinci ve ikinci grup örneklerdeki içsel sürtünme açısı (a) ve kohezyon değeri (b) değişimleri

Test edilen kum örnekleri için genelleştirilmiş ilişkileri belirlemek için iki grup örneğin test verileri birlikte değerlendirilerek ilişkiler önerilmiştir. Şekil 8 ve 9'da drenajlı ve drenajsız koşullarda makaslama hızının içsel sürtünme açısı ve kohezyon üzerindeki etkisi sırasıyla verilmiştir. Drenajsız durumdaki makaslama hızının artan içsel sürtünme açısında ve azalan kohezyon değerlerinde, drenajlı durumdaki makaslama hızına göre, daha düşük bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, drenajsız durumdaki artan gözenek suyu basıncıyla açıklanabilir.



Şekil 4. Tüm deneyler için drenajlı ve drenajsız durumlarda makaslama hızı artışıyla meydana gelen içsel sürtünme açısı (a) ve kohezyon (b) değişimleri

Diğer araştırmacılar (Al-Mhaidib (2006) ve Anim (2010)) tarafından daha önce önerilen ilişkiler Çizelge 3'te, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve ilişkiler ise Çizelge 4'te verilmiştir. Deney sonuçlarının dağılımı, korelasyonu en yüksek logaritmik ilişkilerle karakterize edilmektedir. Bu ilişkilerden makaslama hızı ile elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri deneye tabi tutulan kum örnekleri için geçerlidir.

Çizelge 3. Makaslama hızının içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisini gösteren daha önceki çalışmalar

Zemin tipi	İlişkiler	Araştırmacı
Kum (kötü derecelenmiş)	ϕ=1.50ln(SR)+46.08 (R^2=0.93)	Al-Mhaidib (2006)
Dere yatağı malzemesi (kuru)	ϕ=0.8513ln(SR)+37.5 (R^2=0.87)	Anim (2010)
Dere yatağı malzemesi (%8 su içeriğine sahip 1. örnek)	ϕ=0.9755ln(SR)+36.7 (R^2=0.89)	Anim (2010)
Dere yatağı malzemesi (%8 su içeriğine sahip 2. örnek)	ϕ=1.1105ln(SR)+32.5 (R^2=0.99)	Anim (2010)

*ϕ: içsel sürtünme açısı (derece); SR: Makaslama hızı (mm/dak)

Çizelge 4. Drenajlı ve drenajsız koşullarda makaslama hızının içsel sürtünme açısı ve kohezyon üzerindeki etkisi için önerilen ilişkiler

Deney tipi	Tane boyu (Elek numarası)	Zemin tipi	İlişkiler	
Drenajlı	1. grup #60-#200	Kum	ϕ_1=0.4391ln(SR)+32.221 (R^2=0.87)	c_1=-0.628ln(SR)+2.7051 (R^2=0.83)
Drenajlı	2. grup #40-#60	Kum	ϕ_2=0.5752ln(SR)+32.87 (R^2=0.86)	c_2=-0.811ln(SR)+3.3367 (R^2=0.77)
Drenajsız	1. grup #60-#200	Kum	ϕ_1=0.4695ln(SR)+31.907 (R^2=0.89)	---
Drenajsız	2. grup #40-#60	Kum	ϕ_2=0.3098ln(SR)+32.497 (R^2=0.72)	c_2=-0.103ln(SR)+0.9204 (R^2=0.53)
Drenajlı	1. & 2.	Kum	ϕ_d=0.5071ln(SR)+32.541 (R^2=0.75)	c_d=-0.628ln(SR)+2.7051 (R^2=0.83)
Drenajsız	1. & 2.	Kum	ϕ_u=0.4395ln(SR)+32.306 (R^2=0.66)	---

*ϕ: İçsel sürtünme açısı (derece); c: Kohezyon

5.SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada,doğrudan makaslama dayanımı deneyinde makaslama hızının makaslama dayanımı parametreleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda iki farklı kum örneği üzerinde çalışılmıştır. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

Tüm deney sonuçlarının ışığında, makaslama hızı arttıkça, içsel sürtünme açısı değerlerinde de artış gözlenirken, kohezyon değerlerinde azalma gözlenmiş ve kohezyon değerlerinin kesme hızından çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Makaslama hızı arttıkça, kohezyon değerlerindeki çok az bir azalma veya değişiklik meydana gelmemesi, artan boşluk suyu basıncıyla açıklanabilmektedir. Tüm deney sonuçları göz önüne alındığında,makaslama hızının 0.05 mm/dak'dan 5 mm/dak'ya artışında drenajlı ve drenajsız koşullarda içsel sürtünme açısında sırasıyla 3.5° ve 3° artışlar meydana gelmiştir.

Drenajsız durumda kohezyon değerindeki fark yaklaşık 3 kPa civarında iken, drenajlı durumda özellikle ikinci grup örnek için kohezyon üzerinde belirli bir etki gözlenmemiştir. 1 mm/dak'dan yüksek makaslama hızlarında, doruk makaslama dayanımlarında önemli bir artış gözlenmiştir. Bu durumda boşluk suyu basıncının etkisini azaltmak ve makaslama dayanımında ortalama değerleri elde etmek adına yüksek makaslama hızlarından kaçınılmalıdır. 1 mm/dak veya 0.7, 0.5 mm/dak gibi daha düşük hızlar doğru sonuçlar elde etme konusunda daha makul görülmektedir. Ayrıca daha yüksek makaslama hızlarında daha yüksek makaslama dayanımı parametreleri elde edildiği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu özellikle kritik projelerin mühendislik tasarımında çok önemlidir.

ASTM D 3080 Standardı'nda örneğin tane boyutuna ilişkin bir makaslama hızından bahsedilmemiş olup, örnek için yapılan konsolidasyon deneyine göre bir makaslama hızı belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan kum örnekleri için, konsolidasyon deneyi yapılarak makaslama hızı 0.005 mm/dak olarak bulunmuş ve bu hızda da deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde makaslama dayanımı parametrelerinin, çalışmada kullanılan düşük makaslama hızlarıyla (ör. 0.5, 0.7, 1 mm/dak) elde edilen makaslama dayanımı parametrelerinden çok farklı olmadığı görülmüştür.

Makaslama hızının, makaslama dayanımı parametreleri üzerindeki etkisi ilgili gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı tane büyüklüğüne sahip kum ve kohezyonlu örnekler kullanılmalıdır. Bu şekilde veri aralığı genişletilmiş olup daha genel ve daha geçerli denklemlerin önerilmesi mümkün olacaktır.

6.KAYNAKLAR

Al-Mhaidib, A.I., 2006. Influence of shearing rate on interfacial friction between sand and steel. Engineering Journal of the University of Qatar, 19, 30-35.

Anim, K., 2010. Effects of strain rate on the shear strength of questa rock pile materials. PhDThesis,New Mexico Institute of Mining and Technology, Department of Mineral Engineering, Mexico.

ASTM D 3080, 2012.Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Beren,M., 2014.Doğrudan makaslama deneyinde makaslama hızının kumların makaslama dayanımı parametrelerine olan etkisinin incelenmesi. Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye.

Nakao, T., Fityus, S., 2009. Direct shear testing of a marginal material using a large shear box. Geotechnical Testing Journal,31 (5), 393-403.

Saito, R., Fukuoka, H., Sassa, K., 2006. Experimental study on the rate effect on the shear strength. International Symposium Disaster Mitigation of Debris, Flows, Slope Failures and Landslides. Niigata, Japan,421–427.

Teuten, J.M., 2012. Shear characteristics of soils with varying silt/clay fractions. 1st Civil and Environmental Engineering Student Conference, Imperial College London, England, 13-18.

Thermann, K., Gau, C., Tiedemann, J., 2006.Shear strength parameters from direct shear tests-influencing factors and their significance. IAEG 2006, 484-495.

Wang, G., Suemine, A., Schulz, W.H., 2010.Shear-rate-dependent strength control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan. Earth Surface Processes and Landforms, 35, 407-416.

Zeminlerin Hacimsel Büzülme Limitinin Belirlenmesinde Uygulanan Standart Yöntemlerin Karşılaştırılması

Comparison of the Standard Methods Used in Determination of Volumetric Shrinkage Limit of Soils

T. K. Yavuz[1], M. Özer[2,*]

[1] *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğt. A.B.D., 06500 Teknikokullar/Ankara*
[2] *Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü, 06500 Teknikokullar/Ankara*
*(*ozerm@gazi.edu.tr)*

ÖZ: Zeminlerin hacimsel büzülme limitinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan cıva taşırma yönteminin yer aldığı ASTM D427 standardı cıvanın insan sağlığına zararlı olması sebebiyle 2008'de yürürlükten kaldırılmıştır. Bu nedenle, cıva kullanımını gerektiren yöntemlerin yerine, parafin kaplama yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bu çalışmada; Ankara'nın dört farklı bölgesinden alınan altı adet numune üzerinde, sırasıyla ASTM D427-04'te, BS 1377-2: 1990'da, ASTM D4943-08'de ve TS EN ISO 17892-2: 2014'de tanımlanan cıva taşırma yöntemi, cıvalı büzülme cihazı yöntemi, parafin kaplama yöntemi ve sıvı taşırma yöntemleri olmak üzere dört farklı yöntemle belirlenen büzülme limiti değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, parafinin birim hacim kütlesinin büzülme limiti değerleri üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; parafinin birim hacim kütlesinin parafinli yöntemlerle belirlenen büzülme limiti değerleri üzerindeki etkisinin çok büyük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yöntemler titizlikle uygulandığı takdirde, bu çalışmada karşılaştırılan dört yöntemin de birbiriyle uyumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır. Bu sonuçlara göre, yürürlükten kaldırılan cıvalı yöntemlerle bulunan büzülme limiti değerlerinin, parafinli yöntemlerle bulunan büzülme limiti sonuçlarıyla birlikte güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atterberg Limitleri, Büzülme Limiti, Cıva, Killi Zeminler, Parafin

ABSTRACT: *ASTM D427, which is commonly used for determinig the volumetric shrinkage limit of soils was withdrawn in 2008, since mercury is a hazardous substance for human health. For this reason, instead of the methods that suggest the use of mercury, paraffin coating methods have become popular. In this study, shrinkage limit values obtained from four different methods including mercury method, schrinkage limit apparatus method, wax method, and water immersion metod described in the ASTM D427-04, BS 1377-2: 1990, ASTM D4943-08 and EN ISO 17892-2:2014, respectively, were compared on six different samples taken from four different region of Ankara. Furthemore, the effect of density of paraffin on the shrinkage limit value of the soils was investigated. Based on the test results, it was determined that the effect of density of paraffin on the shrinkage limit values obtained by wax methods was pronounced. In addition, it was found out that if the relevant procedures fallowed carefully, four methods compared in this study give similar and consistent results. Hence, it was concluded that the shrinkage limit values obtained by mercury methods, can be used safely with those obtained by wax methods.*

Keywords: *Atterberg Limits, Clayey Soils, Mercury, Parafin, Shrinkage Limit*

1. GİRİŞ

Zeminlerin su içeriğine bağlı olarak kıvamlarında meydana gelen değişimler ilk kez 1911'de toprak bilimci A. Atterberg tarafından çalışılmıştır (Bauer, 1960). Atterberg, tarım topraklarını sınıflandırmak amacıyla basit el aletleriyle belirlenebilen beş farklı kıvam limiti tanımlamış olup, bunlardan likit limit, plastik limit ve büzülme limiti olmak üzere üç tanesi zemin mekaniğinde yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Zeminlerin sahip oldukları su içeriklerine göre kıvam durumlarını birbirinden ayırdığı için kaynaklarda "kıvam limitleri" olarak bilinen bu sınır su içerikleri geliştiricisinin adına atfedilerek birçok kaynakta "Atterberg limitleri" olarak da anılmaktadır. Kıvam limitlerinden likit limit; zeminin

kendi ağırlığı altında bir sıvı gibi akabildiği en düşük su içeriği, plastik limit; zeminde kırılıp kopmalar meydana gelmeden şekil verilebilen en düşük su içeriği, büzülme limiti ise zeminin en düşük hacme eriştiği andaki su içeriği olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerde büzülme limiti; "hacimsel büzülme limiti" ve "doğrusal büzülme limiti" olmak üzere iki farklı şekilde belirlenebilmektedir. Doğrusal büzülme limiti ince, uzun çubuk şeklinde hazırlanan bir örneğin kuruma sonucunda boyunda meydana gelen kısalmayı dikkate alırken, hacimsel büzülme limiti ise yassı bir silindir veya pul şeklinde hazırlanan bir örneğin kuruma sonucunda hacminde meydana gelen azalmayı dikkate almaktadır. Doğrusal büzülme limitinin belirlenmesi bu araştırma konusunun dışında olup, bu çalışma boyunca "büzülme limiti" ifadesi "hacimsel büzülme limiti" anlamında kullanılmıştır.

Zemin mekaniği saha çalışmalarında Atterberg limitleri arasında en az üzerinde durulan kıvam limiti, büzülme limitidir. Ancak son yıllarda, yapılarda önemli maddi hasarlar meydana getiren şişen zeminlerin özelliklerinin değerlendirilmesinde, zeminlerin büzülme özelliklerinin de ön plana çıkmasıyla büzülme limitinin önemi artmıştır. Periyodik olarak büzülme ve şişme davranışı sergileyen aktif bölgelerdeki zeminlerin bu davranışı, şişme ve büzülmeden kaynaklanan hacim değişiklikleri nedeniyle hafif yapılarda ve yollarda önemli hasarlara sebep olmaktadırlar (Jones ve Holtz, 1973). Sıcağa maruz kaldıklarında gözeneklerindeki suyun buharlaşmasıyla büzülen zeminler yağış, sulama vb. sebeplerle ıslandıkları zaman şişmekte ve hacimlerinde önemli ölçüde artış meydana gelmektedir. 1973 senesinde yapılan bir araştırmada, Amerika Birleşik Devletlerinde (ABD) büzülme-şişme davranışı gösteren zeminlerin meydana getirdiği maddi zararın yıllık 2,3 milyar dolar olduğu ve bunun sel, fırtına, kasırga ve depremlerden kaynaklanan hasarların toplamının iki katından fazla olduğu tahmin edilmiştir (Jones ve Holtz, 1973).

Zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde uygulanan çeşitli standart yöntemler bulunmaktadır. Bunlar; ASTM D427 (2004)'te tanımlanan cıva taşırma yöntemi, ASTM D4943 (2008)'de tanımlanan parafin kaplama yöntemi, BS 1377-2 (1990)'da tanımlanan cıvalı büzülme cihazı yöntemi ve TS EN ISO 17892-2 (2014)'de tanımlanan sıvı taşırma yöntemleridir. Ülkemizin milli standardı olan TS 1900-1 (2006)'da ise zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesi için ASTM D427 (2004)'te tanımlanan cıva taşırma yöntemi önerilmektedir. TS EN ISO 17892-2 (2014) standardı, esasında doğrudan zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesi ile ilgili bir standart olmayıp, çeşitli şekillere sahip zemin örneklerinin birim hacim kütlesinin belirlenmesine yönelik bir standarttır. Ancak büzülme limitinin belirlenmesinde; esas ve en önemli işlem, örneklerin hacminin ölçülmesi olduğundan ve Avrupa standartlarında henüz büzülme limiti standardı yayımlanmadığından TS EN ISO 17892-2 (2014)'de sunulan ve yukarıda adı geçen ve diğer standartlarda yer almayan sıvı taşırma yönteminin de büzülme limitinin belirlenmesinde uygulanabileceği düşünülmüştür.

Zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde en önemli işlem büzülmüş ve artık düzensiz bir şekle sahip olan örneğin hacminin bulunmasıdır. Bu amaçla cıva, su veya başka bir sıvı kullanılmaktadır. Büzülen bir örneğin hacminin ölçülmesinde cıva kullanılmasının nedeni, zeminle temas ettiğinde zemini ıslatmaması ve zemin tarafından emilmemesidir. Cıvanın bu özelliği sayesinde, hacmi ölçülecek olan örneğin herhangi bir maddeyle kaplanasına gerek duyulmamaktadır. Ancak cıva ve cıva buharı insan sağlığa son derece zararlı bir madde olduğundan (WHO, 2007), cıva kullanımını gerektiren ASTM D427 (2004) standardı Mart 2008'de yürürlükten kaldırılmıştır. Cıva kullanımını öngören İngilizlerin ulusal standardı BS 1377-2 (1990), Bölüm 6 ise, İngiltere'nin Avrupa Standartlar Komitesi'nin (CEN) üyesi olması nedeniyle ilgili Avrupa standardı yürürlüğe girdiğinde iptal edilecektir. Türkiye de Avrupa Standartlar Komitesi (CEN)'nin bir üyesi olduğu için, ilgili Avrupa standartları yürürlüğe girdiğinde TS 1900-1 (2006)'da tanımlanan cıva taşırma yöntemi de yürürlükten kaldırılacaktır.

Cıva kullanımını gerektirmeyen yöntemlerde, örneğin hacminin ölçülmesi amacıyla cıvanın yerine başka bir sıvı kullanılması önerilmektedir. Bu amaçla, cıvanın yerine kullanılabilecek en uygun sıvı kolay temin edilmesi, ucuz olması ve kullanımının kolay olması gibi nedenlerle sudur. Ancak su, zeminle temas ettiğinde zemini ıslattığı ve zemin tarafından emildiği için, zemin numunesinin suya daldırılmadan önce su geçirmeyen bir maddeyle kaplanması gerekmektedir.

Bunun için yaygın olarak kullanılan madde ise parafindir. Esasında parafin kaplama yöntemi, ASTM D4943 standart numarası ile 1989'dan bu yana ABD'de yürürlükte olup, 1995, 2002 ve 2008'de üç kez yenilenmiş ve tekrar kabul edilmiştir. Ancak, cıva taşırma yöntemi daha kolay bir yöntem olması nedeniyle daha yaygın bir kullanıma sahip olduğu için, cıva taşırma yöntemi yürürlükten kaldırılıncaya değin parafin kaplama yöntemi geri planda kalmış, cıvalı yöntem yürürlükten kaldırıldığında ise, parafinli yöntem ön plana çıkarak daha yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak ulusal standardında cıvalı yöntemlerin dışında başka bir yöntem bulunmayan İngiltere ve Türkiye gibi ülkelerde durum daha farklıdır. Bu ülkelerde yürürlükten kaldırılıncaya değin zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde cıvalı yöntemler uygulanmış ve/veya halen uygulanmaya devam edilmektedir.

Gelinen bu noktada; zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde cıvanın kullanılması, 2008'den bu yana ABD'de standart bir yöntem olmayıp, tahminen 2015'ten sonra ise Avrupa'da ve ülkemizde de artık standart bir yöntem olmayacaktır. Bu durumda, geçmiş yıllarda cıva kullanılarak belirlenen hacimsel büzülme limiti verilerinin geleceğe aktarılabilmesi ve güvenle kullanılabilmesi için parafin kaplama yöntemiyle bulunan hacimsel büzülme limiti değerlerinin cıvalı yöntemlerle belirlenen hacimsel büzülme limiti değerleriyle uyumlu olup olmadığının belirlenmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, bu konunun araştırılması amaçlanmış olup, doğal zemin örnekleri üzerinde ASTM D427 (2004)'te tanımlanan cıva taşırma, ASTM D4943 (2008)'de tanımlanan parafin kaplama, BS 1377-2 (1990)'da tanımlanan cıvalı büzülme cihazı ve TS EN ISO 17892-2 (2014)'de tanımlanan sıvı taşırma yöntemleri karşılaştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapılan araştırma sonucunda, doğrudan zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde uygulanan yöntemlerin karşılaştırılmasına ilişkin bir çalışmaya rastlanmamış olup, büzülme limitinin zeminlerin mühendislik ve indeks özellikleri üzerindeki etkileri konusunda bazı çalışmalar yapıldığı görülmüş ve bunlar ana hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

Izdebska-Mucha ve Wójcik (2013), zeminlerin büzülme özellikleri ile indeks özellikleri arasında korelasyon olup olmadığını araştırmıştır. Sridharan ve Prakash (1998), zeminlerin büzülme limitini kontrol eden mekanizmayı araştırmışlar ve sonuç olarak zeminlerin plastisite (likit limit ve plastik limit) özellikleriyle büzülme limiti arasında bir ilişki olmadığını, büzülme limitini kontrol eden başlıca parametrenin zeminin tane büyüklüğü dağılımı ve tane dizilimi (yerleşimi) olduğunu öne sürmüşlerdir. Sridharan ve Prakash (2000), çeşitli zeminlerin karıştırılmasıyla elde edilen yapay zeminlerin büzülme limitlerini araştırdıkları çalışmalarında; büzülme limitinin zeminlerin plastisite özelliklerinden birisi olmadığı, zeminlerin oluşumları esnasında zemin tanelerinin yerleşme sürecinin bir sonucu ve büzülme limitini kontrol eden başlıca özelliğin zeminin tane büyüklüğü dağılımı olduğu ve aynı tane büyüklüğü dağılımına sahip zeminlerden tanelerinin makaslama dayanımı yüksek olan zeminin daha az büzüleceği sonucuna varmışlardır. Rao ve Satyadas (1985), şişme özelliği gösteren bir kilin büzülme özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında, sıcaklığı ve nem durumu kontrol edilen bir ortamda farklı su içeriklerinde hazırlayarak beklettikleri örnekler üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda, hacimsel büzülme limitinin başlangıç su içeriğinden, ortamın nem durumundan ve sıcaklığından etkilenmediğini, buna karşın doğrusal büzülme limitinin ise bu değişkenlerden etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Kalaycıoğlu (2012), ilk kez kendi çalışmasında uygulanan ters ekstrüzyon ve boyut-yoğunluk yöntemleriyle zeminlerin büzülme limitinin belirlenebilme potansiyelini araştırdığı çalışmasında, doğal zeminler üzerinde ters ekstrüzyon ve boyut-yoğunluk yöntemleriyle belirlediği büzülme limiti değerlerini cıvalı yöntem (ASTM D 427, 1998'e göre) ve parafinli yöntem (ASTM 4943, 2002'ye göre) gibi standart yöntemlerle karşılaştırmış ve ters ekstürzyon yöntemiyle diğer yöntemlerin arasındaki ilişkinin zayıf olduğu, boyut-yoğunluk yönteminin ise büzülme limitinin belirlenmesinde uygulanabilme potansiyelinin bulunduğu sonucuna varmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Alet ve Malzemeler

Deneysel çalışmalar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmış olup, cıvalı yöntemle büzülme limitinin belirlenmesinde ASTM D427 (2004)'de tanımlanan aletler kullanılmıştır. Parafin kaplama yönteminde ise ASTM D4943 (2008)'de tanımlanan aletlerin yanı sıra, bu çalışma için tasarlanmış bir askı çerçevesi, kanca, bakır tel gibi alet ve malzemeler kullanılmıştır. Cıvalı cihaz yönteminde BS 1377-2 (1990)'da tanımlanan temel özelliklere uygun bir cihaz kullanılmıştır. 9 voltluk pille çalışan bu cihazın cıva haznesinin iç çapı 80 mm, mikrometresinin okuma hassasiyeti ise 0,01 mm olup, cihazın tesviye edilmesini sağlamak için altında üç tane vidalı ayak, üzerinde ise küresel düzeç bulunmaktadır. Sıvı taşırma yönteminde, TS EN ISO 17892-2 (2014)'de verilen özelliklere uygun olarak bu çalışma kapsamında yaptırılan sifonlu cam beher kullanılmıştır.

3.2. Zemin Örnekleri

Bu çalışmada, Ankara'nın Temelli, Bilkent, Çukurambar ve Eymir bölgelerinden alınan 6 farklı örnek kullanılmıştır. Bu örneklerin alındıkları yerler ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Örneklerin alındıkları yerler ve bazı fiziksek özellikleri

Örnek No	Alındığı yer	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)	No.4 (%) P	No.200 (%) P	USCS*
Örnek 1	Çukurambar	89,1	38,3	50,8	98,6	81,7	CH
Örnek 2	Bilkent	41,5	24,9	16,6	95,1	62,8	CL
Örnek 3	Temelli giriş	45,7	23,1	22,6	66,7	54,0	CL
Örnek 4	Temelli Türkobası	83,2	31,7	51,5	98,8	97,4	CH
Örnek 5	Temelli Yenihisar	87,9	30,2	57,7	99,7	95,6	CH
Örnek 6	Eğmir gölü kenarı	76,4	28,0	48,4	100	100	CH

*Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi

3.3. Yöntem

3.3.1. Parafinin birim hacim kütlesinin belirlenmesi

ASTM D 4943 (2008)'de, parafinin birim hacim kütlesinin imalatçısından öğrenilebileceği veya ASTM D 4943 (2008) Ek A2'de verilen yöntemle belirlenebileceği ve her iki durumda da başlangıçta ve düzenli aralıklarla kontrol edilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Bu çalışmada, Ankara'nın Ulus, Ostim ve Siteler gibi farklı bölgelerinden ve farklı hırdavatçılardan kalıp şeklinde temin edilen dört farklı parafinin birim hacim kütlesi ASTM D 4943 (2008) Ek A2'de verilen yönteme uygun olarak belirlenmiştir.

3.3.2. Örneklerin hazırlanması

BS 1377-2 (1990)'da tanımlanan cıvalı cihaz yönteminde, 38 ila 50 mm çapında ve boyu çapının 1 ila 2 katı olan silindirik örneklerin kullanılması önerilmektedir. Sırasıyla ASTM D427 (2004)'de ve ASTM D 4943 (2008)'de tanımlanan cıva taşırma ve parafin kaplama yöntemleri için örnek hazırlama işlemleri aynı olup, numune boyutları yaklaşık 40 mm çapında ve 10 mm kalınlığındadır. TS EN ISO 17892-2 (2014)'de tanımlanan sıvı taşırma yöntemi esas itibarıyla büzülme limitinin belirlenmesine ilişkin bir standart olmadığından, örnek boyutlarıyla ilgili herhangi bir ölçüt bulunmamaktadır. Bu çalışmada; örnek boyutlarının ve hazırlanma şeklinin, karşılaştırma sonuçları üzerindeki etkisini gidermek için, örnekler ASTM D427 (2004)'de tanımlandığı gibi hazırlanmış olup, dört yönteme göre de büzülme limiti ölçümleri aynı örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3.3.3. Deneylerin yapılması

Örnek belirli bir miktar kuruyuncaya kadar bir günden daha az olmayan bir süre boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Kurumanın ölçüsü olarak renk değişimine ve örneğin büzülme kabının kenarlarından ayrılmasına dikkat edilmiştir. Cıvalı cihaz yönteminde, örnek kuruma (büzülme) aşamasında iken belirli zaman aralıklarında hacminin ölçülmesini gerektirdiği için, deneylerin yapılmasına önce cıvalı cihaz deneyiyle başlanmıştır. Cıvalı cihaz deneyinde örneğin büzülme kabından çıkartılıp, cihazın sepetine yerleştirilip, cıva haznesine batırılması gerektiği için, örneğin bu işlemler sırasında zarar görmeyecek kadar kurumasına dikkat edilmiştir. Cıvalı cihaz deneyi için yeteri kadar ölçüm alındıktan sonra örnek etüve konularak tamamen kuruyuncaya kadar bekletilmiş ve daha sonra sırasıyla ASTM D427 (2004)'ye göre cıva taşırma, ASTM D 4943 (2008)'e göre parafin kaplama ve TS EN ISO 17892-2 (2014)'ye göre sıvı taşırma yöntemleri uygulanmıştır. Parafinli yöntemlerde, aynı anda birden fazla örneğin parafinle kaplanabilmesi için, telle bağlanan örnekler bir kanca yardımıyla bu çalışma kapsamında yaptırılan askı çerçevesine asılmış ve tava içinde erimiş haldeki parafin sırayla numunelere batırılarak numunelerin parafinle kaplanması sağlanmıştır (Şekil 1).

Şekil 1. Askı çerçevesine kancalarla asılmış olan örneklerin parafinle kaplanması

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Parafinin birim hacim kütlesi

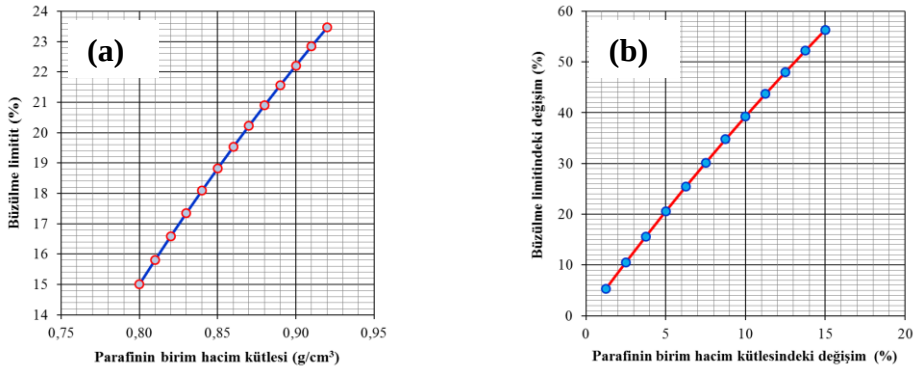
Ankara'nın üç farklı bölgesinden ve farklı hırdavatçılardan temin edilen dört farklı parafinin temin edildikleri yerler ve belirlenen birim hacim kütleleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı bölgelerden ve hırdavatçılardan temin edilen parafinlerin birim hacim kütleleri

Parafinin temin edildiği bölge	Parafinin hacmi (cm^3)	Parafinin kütlesi (g)	Parafinin birim hacim kütlesi, ρ (g/cm^3)
Siteler	42,66	33,40	0,78
Ulus	49,32	40,18	0,81
Ostim 1	62,85	53,42	0,85
Ostim 2	32,96	30,11	0,91

Çizelge 2'den görüldüğü gibi, farklı yerlerden temin edilen parafinlerin birim hacim kütleleri arasında %17'ye varan bir fark olduğu tespit edilmiştir. Ancak, ASTM D 4943 (2008)'de, parafinin birim hacim kütlesinin imalatçısından veya tedarikçisinden temin edilebileceğinin ifade edilmiş olması ve parafinin birim hacim kütlesinin katalogdan sabit bir değer olarak alınabileceği yönünde yaygın bir kanaat bulunması, parafin kaplama yöntemiyle belirlenen büzülme limitinin parafinin birim hacim

kütlesine olan hassasiyetinin belirlenmesi gereğini doğurmuştur. Bu amaçla, çalışmada kullanılan bir örneğin (Numune 1a) sonuçları üzerinde; diğer bütün değerler sabit tutulup, parafinin birim hacim kütlesi Çizelge 2'de verilen değerleri de kapsayacak şekilde 0,80 ile 0,92 arasında değiştirilmiş ve buna karşılık gelen büzülme limiti değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar grafik halinde Şekil 2a'da sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 2a'da sunulan sonuçları Numune 1a'dan ve parafinin birim hacim kütlesinden bağımsız hale getirmek için büzülme limitinin ve birim hacim kütlenin değişim yüzdeleri hesaplanmış ve sonuçları Şekil 2b'de sunulmuştur.

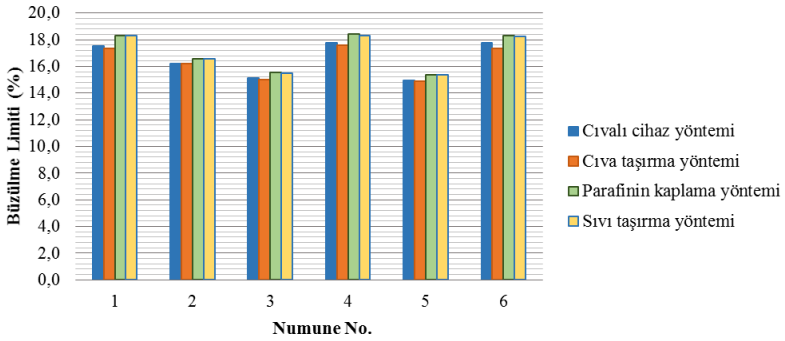


Şekil 2. Büzülme limitinin parafinin birim hacim kütlesine hassasiyeti: (a) Büzülme limiti cinsinden, (b) değişim yüzdesi cinsinden.

Şekil 2 incelendiğinde, parafinin birim hacim kütlesindeki küçük bir değişimin, büzülme limiti sonuçlarına büyük oranda yansıdığı görülmektedir. Örneğin; parafinin birim hacim kütlesinde yaklaşık %10 mertebesindeki bir artış büzülme limitinin yaklaşık %40 kadar artmasına neden olmuştur. Bu sonuçlara göre, parafin kaplama yöntemiyle belirlenen büzülme limitinin parafinin birim hacim kütlesine karşı son derece hassas olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, parafinin birim hacim kütlesinin imalatçısından veya tedarikçisinden öğrenilmesi ya da katalogdan sabit bir değer olarak alınmasının yanlış bir yaklaşım olduğu ve temin edilen her yeni parafin kalıbının birim hacim kütlesinin hassas bir şekilde belirlenmesinin gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, deney numunelerinin kaplanmasında Ostim 1'den temin edilen parafin (ρ=0,85 g/cm^3) kullanılmıştır.

4.2. Örneklerin Büzülme Limitleri

Altı farklı örneğin her birinden beşer adet hazırlanan örneklerin dört farklı yöntemle belirlenen büzülme limitleri ve bunların ortalamaları Çizelge 3'te, ortalama değerler kullanılarak oluşturulan histogram grafiği ise Şekil 3'te sunulmuştur. Yöntemlerin kendi içlerinde tekrarlanabilirliklerini değerlendirmek için, aynı örnekten hazırlanan 5 adet örnekten elde edilen büzülme limitlerinin standart sapmaları da hesaplanmış ve Çizelge 3'te verilmiştir. Örnek 1'den hazırlanan örneklerden üç tanesi kuruma esnasında çatladığı için, cıvalı cihaz yöntemiyle bu örnekler üzerinde gerekli ölçümler alınamamış ve deney dışında bırakılmışlardır.



Şekil 3. Deney numunelerinin ortalama büzülme limitleri

Çizelge 3'ten; parafin kullanılarak yapılan parafin kaplama ve sıvı taşırma yöntemlerinin birbiriyle aynı sonucu verdiği (Örnek 4'teki küçük fark hariç), benzer şekilde cıva kullanılarak yapılan cıvalı cihaz ve cıva taşırma yöntemlerinin de birbirlerine yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, parafinli yöntemlerin cıvalı yöntemlere kıyasla büzülme limitini biraz daha yüksek (yaklaşık % 0,2 kadar) belirlediği Çizelge 3'ten ve Şekil 3'ten görülmektedir.

Çizelge 3'te verilen standart sapmalar incelendiğinde, bu değerlerin de aralarında anlamlı bir fark olmadığı ve birbirlerine oldukça yakın çıktıkları görülmektedir. Buna göre, dört yöntemin de tekrarlanabilirliklerinin hemen hemen aynı olduğu ifade edilebilir.

Çizelge 3. Örneklerin büzülme limitleri.

Örnek No	Cıvalı cihaz yöntemi	Cıva taşırma yöntemi	Parafinin kaplama yöntemi	Sıvı taşırma yöntemi
1a	17,6	17,4	18,8	19,0
1b	-	17,2	18,3	17,7
1c	-	17,1	18,0	17,9
1d	-	17,6	18,1	18,5
1e	17,5	17,3	18,3	18,5
Ortalama	*17,6*	*17,3*	*18,3*	*18,3*
Standart sapma	*0,1*	*0,2*	*0,3*	*0,5*
2a	16,7	16,9	17,1	16,9
2b	15,1	15,1	15,3	15,3
2c	15,9	15,9	16,2	16,3
2d	16,5	16,4	17,0	17,0
2e	16,7	16,7	17,3	17,3
Ortalama	*16,2*	*16,2*	*16,6*	*16,6*
Standart sapma	*0,7*	*0,7*	*0,8*	*0,8*
3a	15,5	15,8	15,8	16,0
3b	14,7	14,0	15,1	15,0
3c	15,1	14,7	15,3	15,2
3d	15,2	15,2	15,5	15,7
3e	15,2	15,3	15,6	15,7
Ortalama	*15,1*	*15,0*	*15,5*	*15,5*
Standart sapma	*0,3*	*0,7*	*0,3*	*0,4*
4a	16,4	16,4	17,0	17,1
4b	17,8	17,6	18,3	18,5
4c	18,0	18,0	18,5	18,8
4d	18,7	18,4	19,1	19,1
4e	18,0	17,6	18,6	18,7
Ortalama	*17,8*	*17,6*	*18,3*	*18,4*
Standart sapma	*0,8*	*0,7*	*0,8*	*0,8*
5a	15,5	15,6	16,0	16,3
5b	13,9	13,9	14,2	14,2
5c	14,4	14,3	14,8	14,5
5d	15,7	15,4	16,2	16,1
5e	15,2	15,3	15,5	15,6
Ortalama	*14,9*	*14,9*	*15,3*	*15,3*
Standart sapma	*0,8*	*0,8*	*0,8*	*0,9*
6a	17,3	16,7	17,7	17,9
6b	17,5	17,4	18,2	18,4
6c	17,7	17,6	18,4	18,0
6d	18,6	17,9	19,1	19,2
6e	17,6	17,1	17,9	17,9
Ortalama	*17,7*	*17,3*	*18,3*	*18,3*
Standart sapma	*0,5*	*0,5*	*0,5*	*0,6*

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Zeminlerin büzülme limitinin belirlenmesinde uygulanan standart yöntemlerin karşılaştırıldığı bu çalışmada aşağıda verilen temel sonuçlar varılmıştır.

(a) Parafin kaplama yöntemiyle belirlenen büzülme limiti değerleri parafinin birim hacim kütlesine karşı son derece hassastır. Parafinin birim hacim kütlesindeki küçük bir sapma, büzülme limitinin büyük oranda değişmesine neden olmaktadır. Parafinin birim hacim kütlesinin imalatçısından veya tedarikçisinden öğrenilmesi ya da katalogdan sabit bir değer olarak alınması hatalı sonuçlar elde edilmesine yol açabilir. Bu nedenle, temin edilen her yeni parafin kalıbının birim hacim kütlesinin hassas bir şekilde belirlenmesi ve hesaplamalarda bu değerin kullanılması gerekmektedir.
(b) İlgili standartlarda belirtilen öneriler doğrultusunda hassas bir şekilde uygulandığı takdirde, bu çalışmada karşılaştırılan yöntemlerin dördü de birbirine oldukça yakın ve tutarlı sonuçlar vermektedir.
(c) Parafin kaplama ve sıvı taşırma yöntemleri (parafinli yöntemler) birbiriyle aynı sonucu, cıva taşırma ve cıvalı cihaz yöntemleri (cıvalı yöntemler) ise aralarındaki az bir farkla birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.
(d) Parafinli yöntemler cıvalı yöntemlere kıyasla bir miktar daha yüksek (yaklaşık % 5 kadar) büzülme limiti vermiştir.
(e) Yöntemlerin kendi içlerindeki tekrarlanabilirlikleri oldukça yüksek olup, beş tekrarlı deneyden elde edilen sonuçların standart sapması en fazla % 0,9'dur.

Bu sonuçlara göre, yürürlükten kaldırılan cıvalı yöntemlerle bulunan büzülme limiti değerlerinin, günümüzde parafinli yöntemlerle bulunan büzülme limiti sonuçlarıyla birlikte güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

ASTM D 427, 2004, Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method (withdrawn in 2008). Annual Book of ASTM Standards, Vol.4.08, West Conshohocken, PA.

ASTM D 4943, 2008. Standard test method for shrinkage factors of soils by the wax method. Annual Book of ASTM Standards, Vol.4.08, West Conshohocken, PA.

Bauer, E.E., 1960. History and development of the Atterberg limits tests. ASTM Special Technical Publication No. 254. Sixty-second Annual Meeting; Papers on Soils 1959 Meetings: Symposium on Atterberg Limits, 160-167.

BS 1377: Part 2, 1990. Methods of testing soils for civil engineering purposes. British Standards Institution, London.

Izdebska-Mucha, D., Wójcik, E., 2013. Testing shrinkage factors: comparison of methods and correlation with index properties of soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72,15–24.

Jones, D.E., Holtz, W.G., 1973. Expansive soils - The hidden disaster. Civil Engineering – ASCE, 43(8), 49-51.

Kalaycıoğlu, S., 2012. Büzülme limitinin ters ekstrüzyon yöntemiyle incelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Rao, K.S.S., Satyadas, G.C., 1985. Measurement of Volumetric and Linear Shrinkage on Black Cotton Soil. Geotechnical Testing Journal, 8 (2), 66-70.

Sridharan, A., Prakash, K., 1998. Mechanism controlling the shrinkage limit of soils. Geotechnical Testing Journal, 21(3), 240-250.

Sridharan, A., Prakash, K., 2000. Shrinkage limit of soil mixtures. Geotechnical Testing Journal, 23(1), 3-8.

TS 1900-1, 2006. İnşaat mühendisliğinde zemin deneyleri, TSE, Kızılay, Bakanlıklar-Ankara.

TS EN ISO 17892-2, 2014. Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Birim hacim kütlenin belirlenmesi. TSE, Kızılay, Bakanlıklar-Ankara.

WHO (World Health Organization), 2007. Exposure to mercury: Major public health concern. Geneva, Switzerland.

Jeogrid Donatılı Zeminlerde Taşıma Gücü Yöntemlerinin Gerçek ve Kurgusal Vakalar Üzerinde Karşılaştırılması

Comparison of Bearing Capacity Calculation Methods in Geogrid Reinforced Soils on Real and Hypothetical Cases

N. Sungur[1,*], N. S. Işık[1]

[1] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara (*nilufer-golcuk@hotmail.com)*

ÖZ: Son yıllarda jeogridlerin, istinat duvarları, karayolları-demiryolları dolgularında ve benzeri güçlendirme amaçlı kullanımlarında hızlı bir artış olmuştur. Jeogrid ile güçlendirilmiş donatılı zeminlerin taşıma güçleri jeogridlerin rijit taban etkisi, gerilmiş membran etkisi ve yanal sınırlama mekanizmaları nedeniyle güçlendirilmemiş zeminlere oranla daha yüksek olmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle literatürde bulunan, jeogrid donatılı zeminler üzerinde yapılmış model yükleme deneyleri ve sayısal modelleme çalışmaları sonuçları incelenerek optimum jeogrid donatı sayısı ve yerleştirme biçimleri yorumlanmış, daha sonra orta sıkı–sıkı ince bir kum içerisine jeogrid tabaka sayısı 1–4 arasında uygulanarak güçlendirilmiş bir zemin üzerinde yapılan laboratuvar ölçeğinde şerit temel yükleme deneylerinden elde edilen deneysel taşıma güçleri, çeşitli analitik yöntem sonuçlarıyla ve sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen taşıma güçleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda kum zeminin doğrudan makaslama kutusu deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açısı kullanılarak analitik ve nümerik yöntemlerle hesaplanan taşıma güçlerinin deneysel sonuçlara oranla daha düşük çıktığı bununla birlikte içsel sürtünme açısı 3^{o} yüksek alındığında sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Son olarak, suya doygun yumuşak bir kil zemin üzerine inşa edilecek yarım metre yükseklikte kurgusal bir demiryolu dolgusunun jeogrid ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarının taşıma güçleri çeşitli analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmış ve sonuç olarak iki sıra jeogrid kullanıldığında taşıma gücünde yaklaşık % 30 oranında bir artış olabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeosentetikler, Jeogrid, Taşıma Gücü, Donatılı Zemin

ABSTRACT: *There has been a significant increase in the use of geogrids at retaining walls, road–rail road fills and similar applications in recent years. Bearing capacity of geogrid reinforced soils are much higher than that of unreinforced soils due to rigid base effect, lateral confinement effect and tensioned membrane effect of geogrids. In this study, first, optimum placement and number of geogrid layers are examined by investigating the model loading tests and numerical simulations performed on geogrid reinforced soils. Second observed bearing capacity values of model strip foundation loading tests performed on medium–dense fine sand reinforced with 1 to 4 layers of geogrids compared with the results of analytical bearing capacity calculation methods and finite element simulation results. According to this comparison, it was determined that calculated bearing capacity values by using analytical and numerical methods are lower than that determined from model loading tests when the angle of internal friction of fine sand determined from direct shear tests are used in calculations. However observed and calculated bearing capacity values are in good agreement when an internal friction angle that is* 3^{o} *higher than that was determined from direct shear tests is used. Finally, bearing capacity values of a hypothetical geogrid reinforced and unreinforced half meter thick rail road fill resting on a saturated soft clay deposit were calculated using analytical bearing capacity calculation methods and finite element simulations. It was determined that bearing capacity values increase about 30 % when double geogrid layers used in fill material.*

Keywords: *Geosynthetics, Geogrid, Bearing Capacity, Reinforced Soil*

1. GİRİŞ

Temel, zeminle doğrudan temas halinde olan ve yapı yüklerini ve yükün dağılımını altta zeminin taşıyabileceği şekle dönüştürerek zemine aktaran bir sitemdir. Temel sistemi üst yapı yüklerini taşıyıcı zemin tabakalarına aktarırken zeminde aşırı gerilmeye sebep olmamalıdır. Güvenli bir temel veya temel sisteminin taşıma gücü ve oturma gibi iki ana şartı sağlaması gerekmektedir. Taşıma gücü şartına göre, üstyapı yükü altında temel zemininde makaslama yenilmesi oluşmamalı ve yenilmeye karşı belirli bir güvenlik olmalıdır. Zeminin taşıma gücünün belirlenmesi için araştırmacılar tarafından birçok taşıma gücü kuramı ve yöntemleri geliştirilmiştir.

Zemin seviyelerine jeogrid yerleştirilerek yapıya gelen yüklemelerin daha geniş bir alana yayılmasıyla zeminin taşıma gücünü arttırarak yükün uniform dağılması sağlanır. Jeogrid ile güçlendirilmiş donatılı zeminlerin taşıma güçleri jeogridlerin rijit taban etkisi, gerilmiş membran etkisi ve yanal sınırlama mekanizmaları nedeniyle güçlendirilmemiş zeminlere oranla daha yüksek olmaktadır. Güçlendirilmiş zeminlere oturan temellerin taşıma gücüyle ile ilgili yapılan kuramsal çalışmaların sayısı deneysel çalışmalara göre oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada; literatürden alınan güçlendirilmiş bir zemin üzerinde laboratuvar ölçeğinde yapılan şerit temel yükleme deneylerinden elde edilen deneysel taşıma güçleri, çeşitli analitik yöntem sonuçlarıyla ve sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen taşıma güçleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, suya doygun yumuşak bir kil zemin üzerine inşa edilecek yarım metre yükseklikte hayali bir demiryolu dolgusunun jeogrid ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarının taşıma güçleri çeşitli analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analizi ile hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, gerçek ve kurgusal vakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmada kullanılan analitik yöntemlerin ve sonlu elemanlar analizinin temel özellikleri aşağıdaki bölümde verilmiştir.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

2.1. Analitik Yöntemler

Donatılı zeminler; çekme dayanımı çok düşük olan zeminlerin metal şerit, jeotekstil veya jeogrid gibi malzemeler kullanılarak mühendislik özelliklerinin iyileştirildiği zeminlerdir. Donatılı zemin davranışı ile ilgili olarak önerilmiş analitik yöntemlerde, güçlendirilen zeminlerdeki taşıma gücü analizleri deneysel çalışmalarda gözlenen farklı yenilme mekanizmalarını esas almaktadır. Bu çalışmada kullanılan analitik yöntemler ve belirleyici özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan analitik yöntemler ve belirleyici özellikleri

Yöntem (Kronolojik sırayla)	Olası Yenilme Mekanizmaları	Yenile mekanizması eşitliklerinde faydalanılan yöntemler
Huang ve Menq (1997)	Zemin yenilme mekanizmalarında derin temel geniş taban etkisi	Schlosser vd. (1983)
Wayne vd. (1998)	Donatıların farklı yerleşim düzeni ve zemin çeşidine göre dört farklı yenilme mekanizması	Meyerhof ve Hanna (1978)
Michalowski (2004)	Donatının güçlü veya zayıf olmasından kaynaklı oluşan yenilme mekanizmaları	Limit analiz teknikleri
Sharma, (2009)	İki tabakalı zemin sistemi üzerindeki temellerin göçmesi ve donatılı bölge içinde göçme	Süper pozisyon prensibi, Schmertmann vd. (1978)

Sharma vd. (2009)'nin önerdiği yöntem en son geliştirilen yöntem olmasına rağmen, her bir jeogrid tabakada oluşacak çekme kuvvetinin tahmin edilmesini gerektirdiği için bu çalışmada kullanılamamıştır. Michalowski (2004)'nin önerdiği yöntem ise, zemin özellikleri heterojen ve örneğin güçlendirilmiş dolgu altında yumuşak bulunuyorsa, kullanılamamaktadır.

2.2. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi, zemin ve kaya mekaniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analiziyle deneylerin modellenmesi için zemin ve kaya mekaniği problemlerinin çözümü için geliştirilmiş iki boyutlu sonlu elemanlar yazılımı olan Phase2 (2011) v. 8.0 (Rocscience, 2013) kullanılmıştır. Analizlerde zemin, doğrusal elastik – plastik malzeme modeli ile modellenmiş, yenilme modeli olarak ise Mohr – Coulomb ölçütü kullanılmıştır. Jeogridler is,e Phase2 yazılımında mevcut olan ve sadece çekme rijitliğine sahip "jeotextile" elemanlar, temel ise doğrusal elastik "shell" eleman kullanılarak modellenmiştir. Model deneylerin simülasyonu için 8 düğüm noktalı yaklaşık 1500 adet dörtgen eleman kullanılmıştır.

3. ÇALIŞMADA ELE ALINAN VAKALAR

3.1.Model Deneyler

Yöntemleri gerçek bir vaka üzerinde karşılaştırabilmek için literatürden, jeogrid ile zemin arasında kilitlenme mekanizması etkisini hesaba katmayacak özellikteki ince kum zemine oturan model deney seçilmiştir. Patra vd. (2005) tarafından yapılan model deneylerde gömülme derinliği $D_f \geq 0$ olan jeogrid donatılı kum zemine oturan şerit temellerin taşıma gücünün araştırıldığı deney sonuçlarını, model deneyin geometrik parametreleri kullanılarak Huang ve Menq (1997) ve Michalowski (2004)'nin taşıma gücü kuramlarıyla hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda, deneysel çalışmaya benzer olarak, donatısız ve donatılı kum zemine oturan şerit temellerin taşıma gücü ve gerilme davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle de hesaplanmıştır. Analizlerde zemin türü, temel boyutları, sınır koşulları ve yükleme durumu gibi özellikler deneydekilere ile aynı olacak şekilde alınmıştır. İncelenen model deneyin taşıma gücü değerleri ve diğer bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir.

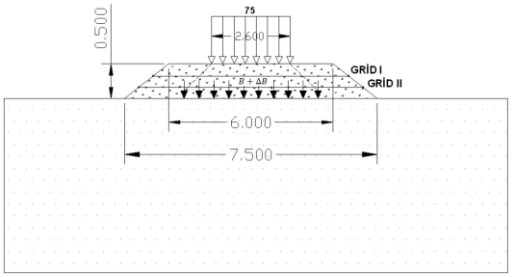
Çizelge 2. Model deney sonuçları (Patra vd., 2005)

Deney Serisi	N Katman Sayısı	D_f/B	Deney Sonuçları q_u, (kPa)
I	0	Temel yüzeyinde	128
II	2	Temel yüzeyinde	185 k
	3	Temel yüzeyinde	260
	4	Temel yüzeyinde	339
III	4	Temel yüzeyinde	339
		0.25	469
		0.50	590
		0.75	736
		1	901

Patra vd. (2005)'nin deney koşullarında kumun ortalama doruk sürtünme açısı (ϕ) doğrudan makaslama deneylerinden 41° olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada deney serisine ek olarak, hesaplamalarda 44° sürtünme açısındaki taşıma gücü değerleri de belirlenmiştir. Düzlemsel deformasyon koşullarında sürtünme açısı daha yüksek olabileceği için deneyde 41° olan içsel sürtünme açısı 3° yükseltilerek 44° için de hesaplamalar yapılmıştır.

3.2. Kurgusal Vaka

Bir demiryolu dolgusunda jeogrid kullanımının güvenlik katsayısına etkisini araştırmak amacıyla hipotetik (düşünsel) bir vakada suya doygun zayıf bir kil zemin üzerine edilecek 0.5 metre kalınlığında bir demiryolu altyapısı modellenmiştir. Bu vaka için, suya doygun, drenajsız makaslama dayanımı 25 kPa olan bir kil zemin durumu varsayılmıştır. Modellenen zeminin birim hacim ağırlığı 17 kN/m^3, kohezyonu 25 kPa, içsel sürtünme açısı 0° olarak seçilmiştir. Uygulanacak dolgu zemininin, birim hacim ağırlığı 21 kN/m^3, kohezyonu 5 kPa, içsel sürtünme açısı 38° olarak alınmıştır. Dolgu zeminine güçlendirme amacıyla yerleştirilecek jeogridin donatı çekme kuvveti 60 kN/m olarak seçilmiştir. Tasarlanan kurgusal vaka Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Kurgulanan vaka için, taşıma gücü hesapları Huanq ve Meng (1997) ve Wayne vd. (1998) yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleriyle yapılmıştır.

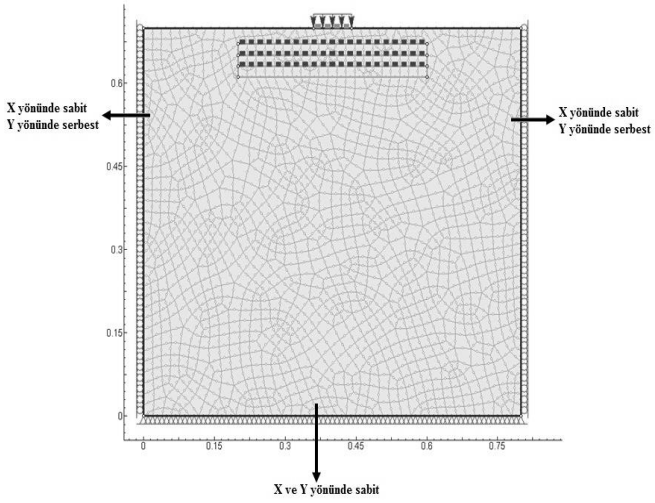


Şekil 1. Tasarlanan kurgusal vaka ve dolgu boyutları.

4. ÇÖZÜMLEMELER VE KARŞILAŞTIRMALAR

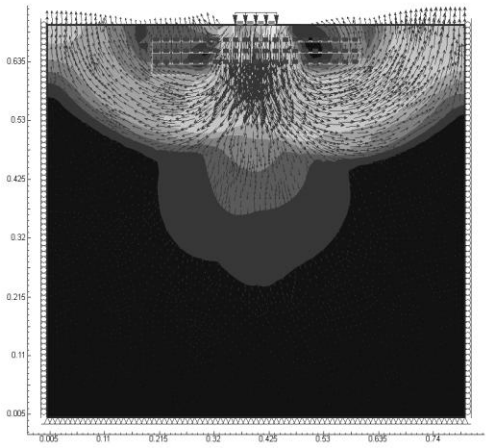
4.1. Model Deney Üzerinde Yöntemlerin Karşılaştırması

Patra vd. (2005)'nin yaptıkları model deneyler sonucunda deneysel olarak belirlenen taşıma güçleri, analitik taşıma gücü yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleriyle ince kum zeminin içsel sürtünme açısı 41° ve 44° alınarak hesaplanmıştır. Üç grid tabakalı deneylerin simülasyonunda kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları Şekil 2'de gösterilmiştir.



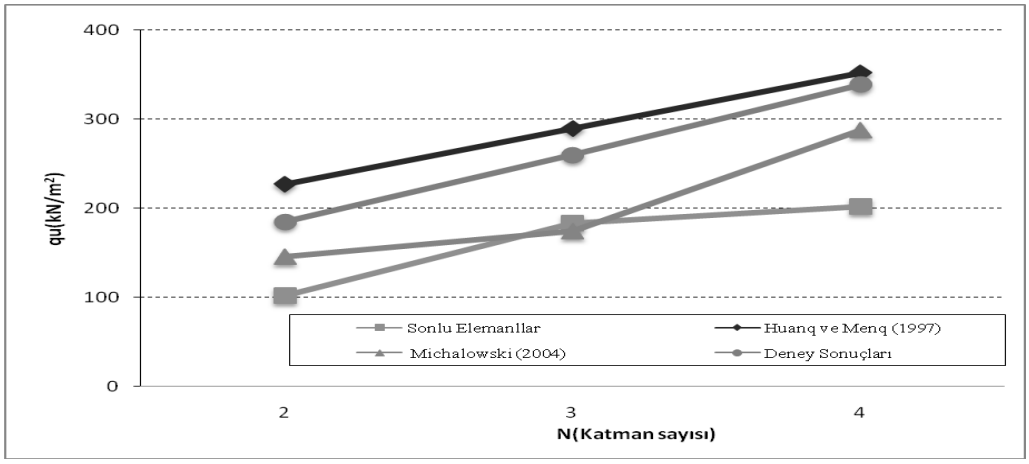
Şekil 2. Model deneylerin simülasyonunda kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları.

Analizlerde ilk aşama olarak, yükleme öncesi gerilme dağılımı modellenmiş ve temel üzerindeki yayılı gerilme zemin yenilme noktasına ulaşana değin aşama aşama arttırılmıştır. Sürtünme açısı 41° ve 3 tabakalı grid modeli için elde edilen yenilme anındaki deformasyonların dağılımı Şekil 3'te gösterilmiştir.

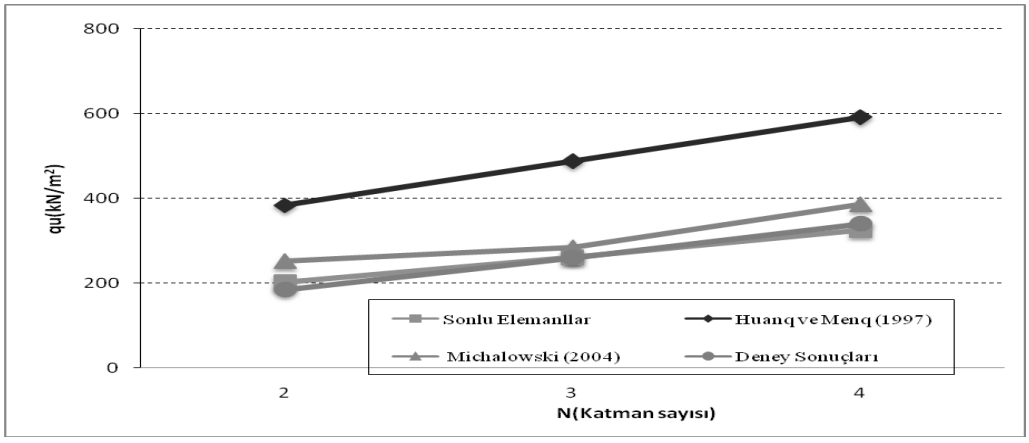


Şekil 3. Sürtünme açısı 41° ve 3 tabakalı grid modeli için yenilme anındaki deformasyonların dağılımı

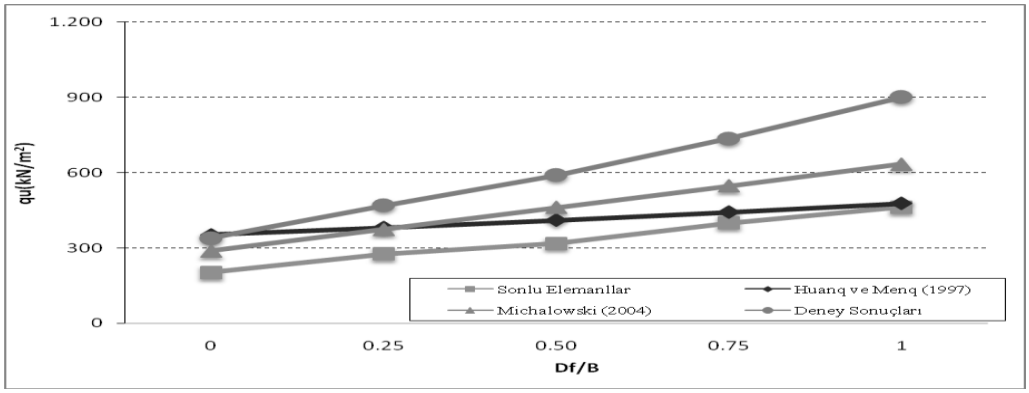
Patra vd. (2005)'nin yaptıkları model deneyler sonucunda belirlenen taşıma güçleri, analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının grafiksel olarak sunumu deney serisi II için Şekil 4 ve 5'de, deney serisi III için ise Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



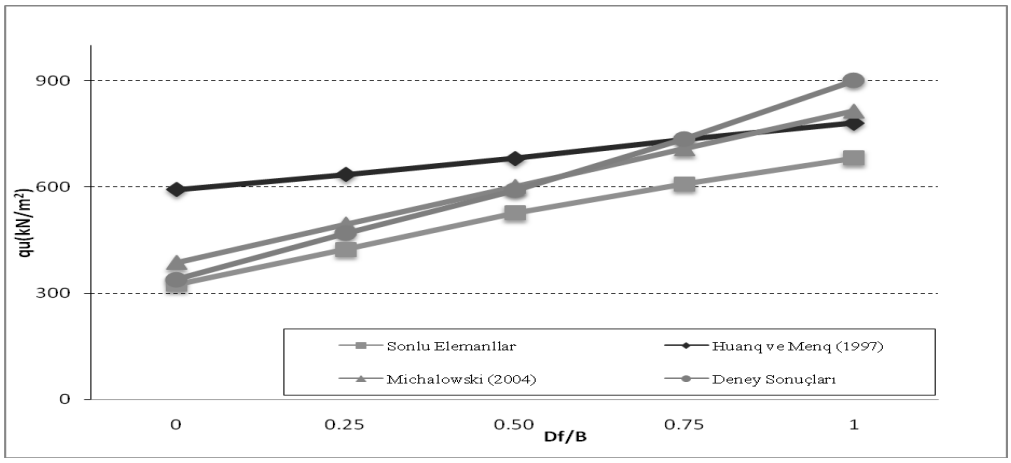
Şekil 4. Deney Serisi II, Df/B=0 ve içsel sürtünme açısı Ø = 41° seçildiğinde katman sayısına göre taşıma gücü karşılaştırma grafiği



Şekil 5. Deney Serisi II, Df/B=0 ve içsel sürtünme açısı Ø= 44° seçildiğinde katman sayısına göre taşıma gücü karşılaştırma grafiği



Şekil 6. Deney Serisi III, içsel sürtünme açısı Ø=41° olarak seçildiğinde Df/B oranına göre taşıma gücü karşılaştırma grafiği



Şekil 7. Deney Serisi III, içsel sürtünme açısı Ø=44° olarak seçildiğinde Df/B oranına göre taşıma gücü karşılaştırma grafiği

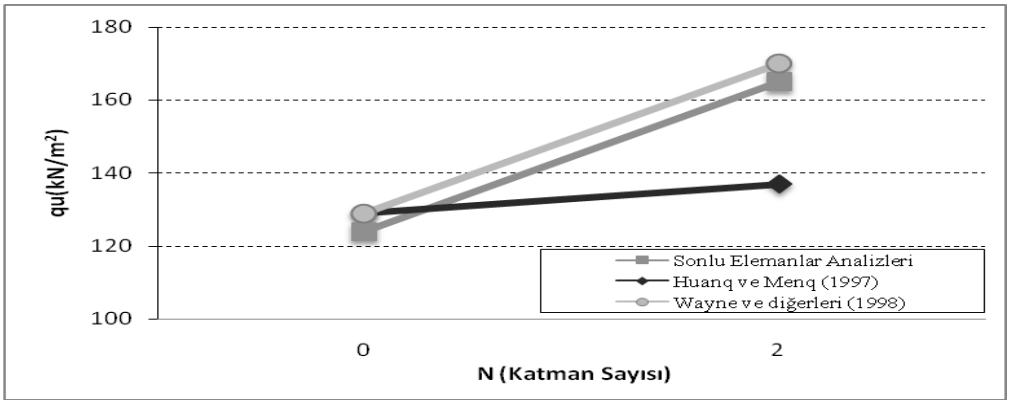
Kum zeminin sürtünme açısı 41° alınarak yapılan kuramsal ve sayısal taşıma gücü analizleri, deneysel sonuçlarının altında kalmaktadır. Bununla birlikte, zeminin sürtünme açısı 44° alındığında deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları arasında uyum olduğu anlaşılmaktadır.

4.2. Kurgusal Vaka Üzerinde Yöntemlerin Karşılaştırması

Huanq ve Meng (1997) ile Wayne vd. (1998)'nin yöntemleri ve sonlu elemanlar analizine göre yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar çizelge 3'de, karşılaştırma grafiği ise Şekil 8'de sunulmuştur

Çizelge 3. Kurgusal vaka üzerinden hesaplanan taşıma gücü değerleri

Katman Sayısı	D_f/B	q_u Huanq ve Meng (1997)	q_u Wayne vd. (1998)	q_u Sonlu Elemanlar Analizi
0	0	129 kPa	124 kPa	124 kPa
2	0	137 kPa	170 kPa	165 kPa
Taşıma Gücü Artışı		% 6,2	% 37	% 33



Şekil 8. Huang ve Meng (1997) ile Wayne vd. (1998)'nin yöntemleri ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen taşıma güçlerinin karşılaştırılması.

Michalowski (2004)'nin yöntemi homojen zemin koşulları için geçerlidir. Bununla birlikte, modellenmeye çalışılan demiryolu alt yapısının üst kısmında granüle dolgu alt kısmında ise yumuşak kil birim bulunmaktadır, bu nedenle Michalowski (2004)'nin yöntemi kullanılamamıştır.

Analizler sonucunda sonlu elemanlar analizlerinin Wayne vd. (1998)'nin yöntemi ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Seçilen kurgusal vakada iki tabaka jeogrid kullanıldığında donatılı zeminin taşıma gücünün güçlendirilmemiş ve zemine oranla % 33 düzeyinde arttığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, literatürden alınmış model deneyler ile kurgusal bir vaka üzerinde analitik yöntemler ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen taşıma güçleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir.

a) Temelin yüzeyden itibaren belirli derinliklere gömülme derinliği arttıkça, diğer parametreler sabit olacak şekilde hesaplandığında taşıma gücünün değerinin de arttığı görülmüştür.
b) Patra vd. (2005)'nin yapmış olduğu model deneylerinde kullandıkları kumun içsel sürtünme açısı 41° olarak belirlenmiştir. Bu deneylerin analizleri, analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Analizlerde kumun sürtünme açısı 41° olarak alındığında hesaplanan taşıma güçleri deney verilerinden düşük elde edilmekte,ancak kumun sürtünme açısı 44° olarak analizler yinelendiğinde hesap sonuçları deney sonuçlarıyla uyumlu çıkmaktadır.
c) Michalowski (2004)'nin önerdiği yöntem de, model deneyin taşıma gücü değeri ile uyumlu sonuçlar vermiş olmakla birlikte, zemin yapısı heterojen ise bu yöntem kullanılamamaktadır.
d) Sharma vd. (2009)'nin önerdiği yöntem en güncel yöntem olmasına rağmen, her bir jeogrid tabakada oluşacak çekme kuvvetinin tahmin edilmesi gerektiği için bu çalışmada kullanılamamıştır.
e) Kurgusal vakada iki tabaka jeogrid kullanıldığında donatılı zeminin taşıma gücünün güçlendirilmemiş zemine oranla % 33 mertebesinde arttığı belirlenmiştir.
f) Son bölümde, modellenen örnek demiryolu hipotetik vaka uygulamasından; 2 tabakalı grid kullanımı sonucunda taşıma gücü ve güvenlik katsayısının arttığı belirlenmiştir.

Güçlendirilmiş zeminlere oturan temellerin taşıma gücü ile ilgili yapılan kuramsal çalışmaların sayısı, deneysel çalışmalara göre oldukça sınırlıdır. Bunun yanı sıra, yapılan incelemeler ve hesaplamalar kuramsal yöntemlerin, grid ile dolgu malzemesi arasında kenetlenme durumunu hesaba katmadığını göstermektedir. Kenetleme mekanizmasını hesaba katan yöntemler olmadığı için kuramsal çalışmaların da geliştirilmeleri gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

Huang, C.C., Menq, F.Y, 1997. Deep-footing and wide-slab effects inreinforced sandy ground. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 123(1), 30-36.

Meyerhof, G.G., Hanna, A.M., 1978. Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load. Canadian Geotechnical Journal, 15, 565-572.

Michalowski, R.L., 2004. Limit loads on reinforced foundation soils. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 130(4), 381-390.

Patra, C.R., Mandal, J.N., Das, B.M., 2005. Ultimate bearing capacity of shallow foundation on jeogrid-reinforced sand. Proc. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1397-1400.

Rocscience, 2013. Phase2 v8.0 Finite element analysis for excavations and slopes, Canada, Toronto.

Schlosser, F., Jacobsen H.M., Juran I., 1983. Soil reinforcement.General Report, VIII. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Balkema, Helsinki, 83–103.

Schmertmann, J.H., Hartman, J.P., Brown, P.R., 1978. Improved strain influence factor diagrams. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104(Gt8), 1131–1135.

Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M., Yoon, S., 2009. Analytical Modeling of geogrid reinforced soil foundation. Geotextiles and Geomembranes, 27(1), 63- 72.

Wayne, M.H., Han, J., Akins, K., 1998. The design of geosynthetic reinforced foundations. Proceedings of Geosynthetics in Foundation and Erosion Control Systems, ASCE Geotechnical Special Publication, 76, 1-18.

Kayalarda Gözeneklilikle Dayanım Özellikleri Arasında Görgül İlişkilerin Araştırılması

The Investigation of Empirical Relations Between the Porosity and Strength Properties in Rocks

S. Dağ[1,*], S. Alemdağ[1], F. Alkan[2]

[1] *Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü*
[2] *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı*
*(*serhatdag@gumushane.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada kayalarda gözeneklilik ile nokta yükü dayanım indeksi ve çekilme dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla magmatik (andezit, granit) piroklastik (andezitik tüf) ve sedimanter (kireçtaşı, kumtaşı) kökenli beş farklı kaya grubundan deney standartına uygun şekilde 426 örnek hazırlanmıştır. Bu kaya gruplarındaki örneklerin gözeneklilik değerleri belirlendikten sonra, 204'ünde nokta yükü dayanım indeksi, 222 örnekte ise çekilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kayaların dayanım değerlerinin gözeneklilik değerleri ile nasıl değişim gösterdiğini belirlemek için basit regresyon analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre gözeneklilik ve nokta yükü dayanım indeksi arasında andezit, kireçtaşı ve andezitik tüflerde üstel, granitlerde logaritmik ve kumtaşlarında ise üssel (kuvvetsel) negatif ilişkiler belirlenmiştir. Gözeneklilik ve çekilme dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, andezit ve kumtaşlarında üstel, granitlerde logaritmik, kireçtaşı ve andezitik tüflerde ise doğrusal negatif ilişkiler tespit edilmiştir. Bu analizlerde elde edilen korelasyon katsayılarının anlamlılığı hem t-testi yapılarak, hem de Pearson korelasyon katsayısına ait kritik r değerleri ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda farklı kaya grupları için gözeneklilik değerlerinden yararlanılarak, nokta yükü dayanım indeksi ve çekilme dayanımı değerlerinin dolaylı yoldan tahmin edilmesinde anlamlı eşitlikler önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gözeneklilik, Nokta Yükü Dayanım İndeksi, Çekilme Dayanımı, Korelasyon Katsayısı, T-Testi

ABSTRACT: In this study, it is investigated if there is a significant relation between the porosity and point load strength index and tensile strength in rocks. To that end, in compliance with testing standards, 426 samples are prepared out of five different rock groups which are magmatic (andesite, granite), pyroclastic (andesitic tuff) and sedimentary (limestone, sandstone) in origin. After determining the porosity values of the samples in these rock groups, the point load strength index in 204 of them and the tensile strength tests for the other 222 samples are conducted. The simple regression analyses are carried out in order to determine how the strength values of the rocks change with the porosity values. According to the results of the analyses, as determining exponential negative correlations in andesite, limestone and andesitic tuffs between the porosity and the point load strength, logarithmic negative correlations in granites and involutory ones in sandstones are discovered. Considering the correlation between the porosity and tensile strength, it is observed that there are exponential negative correlations in andesite and sandstones, logarithmic negative correlations in granites and linear ones in limestones and andesitic tuffs. The significance of correlation coefficients obtained from these analyses is tested by both using t-test and comparing it with the critical r values of Pearson correlation coefficient. As a result of the assessments made, significant equations are suggested in estimating the point load strength index and tensile strength values indirectly by using the porosity values for different rock groups.

Keywords: *Porosity, Point Load Strength, Tensile Strength, Correlation Coefficient, T-Test*

1. GİRİŞ

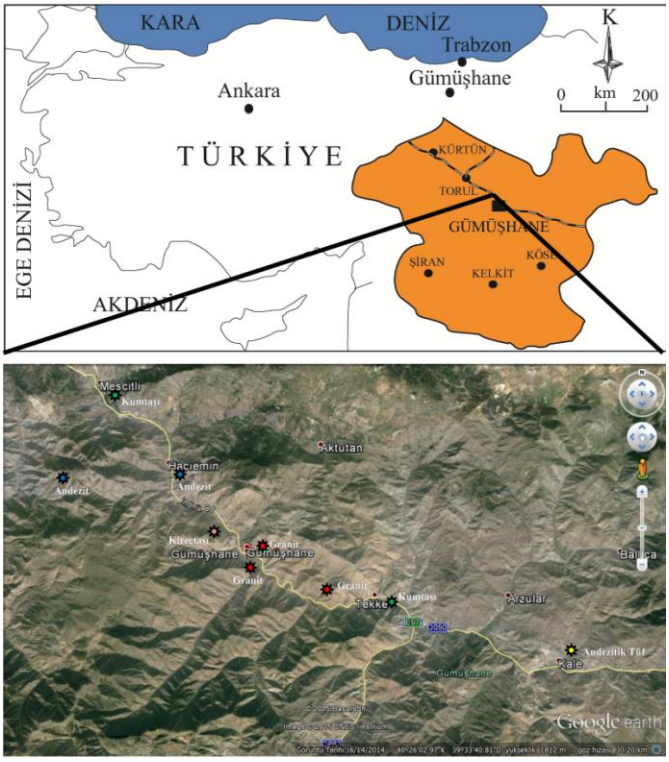
Kayaların fiziksel özellikleri ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler literatürde günümüze kadar gerçekleştirilen birçok çalışmada araştırma konusu olmuştur (Tuğrul ve Zarif, 1999; Yenice, 2002; Başarır vd., 2004; Teymen, 2005; Singh ve Sharma, 2008; Ersoy vd., 2009; Kanık, 2010; Alemdağ ve Gürocak, 2011; Babacan vd., 2012; Karaman ve Kesimal, 2012; Gürocak vd., 2012). Bu çalışmaların genel amaçlarından biri; belirlenmesi zaman alıcı, daha fazla maliyet gerektiren ve daha güç tayin edilen mekanik özelliklerin, daha kolay belirlenebilen fiziksel özellikler yardımıyla dolaylı olarak tespit edilmesidir. Kayaların dayanım özelliklerini etkileyen en önemli fiziksel parametrelerin başında gözeneklilik, ayrışma ve dokusal özellikler gelmektedir. Bu özelliklerden gözeneklilik, mekanik özelliklerin belirlenmesinde sıkça kullanılmış ve aralarındaki ilişkiler belirlenmiştir. Kaya ortamları heterojen, anizotrop ortamlardır. Kayaların yapısal özellikleri, mineralojik bileşimi, tanelerin boyutu, dizilişi, şekli, tortul kayalarda çimentonun türü, magmatik kayalarda kristallenme derecesi ve ayrışma durumu gibi özellikleri kaya davranışlarını etkilemektedir. Bu nedenle aynı tür kayalarda bile farklı alanlar için aynı sonuçları elde etmek zordur. Bu durum dikkate alındığında yapılan bu çalışma, Gümüşhane ili ve çevresinde yüzlek veren farklı litolojideki kayalarda gözeneklilik ile dayanım özellikleri arasındaki ilişkiyi belirlemek açısından önemlidir. Tuğrul ve Zarif (1999), farklı bölgelerden toplanan granitlerin mühendislik özellikleri ve petrografik özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemiştir. Granitlerde artan kuvars içeriğinin toplam gözeneklilik ve kuru birim hacim ağırlık üzerinde önemli etkileri olduğunu kuvars/feldispat oranının artması ile kuru birim hacim ağırlık değerinin arttığını, toplam gözeneklilik değerinin ise azaldığını ortaya koymuşlardır. Yenice, (2002), farklı alanlardan alınan marn ve kireçtaşı örnekleri üzerinde yapmış olduğu deneysel çalışmalar ile gözeneklilik ve tek eksenli sıkışma dayanımları arasında azalan üstel ilişkiler belirlemiştir. Başarır vd., (2004), nokta yükü dayanım indeksi, Schmidt çekici ve sonik hız deneyleri ile tek ekseni sıkışma dayanımı arasında ilişkiyi belirlemiş ve daha önceki çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmıştır. Singh ve Sharma, (2008), Ersoy vd., (2009), kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde ultrasonik dalga hızından yararlanmışlardır. Kanık, (2010), ultrasonik hız ve gözeneklilik verilerinden yararlanarak traverten, oniks ve kireçtaşı gibi karbonatlı kayaların tek eksenli sıkışma dayanımlarının tahminine yönelik eşitlikler geliştirmiştir. Alemdağ ve Gürocak, (2011), farklı bozunma derecelerine sahip bazaltlarda birleşik ayrışma indeksi (UAI) ile birim hacim ağırlık, su emme, gözeneklilik ve P dalga hızı gibi fiziksel özellikler, tek eksenli sıkışma dayanımı gibi mekanik özellikler ve farklı kimyasal ayrışma indeksleri arasındaki ilişkileri regresyon analizleri ile incelemişlerdir. Babacan vd., (2012), bej kireçtaşlarında gerçekleştirdikleri çalışma ile tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülünün tahmininde ultrasonik hız değerlerinden yararlanmışlardır. Karaman ve Kesimal, (2012), farklı kaya türlerinde eksenel ve çapsal nokta yük dayanım deneyleri ve görünür gözeneklilik değerleri kullanarak kayaların tek eksenli sıkışma dayanımının tahmini için istatistiksel eşitlikler belirlemişlerdir. Gürocak vd., (2012), birim hacim ağırlık, schmidt sertliği ve nokta yükü dayanım indeksine bağlı olarak kayaların çekilme dayanımını belirlemede yapay sinir ağlarını kullanarak tahmin kapasitesi yüksek bir sigmoidal eşitlik önermişlerdir. Bu çalışmada kayalarda gözeneklilik ile nokta yükü dayanım indeksi ve çekilme dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

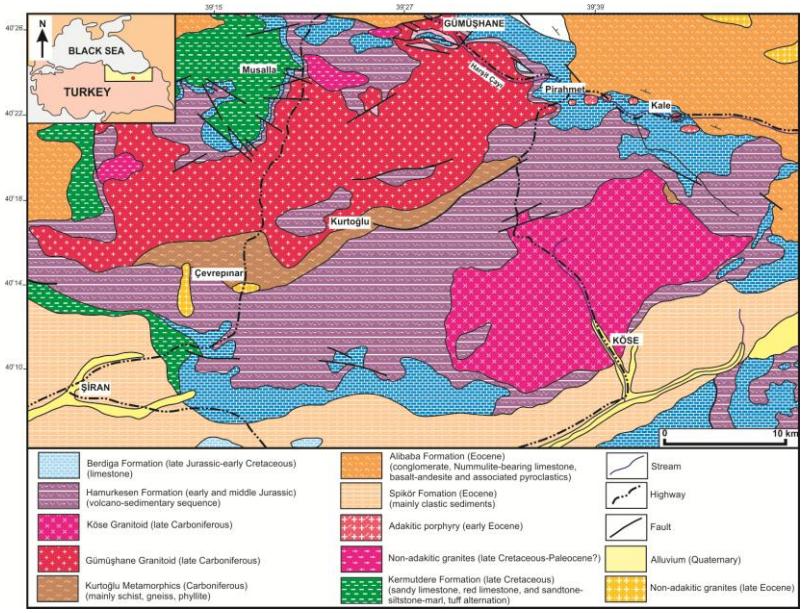
Çalışmada kullanılan farklı kayalar, Gümüşhane ili ve çevresinde yüzeyleyen litolojik birimlerden alınmıştır (Şekil1). Gümüşhane il merkezi ve yakın çevresi Anadolu'nun tektonik birliklerinden Pontid Tektonik Birliği (Ketin, 1966) içinde ve bu birliğin Güney Zonu'nda yer almaktadır. Bölgede Paleozoyik'ten Eosen'e kadar değişik yaşta ve farklı litolojide birimler görülmektedir (Şekil 2).
Deneysel çalışmalarda kullanılan kayaların litolojik özellikleri yaşlıdan gence doğru aşağıdaki paragraflarda kısaca sunulmuştur.

Erken-Geç Karbonifer yaşlı granitler çevre kayalardan renk tonu ve litolojik farklılıkları nedeniyle kolayca ayırtlanmaktadır. Taze yüzeylerinde pembe, çatlaklar boyunca ayrışmış yüzeylerinde killeşmeler sonucu beyazımsı renkleriyle ve genellikle iri taneli ortozlarıyla tipiktirler. Kristal boyutları yaklaşık 5mm olup, taneli doku gösterirler. Granitlerin ana bileşenlerini kuvars, alkali feldispat, amfibol, plajiyoklaz ve biyotit mineralleri oluştururken, ayrışma ürünü olarak da klorit ve serizit içermektedirler.

Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Berdiga Formasyon'u tabanda çörtlü kireçtaşı ve çört ara seviyeleri içeren gri-beyaz renkli, orta-kalın, masif tabakalanmalı kireçtaşlarıyla başlamaktadır (Pelin,1977). Kumtaşları, Geç Kretase yaşlı Kermutdere Formasyonu içerisinde yüzeylemektedir. Bu Formasyon volkano-tortul bir seri olup, tabanda yeşil-kahverenkli, orta tabakalı, ince-orta taneli kumtaşı ve yeşil renkli, ince-orta tabakalı marn ile başlamakta ve renk ile tabaka kalınlıkları sık sık değişmektedir. İri taneli kumtaşları ile istiflenme sonlanmaktadır (Saydam, 2002). Tüfler andezitik karakterli olup Kermutdere Formasyonu içerisinde yer almaktadır. Birim taban konglomerasıyla başlamakta ve taban seviyelerinde Nummulites fosilleri içeren kumlu kireçtaşı ve kireçtaşları içermektedir. Alibaba Formasyonu' nun ana gövdesini andezit, bazalt ve piroklastları oluşturmaktadır (Tokel, 1972).



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası



Şekil 2. Gümüşhane ili ve çevresinin jeoloji haritası (Eyüboğlu vd., 2013)

3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Gümüşhane ili ve çevresinde yüzeyleyen farklı litolojik özelliklere sahip kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle arazi çalışmaları gerçekleştirilerek yaklaşık boyutları 20x30x40cm olan blok örnekler alınmıştır. Daha sonra bu bloklardan laboratuvarda ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemlerde belirtilen uygun boyutlarda silindirik karot örnekler alınarak deneye hazır hale getirilmiştir.

3.1. Gözeneklilik

Kaya malzemesinin fiziksel özelliklerini belirlemek için ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemler esas alınmıştır. İlk olarak deney örneklerinin doğal ağırlıkları tartılarak belirlenmiştir. Karot örnekleri 105 $^{\circ}$C, 24 saat etüvde kurutulduktan sonra tartılarak kuru ağırlıkları bulunmuştur. Daha sonra 48 saat arı suda bekletilip tartılarak doygun ağırlıkları belirlenmiştir. Bu verilerden faydalanılarak kayaların gözenekliliği (n) hesaplanmıştır. Kayaların gözeneklilik değerlerine ilişkin sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

3.2. Nokta Yük Dayanımı İndeksi Deneyi

Nokta yükü deneyinin gerçekleştirilmesi esnasında (ISRM, 2007) tarafından önerilen yöntem dikkate alınmıştır. Çalışmada silindirik örnekler kullanılmış ve çapsal yükleme gerçekleştirilmiştir. Kayaların nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

3.3. Çekilme Dayanımı

Kayaların çekilme dayanımları belirlenirken, Brazilian (ındirekt) çekilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Deneyler (ISRM, 2007) tarafından önerilen yönteme uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerdeki zayıflık düzlemleri ile yükleme yönünün birbirine dik olmasına dikkat edilmiştir. Kayaların çekilme dayanımı (σ_t) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. İncelenen kayaların gözeneklilik ve dayanım değerleri

Deney Türü	Kaya Türü	Örnek Sayısı	En Küçük	En Büyük	Ortalama	Standart Sapma (±)
Gözeneklilik n (%)	Andezit	69	1.14	13.56	5.10	2.11
	Granit	219	0.46	9.67	4.02	1.95
	Kireçtaşı	44	0.23	5.22	1.99	1.49
	Kumtaşı	51	1.4	9.8	3.53	2.42
	Tüf	43	8.86	16.79	12.39	1.92
Nokta Yük Dayanım İndeksi ($Is_{(50)}$) (MPa)	Andezit	28	1.79	7.19	4.41	1.47
	Granit	113	0.21	9.27	2.21	1.72
	Kireçtaşı	16	1.03	5.84	2.52	1.38
	Kumtaşı	22	1.85	8.02	5.33	1.95
	Tüf	25	1.53	3.76	2.66	0.66
Çekilme Dayanımı (σ_t) (MPa)	Andezit	41	2.75	12.18	8.84	2.34
	Granit	106	0.89	14.76	4.71	2.99
	Kireçtaşı	28	1.23	12.55	6.68	2.76
	Kumtaşı	29	1.93	19.58	11.71	5.68
	Tüf	18	2.79	6.78	4.61	1.29

4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Basit korelasyon iki değişken arasındaki ilişkinin derecesini, büyüklüğü ve yönünü araştırırken, regresyon ise değişkenlerden biri yardımı ile diğerinin alabileceği değeri hesaplamakta faydalanılan istatistiksel analizlerdir (Tüysüz ve Yaylalı, 2005). Korelasyon katsayısı belirlendikten sonra bu katsayının anlamlı olup olmadığı test edilmelidir. Bunun için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesinde, korelasyon katsayısı, belli bir anlamlılık düzeyinde ve n-2 serbestlik derecesinde t testi kullanılarak (1) nolu eşitlik ile test edilmektedir.

$$t = r\sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \tag{1}$$

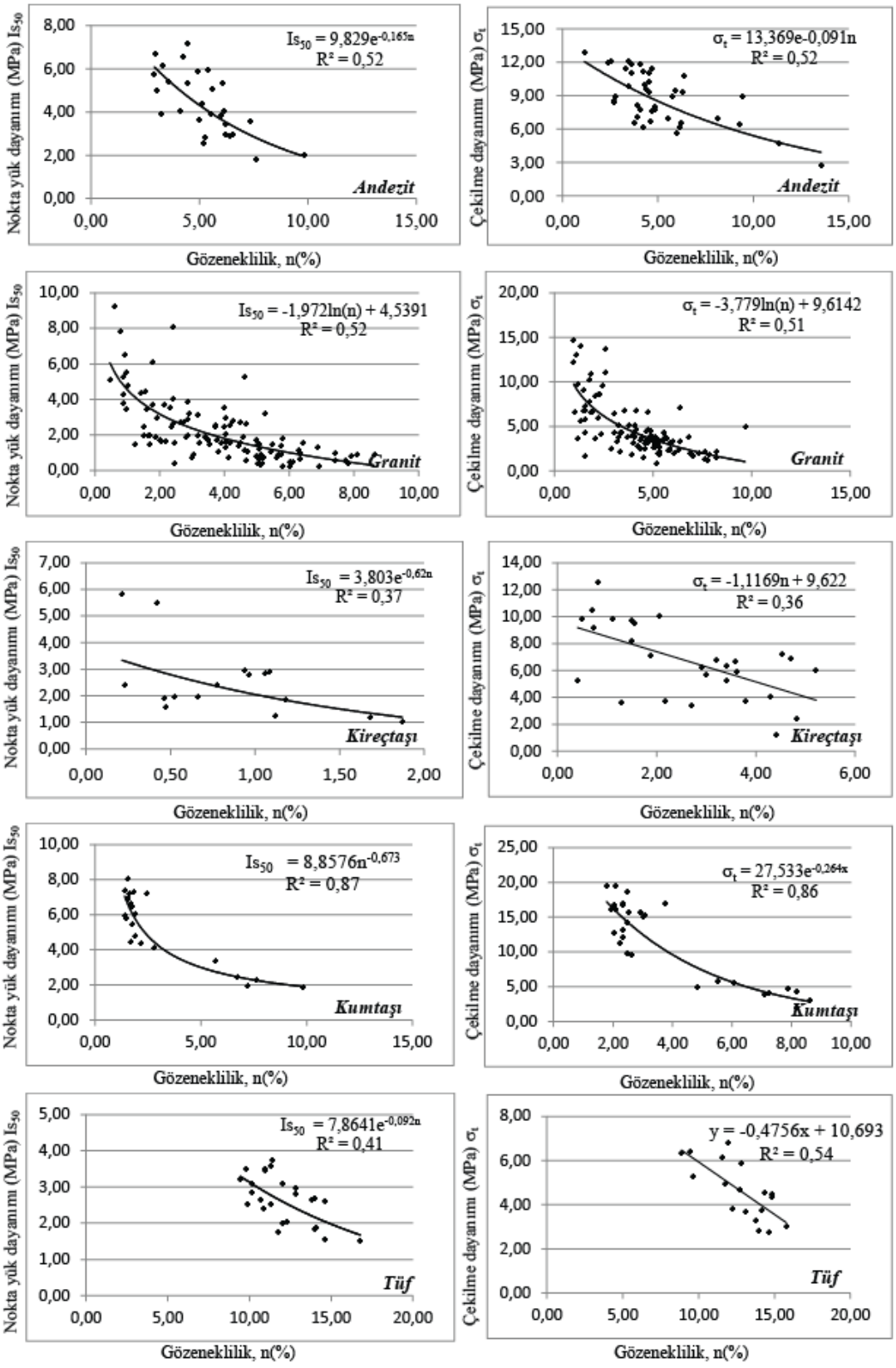
Bu eşitlikte; t t-testi, n örnek sayısı ve r ise korelasyon katsayısını ifade etmektedir. Formülden elde edilen t_h değeri t_{tablo} değerinden büyük ise korelasyon katsayısı anlamlı bulunur.
Bir diğer yöntem ise, değişkenlere ilişkin elde edilen korelasyon katsayısı değerinin (r), Pearson korelasyon katsayısına ait kritik r değeri ile karşılaştırılması yöntemidir. Bu durumda da ilişkinin anlamlı olabilmesi için değişkenler için belirlenen korelasyon katsayısının kritik r değerinden büyük olması gerekmektedir (Tüysüz ve Yaylalı, 2005, Alemdağ ve Gürocak, 2011). Bu çalışmada farklı kaya türlerine ait gözeneklilik ve dayanım değerleri arasında bir ilişki olup olmadığını belirlemek için basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 3, Çizelge 2-4'de verilmiştir.

Çizelge 2. Gözeneklilik ve nokta yükü dayanım indeksi arasında bulunan ilişkiler

Kaya türü /İlişkiler	Doğrusal	Üstel	Logaritmik	Üs
Andezit	Is_{50} = -0.63n + 7.73	Is_{50} = 9.83e$^{-0.16n}$	Is_{50} = -3.21ln(n) + 9.58	Is_{50} = 15.431 $n^{-0.815}$
	r = -0.68	r = -0.72	r = -0.67	r = -0.69
Granit	Is_{50} = -0.58 n + 4.44	Is_{50} = 5.02e$^{-0,29n}$	Is_{50} = -1.97ln(n) + 4.54	Is_{50} = 4.70 $n^{-0.89}$
	r = -0.66	r = -0.71	r = -0.72	r = -0.70
Kireçtaşı	Is_{50} = -1.55n +3.46	Is_{50} = 3.80e$^{-0,62\ n}$	Is_{50} = -1.24ln(n) + 2.11	Is_{50} = 1.93 $n^{-0.45}$
	r = -0.54	r = -0.62	r = -0.58	r = -0.59
Kumtaşı	Is_{50} = -0.67n + 7.37	Is_{50} = 8.22e$^{-0,17n}$	Is_{50} = -2.69ln(n) + 7.71	Is_{50} = 8.86n$^{-0.67}$
	r = -0.86	r = -0.93	r = -0.88	r = -0.93
Tüf	Is_{50} = -0.22n + 5.34	Is_{50} = 7.86e$^{-0,09n}$	Is_{50} = -2.72ln(n) + 9.41	Is_{50} = 42.48n$^{-1.13}$
	r = -0.62	r = -0.64	r = -0.61	r = -0.63

Çizelge 3. Gözeneklilik ve çekilme dayanım indeksi arasında bulunan ilişkiler

Kaya türü /İlişkiler	Doğrusal	Üstel	Logaritmik	Üs
Andezit	σ_t= -0.63 n + 11.99	σ_t = 13.38e$^{-0.09_n}$	σ_t = -3.36ln(n) + 13.93	σ_t = 16.74 $n^{-0.45}$
	r = -0.65	r = -0.71	r = -0.64	r = -0.65
Granit	σ_t= -1.02n + 8.97	σ_t = 9.36e$^{-0.20n}$	σ_t = -3.78ln(n) + 9.61	σ_t = 10.08 $n^{-0.72}$
	r = -0.66	r = -0.69	r = -0.72	r = -0.70
Kireçtaşı	σ_t= -1.12n + 9.62	σ_t = 9.80e$^{-0.18n}$	σ_t = -2.16ln(n) + 8.31	σ_t = 7.82n$^{-0.35}$
	r = -0.60	r = -0.54	r = -0.58	r = -0.50
Kumtaşı	σ_t= -2.15n + 20.04	σ_t = 27.53e$^{-0.26n}$	σ_t = = -9.40ln(n) + 23.07	σ_t = 39.01n$^{-1.14}$
	r = -0.87	r = -0.93	r = -0.88	r = -0.91
Tüf	σ_t = -0.48n + 10.70	σ_t = 16.71e$^{-0.10n}$	σ_t = -5.62ln(n) + 18.86	σ_t = 98.16n$^{-1.22}$
	r = -0.73	r = -0.72	r = -0.72	r = -0.71



Şekil 3. Gözeneklilik ve dayanım değerlerine ilişkin basit regresyon analizleri

Çizelge 4. Korelasyon katsayısı değerlerinin anlamlılığının testi

Parametre *Gözeneklilik (n)*	Kaya Türü	Örnek Sayısı	Korelasyon r	Pearson kritik r	t hesap	t tablo
Nokta Yük Dayanımı ($I_{s(50)}$)	Andezit	28	-0.721	0.375	5.31	2.05
	Granit	113	-0.724	0.196	11.07	1.98
	Kireçtaşı	16	-0.612	0.497	2.89	2.12
	Kumtaşı	22	-0.932	0.425	11.46	2.07
	Tüf	25	-0.642	0.396	4.02	2.06
Çekilme Dayanımı (σ_t)	Andezit	41	-0.715	0.308	6.38	2.02
	Granit	106	-0.717	0.196	10.49	1.98
	Kireçtaşı	28	-0.600	0.375	3.82	2.05
	Kumtaşı	29	-0.927	0.368	12.88	2.04
	Tüf	18	-0.733	0.468	4.30	2.10

5. SONUÇLAR

Kayaların fiziksel özellikleri ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler birçok çalışmada araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada kayalarda gözeneklilik ile nokta yükü dayanım indeksi ve çekilme dayanımı gibi dayanım özellikleri arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. İlişkinin derecesi korelasyon katsayısı ile belirlenmiştir. Bu durum belirlenirken değişkenler arasında doğrusal, üstel, logaritmik ve üs (kuvvet) ilişkileri incelenmiş ve en yüksek korelasyon katsayısını veren ilişkilerdeki eşitlikler dolaylı tahmin eşitlikleri olarak üretilmiştir. Analiz sonuçlarına göre gözeneklilik ve nokta yük dayanımı arasında andezitlerde (r= -0.72), kireçtaşlarında (r= -0.62) ve andezitik tüflerde (r= -0.64) üstel negatif, granitlerde (r= -0.72) logaritmik ve kumtaşlarında (r= -0.93) ise üssel (kuvvetsel) negatif ilişkiler belirlenmiştir. Gözeneklilik ve çekilme dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, andezitlerde (r= -0.71) ve kumtaşlarında (r= -0.93) üstel, granitlerde (r= -0.72) logaritmik, kireçtaşı (r= -0.60) ve andezitik tüflerde (r= -0.73) ise doğrusal negatif ilişkiler tespit edilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen korelasyon katsayılarının anlamlılığı hem t testi, hem de Pearson korelasyon katsayısı değerleri ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tüm katsayılar için $t_h > t_{tablo}$ değeri elde edilmiştir. Ayrıca yine belirlenen tüm korelasyon katsayısı değerleri ilgili Pearson korelasyon katsayısı değerinden büyük çıkmıştır. Bu durum da korelasyon katsayılarının anlamlı olduğunu göstermiştir.

Parametreler arasında yapılan basit regresyon analizleri değerlendirildiğinde, farklı kaya grupları için kolay olarak belirlenen gözeneklilik değerlerinden yararlanarak, nokta yükü dayanımı ve çekilme dayanımı değerlerinin tahmin edilmesinde anlamlı eşitlikler önerilmiştir. Belirlenen ilişkiler özellikle yörede yüzlek veren kayalarda gerçekleştirilecek mühendislik çalışmalarının ön tespit aşamalarında önemli faydalar sağlayacak niteliktedir.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu araştırma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı bitirme çalışması öğrencilerine teşekkürlerini sunarlar.

7. KAYNAKLAR

Alemdağ, S., Gürocak, Z., 2011. Üst Kretase yaşlı bazaltlarda (Trabzon/Türkiye) birleşik ayrışma indeksi (UAI) ile fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler arasındaki ilişkiler. FÜ Muhendislik Bilimleri Dergisi, 23(1), 1-10.

Başarır, H., Kumral, M., Özsan, A., 2004. Kayaların tek eksenli basınç dayanımının basit deney yöntemleriyle tahmini. KAYAMEK'2004-VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas.

Ersoy, H., Özdemir, A., Yalçınalp, B., 2009. Geology and geotechnical properties of Kalecik (Gümüşhane) travertines. Proceedings of The 21st International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya, 639-648.

Eyuboglu, Y., Santosh, M., Dudas, O.F., Akaryalı, E., Chung, S., Akdağ, K., Bektaş, O., 2013. The nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting: a synthesis from the eastern pontides, NE Turkey. Geoscience Frontiers, 4, 353-375.

Gurocak, Z., Solanki, P., Alemdag, S., Zaman, M., 2012. New consiredations for empirical estimation of tensile strength of rocks. Engineering Geology, 145-146,1-8.

ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofsey, Ankara, Turkey, 628 p.

Kanık, D., 2010. Karbonat kayaların tek eksenli basınç dayanımlarının basit indeks deneyler kullanılarak tahmini. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Karaman, K., Kesimal, A., 2012. Kayaların tek eksenli basınç dayanımı tahmininde nokta yükü deney yöntemleri ve porozitenin değerlendirilmesi. Madencilik, 51(4), 3-14.

Ketin, İ. 1966. Türkiye'nin tektonik birlikleri. MTA Dergisi, 66, 20-34.

Pelin, S., 1977. Alucra (Giresun) güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından jeolojik incelenmesi. KTÜ Yayını, No:87, Trabzon.

Saydam, Ç., 2002. Doğu Pontidler'de Geç Kretase yaşlı kırıntılı çökellerin sedimanter, petrografik ve organik jeokimyasal özellikleri. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Singh, T.N., Sharma, P.K., 2008. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67, 1, 17-22.

Teymen, A., 2005. Bazı kayaların petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Tokel, S., 1972. Stratigraphical and volcanic history of the Gümüşhane region, NE Turkey. University College, London.

Tuğrul, A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, Engineering Geology, 51, 303-317.

Tüysüz, N., Yaylalı, G., 2005. Jeoistatistik Kavramlar ve Bilgisayarlı Uygulamalar, 1. Baskı, KTÜ, Trabzon.

Yenice, H., 2002. Bazı kayaların tek eksenli basınç dayanımları ile diğer malzeme özellikleri arasındaki ilişkiler. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 65-71.

Kaya Kütlelerinin Dayanım Özelliklerinin Tahmininde Kullanılan Görgül İlişkilerin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma

A Study on the Comparison of the Empirical Relationships Used in the Assessment of Rock Mass Strength Properties

S. Berber[1], N. Ceryan[2,*], G. Esin[3], S. Ceryan[1]

[1] *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Balıkesir*
[2] *Balıkesir Üniversitesi Balıkesir MYO Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Balıkesir*
[3] *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği ABD*
*(*nceryan@balikesir.edu.tr)*

ÖZ: Kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma ve makaslama dayanımı, şevlerin, tünellerin ve temellerin tasarımları gibi jeoteknik çalışmalar için çok önemlidir. Kaya kütlelerinin dayanım özelliklerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi süreksizliklerle birlikte örselenmemiş örnek hazırlanmasındaki güçlüklerden dolayı oldukça zordur. Bu nedenle, kaya kütlesinin dayanım özellikleri büyük ölçekli arazi deneyleri, geriye yönelik analizler, kaya kütle sınıflandırma sistemleri ve görgül ilişkiler gibi farklı yöntemlerle tahmin edilmektedir. Bu çalışmada, Gümüşhane-Trabzon karayolunda seçilen eklemli volkanik kaya kütlelerinin dayanım özellikleri RMR ve Q Sistemleri, Hoek-Brown yenilme ölçütü ve SSPC sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, litolojik özellikler, ayrışma durumu ve süreksizlik sıklığına göre kaya kütleleri jeoteknik birimlere ayrılmış, daha sonra söz konusu değişik görgül ölçütler kullanılarak kaya kütlesinin dayanım özellikleri hesaplanmış ve dayanım özelliklerinin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ile değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Kütlesi, Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, Makaslama Dayanımı, Kaya Kütle Sınıflaması, Görgül İlişkiler

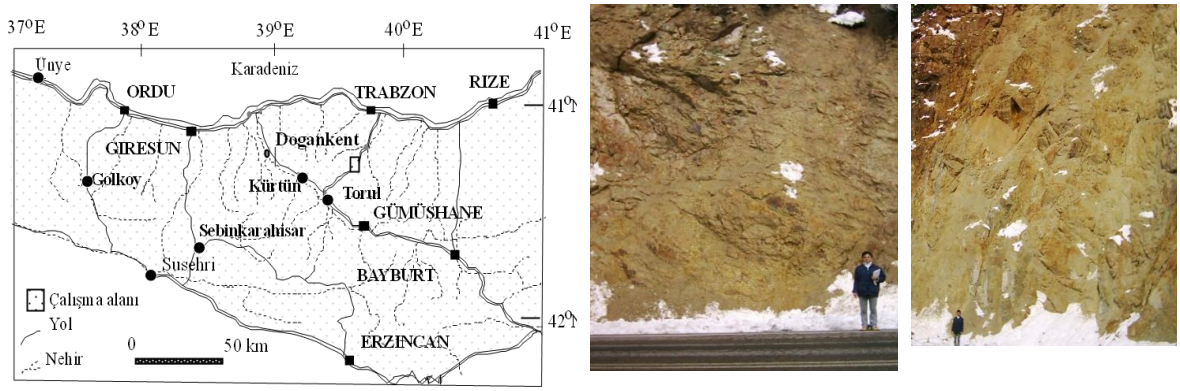
ABSTRACT: *The uniaxial strength and shear strength of rock masses has vital importance for geotechnical projects such as pillar strength, foundation, tunnels and slope stability. Determination of the strength properties of rock mass is extraordinarily difficult since the size of representative specimens' volume is too large for laboratory testing. Therefore the strength properties of the rock mass can be determined by different methods including large-scale testing, back calculation, rock mass classification system and empirical relations. In this study, the uniaxial strength and shear strength of jointed volcanic rock masses selected from Gümüşhane-Trabzon highway, NE Turkey were assessed using empiric relationships based on Rock Mass rating, Q System, the Hoek-Brown criterion and the SSPC system. To this end, the geotechnical units were separated from the jointed rock masses using the lithological features, the weathering state, and the frequency of discontinuity. Then uniaxial strength and shear strength of the geotechnical units were estimated using the said empiric relations and the change of the strength properties of the geotechnical unit with Geological Strength Index was investigated.*

Keywords: *Rock Mass, Uniaxial Compressive Strength, Shear Strength, Rock Mass Classification, Empirical Relations*

1. GİRİŞ

Kaya kütlesi içinde veya üzerinde yapılan mühendislik yapılarının ekonomik ve güvenilir olarak inşa edilebilmesi için dayanım özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Kaya kütlesi dayanım özelliklerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi için kaya kütlesini temsil edebilecek boyutlarda örnek hazırlanmasındaki zorluklardan dolayı büyük ölçekli arazi deneyleri geliştirilmiştir. Ancak arazi deneyleri yersel özelliklerden çok fazla etkilenmekte, henüz yeterince standartlaşmamış olup, büyük alet ve cihazlara ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu deneylerin her türlü arazi koşullarında gerçekleştirilmesi de zordur ve çoğu kez de ekonomik değildir. Bu nedenle söz konusu parametreleri

tahmin etmek için önerilmiş görgül ilişkiler basit, kolay ve hızlı uygulanabilen alternatif yöntemler olarak kullanılmaktadır. Değişik araştırmacılar; bu ilişkileri kaya türü, ayrışma derecesi, fiziksel özellikleri ve yapısı fraklı olan kaya kütlelerine uygulayarak geliştirmekte, olumlu ve olumsuz yönlerini tartışmaktadırlar (Ulusay ve Sönmez 2002). Bu çalışmada kaya kütle sınıflandırmalarına dayanan farklı görgül ilişkilerin kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımının ve makaslama dayanımı parametrelerinin tahmininde kullanılabilirliği karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Bu amaçla seçilen çalışma alanı, Trabzon-Gümüşhane (KD, Türkiye) karayolunun üzerindeki Zigana Tüneli'nin Gümüşhane çıkışından Gümüşhane'ye doğru 2 km'lik yol boyunca yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası ve değişik derecelerde ayrışmış dasitik volkanitlerde ayırtlanan jeoteknik birimler (soldan sağa az ayrışmış ve orta derecede ayrışmış dasit)

İncelenen yol kazısı şevleri Turoniyen-Santoniyen yaşlı, tortul ara katmanlı dasit ve piroklastiklerinden oluşan Kızılkaya Formasyonu içinde açılmıştır. Bu şevlerde tanımlanan 20 adet jeoteknik birimin tek eksenli sıkışma dayanımını ve makaslama dayanımı parametrelerini belirlemek için Kaya Kütle Puanı (RMR) Sistemi (Bieniawski, 1989), Q Sistemi (Barton vd., 2002), Hoek-Brown ölçütü (Hoek vd., 2002) ve Yamaç Duraylılığı Olasılık Sınıflamasına (SSPC; Hack vd., 2003) dayanan görgül ilişkiler kullanılmıştır. Jeoteknik birimler için belirlenen dayanım değerleri birbiriyle karşılaştırılmış ve Jeolojik Dayanım İndeksi ile değişimi incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Jeoteknik Birimlerin Tanımlanması

Duraylılığı incelenen şevlerde; litolojik özellikler, ayrışma durumu, süreksizlik sıklığı ve şev geometrisi dikkate alınarak 20 jeoteknik birim ayırtlanmıştır. Bu jeoteknik birimlerin tek eksenli sıkışma dayanımı ve makaslama dayanımı parametreleri kaya kütlesi sınıflandırma sistemlerine dayanan görgül ilişkiler kullanılarak belirlenmiştir. İncelenen jeoteknik birimlere ait kaya malzemesi dayanımı, Kaya Kütle Puanı (RMR) değeri Duraylılığı Olasılık Sınıflama değerleri Ceryan (2005)'ten alınmıştır.

İncelenen jeoteknik birimlerin IAEG (1995)'e göre tanımlanmış ayrışma dereceleri (W), kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, hacimsel çatlak sayısı (Jv) ve blok boyutu Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Jeoteknik birimlerin kaya kütlesi özellikleri ve RMR parametre değerleri

JB	W	Vb	σ_{ci}	RQD	P3	P4a	P4b	P4c	P4d	P4e	P6	RMRt	RMRn
1	3	0.298	133.9	99	0.540	6.5	3	Az prz	Y, 3mm	Orta	-5	61	56
2	1	0.074	172.2	91	0.196	6.5	2	Az prz	yok	Az	-25	59	34
3	3	0.087	119.8	88	0.173	6.5	2	Az prz	Y-2 mm	Orta	-25	44	19
4	1	0.127	150.4	91	0.2	6.5	4	Az prz	S-2 mm	Az	-5	68	63
5	2	0.208	163.8	94	0.303	6.5	1	Az prz	Y-1 mm	Az	-25	58	33
6	4	0.027	114	79	0.121	2.5	6	Az prz	Y-4 mm	Yüksek	-5	53	48
7	3	1.495	133	99	0.909	5	5	Prz	Y-4 mm	Orta	-25	74	49
8	1	0.234	181.6	96	0.303	6.5	3	Prz	S-3mm	Taze	-5	75	70
9	3	0.228	163.1	99	0.741	6.5	3	Prz	S-2mm	Az	-5	78	73
10	1	0.603	190	99	0.625	18.6	2	Prz	S-2mm	Az	-25	77	52
11	3	0.224	162.5	97	0.333	6.5	3	Az prz	Y-2mm	Az	-5	69	64
12	3	0.419	163.1	99	0.625	6.5	2	Az prz	Y-2mm	Az	-5	73	68
13	1	0.099	197.5	91	0.206	5.2	5	Prz	Y-3mm	Az	-25	70	45
14	3	1.00	111.8	100	1.22	16.3	7	Prz	Y-5 mm	Yüksek	-5	72	67
15	2	1.206	172.8	99	0.85	20	2	Prz	S-2 mm	Az	-25	79	54
16	2	0.20	153	95.5	0.299	8.9	3	Az prz	S-3mm	Az	-25	70	45
17	3	0.013	153	93	0.215	20	5	Az prz	S-5mm	Orta	-25	62	37
18	1	0.364	190.4	98	0.48	11.4	2	Az prz	S-2mm	Az	-25	73	48
19	1	0.172	184.4	94	0.28	8.9	2	Az prz	S-1mm	Az	-25	71	46
20	3	0.652	119.6	98	0.44	9.9	4	Prz	S-3mm	Orta	-25	71	46

(JB: Jeoteknik birim, Vb: Blok boyutu (m^3), σ_{ci} kaya malzemesi tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa), RQD : Kaya kalite göstergesi, P3: süreksizlik ara uzaklığı (m), P4a: Süreksizlik izi uzunluğu (m), P4b: ortalama süreksizlik açıklığı (mm): P4c: Pürüzlülük tanımı Ptb: Dolgu türü ve kalınlığı (mm), Pte: süreksizlik yüzeyi ayrışma durumu, P6: Süreksizlik yönelimi düzeltmesi, RMRt: temel RMR puanı, RMRn: Nihai RMR puanı, Y: yumuşak dolgu, S: sert dolgu, prz: pürüzlü,)

2.2. Jeoteknik Birimlerin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı ve Makaslama Dayanımı Parametreleri

Kaya Kütle Puanı (RMR) sınıflama sistemi değişik tarihlerde düzenlenerek en son şeklini 1989 yılında almıştır (Bieniawski, 1989). İncelenen jeoteknik birimler için ölçülen/tanımlanan parametre değerleri ve bunlara göre bulunan RMR değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu çalışmada RMR değerinden yararlanarak jeoteknik birimlerin tek eksenli sıkışma dayanımlarını (σ_{cm}) tahmin etmek için Sheorey (1997) ve Asef vd. (2000) tarafından önerilen aşağıdaki görgül ilişkiler kullanılmıştır.

$$\sigma_{cm1}= \sigma_{ci}\, e^{(RMR-100)/20} \quad \text{(Sheorey 1997)} \tag{1}$$

$$\sigma_{cm2}=0.5\, e^{0.06RMR} \quad \text{(Asef vd. 2000)} \tag{2}$$

Q sistemi Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Bu sistemde; RQD, Eklem (süreksizlik) takımı sayısı, süreksizlik yüzeyi pürüzlülüğü ve alterasyonu, kazı yüzeyinden su gelimi (veya basıncı) ve doğal gerilme (ve kaya türüne bağlı olarak gelişebilecek deformasyon) durumu arazide ölçülerek (veya gözlemlenerek) sayısal hale getirilir ve aşağıda verilen bağıntıyla Q değeri elde edilmektedir.

$$Q=(RQD/Jn)\ (Jr/Ja)\ (Jw/SRF) \tag{3}$$

İncelenen jeoteknik birimler için bulunan Q değerleri, aşağıda verilen görgül ilişkilerden tahmin edilen tek eksenli sıkışma dayanımı ve makaslama dayanımı parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

$c_{m1}=(RQD/Js)(1/SRF)(\sigma_{ci}/100)$ ve $\phi_{m1}=\tan^{-1}(Jr\ Jw/Ja)$ (Barton, 2002) (4)

$\sigma_{cm3}=2c_m(NQ)^{0.5}$ $(NQ=\tan^2(45+\phi_m/2)$ (Mohr-Coloumb kriteri) (5)

$\sigma_{cm4}=7\gamma(Q\ \sigma_{ci}\ 0.01)^{1/3}$ (Sing vd., 1997) (6)

$\sigma_{cm5}=5\gamma Q^{1/3}$ (Barton, 2002) (7)

Çizelge 2. Jeoteknik birimlerin RMR ve Q değerlerinden yararlanılarak bulunan dayanım değerleri

JB	σ_{cm1}	σ_{cm2}	Jr	Ja	SRF	Jw	Js	Q	ϕ_{m1}	c_{m1}	σ_{cm3}	σ_{cm4}	σ_{cm5}
1	14.83	14.395	3	4	2.5	1	9	3.267	37	5.832	23.39	27.316	21.506
2	6.351	3.845	3	3	5	1	9	2.022	45	3.482	16.81	23.2807	19.932
3	2.087	1.563	3	8	5	1	9	0.733	21	2.343	6.82	16.6017	12.594
4	23.648	21.908	3	3	2.5	1	9	4.044	45	6.083	29.37	29.3317	24.004
5	5.746	3.621	3	3	2.5	1	9	4.178	45	6.843	33.04	29.6506	24.966
6	8.467	8.907	3	8	5	1	9	0.658	21	2.001	5.82	16.0153	11.950
7	10.384	9.458	2	12	2.5	1	9	0.733	9	5.852	13.7	16.6018	13.041
8	40.520	33.343	2	3	2.5	1	9	2.874	9	7.829	18.33	26.1749	22.810
9	42.282	39.919	2	4	2.5	1	9	2.2	26	7.176	22.97	23.9438	20.132
10	17.2364	11.323	2	3	2.5	1	9	2.933	9	8.36	19.58	26.3536	23.315
11	26.861	23.263	3	8	2.5	1	9	1.616	21	7.005	20.39	21.6069	18.145
12	32.92932	29.573	3	8	5	1	9	0.825	21	3.588	10.44	17.2665	14.517
13	12.625	7.440	2	12	2.5	1	9	0.674	9	7.988	18.7	16.1419	14.466
14	21.471	27.851	2	4	2.5	1	9	2.222	26	4.969	15.9	24.0242	17.810
15	17.324	12.767	2	4	2.5	1	9	2.200	26	7.603	24.34	23.9438	20.523
16	9.7809	7.440	3	8	2.5	1	9	1.5833	21	6.46	18.8	21.4574	17.661
17	6.5563	4.604	3	8	2.5	1	9	1.55	21	6.324	18.4	21.3057	17.536
18	14.142	8.907	3	3	2.5	1	9	4.3556	45	8.293	40.04	30.0653	26.617
19	12.3927	7.900	3	4	2.5	1	9	3.1333	37	7.704	30.9	26.9394	23.596
20	8.0378	7.900	1.5	4	2.5	1	9	1.6333	21	5.209	15.16	21.6809	16.438

(σ_{cm1} ve σ_{cm2} Eşitlik1 ve 2'den bulunan, σ_{cm3}, σ_{cm4} ve σ_{cm5} Eşitlikler 5,6 ve 7'den bulunan kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa), ϕ_{m1} ve c_{m1} Q değerine bağlı olarak bulunan kaya kütlesi makaslama dayanımı parametreleri (derece ve MPa), J_r: Eklem pürüzlülük sayısı, J_a: eklem alterasyonu sayısı, J_w: Su azaltma faktörü, SRF: Gerilme azaltma faktörü, Q: Eşitlik 3'ten bulunan değer)

SSPC sisteminde (Hack vd., 2003) çıktı olarak iki ayrı bileşen bulunmaktadır. Bunlardan ilki kaya kütlesinin kohezyonu ve sürtünme açısıdır. İkincisi ise, şev düzenlemesinde kullanılan belirli bir şev açısına göre en büyük şev yüksekliğini de içeren duraylılığın olasılık olarak değerlendirilmesidir. Bu sistemde kaya kütlesi kohezyonu (c_{m2}) ve sürtünme açısı (ϕ_{m1}) aşağıdaki bağıntılarla elde edilmektedir (Hack vd. 2003).

$\phi_{m2}= 0.2417\ \sigma_{ci} + 52.12\ SPA + 5.779\ CD$ (8)

$c_{m2} = (94.27\ \sigma_{ci} + 28629\ SPA + 3593\ CD)0.001$ (9)

$$CD=\frac{\frac{TC1}{DS1}+\frac{TC2}{DS2}+\frac{TC3}{DS3}}{\frac{1}{DS1}+\frac{1}{DS2}+\frac{1}{DS3}} \quad (10)$$

$TC=Rl.\ Rs\ .Im.\ Ka$ (11)

$SPA= (0.30 + 0.259 \log_{10} Smin)\ (0.20 + 0.296 \log_{10} Sint)\ (0.10 + 0.333 \log_{10} Smax)$ (12)

Burada, SPA süreksizlik ara uzaklığı faktörü, CD kaya kütlesinin süreksizlik koşulu, TC süreksizlik yüzey koşulu faktörü, Rl büyük ölçekli pürüzlülük, Rs küçük ölçekli pürüzlülük, Im, dolgu malzemesi

türü, DS süreksizlik takımının ortalama ara uzaklığı (m)'dir . Bu çalışmada süreksizlik yüzeylerinde erime boşlukları olmadığından tüm sürekszilikler için Ka=1 olarak alınmıştır. SSPC sisteminde kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı için bir ilişki önerilmemiştir. Bu çalışmada, Eşitlik 8 ve 9 ile Mohr-Coloumb ölçütünden yararlanılarak jeoteknik birimlerin tek eksenli sıkışma dayanımı (σcm_6) tahmin edilmiştir. SSPC parametre değerleri Çizelge 4'de ve bu sisteme dayanan ölçütlerden yararlanılarak bulunan kaya kütlesi dayanım özellikleri Çizelge 5'de verilmiştir

Çizelge 4. Jeoteknik birimlerde her süreksizlik takımı için bulunan süreksizlik ara uzaklığı (DS), büyük ölçekli pürüzlülük (Rl), küçük ölçekli pürüzlülük (Rs) ve dolgu malzemesi türü (Im) değerleri

JB	DS1	RI1	Im1	DS2	RI2	Rs2	Im2	DS3	RI3	Rs3	Im3	SPA	CD
1	0.495	1	0.55	0.629	0.75	0.8	0.9	0.716	0.75	0.8	1	0.388	0.516
2	0.289	0.95	1	0.467	0.85	0.75	1	0.508	0.85	0.75	1	0.315	0.672
3	0.27	0.85	1	0.4	0.85	0.75	0.55	0.539	0.85	0.75	0.55	0.306	0.483
4	0.354	0.95	1	0.373	0.95	0.75	1	0.553	0.95	0.75	0.55	0.317	0.631
5	0.382	0.95	1	0.406	0.95	0.8	1	0.829	0.95	0.8	1	0.355	0.76
6	0.204	0.85	0.55	0.332	0.85	0.75	0.55	0.355	0.85	0.75	0.55	0.256	0.35
7	0.966	0.95	0.55	1.045	0.95	0.8	0.55	1.221	0.95	0.75	0.55	0.516	0.411
8	0.432	0.85	0.9	0.593	0.85	0.8	0.9	0.682	0.85	0.8	0.9	0.373	0.61
10	0.486	0.95	0.9	0.64	0.95	0.8	0.9	1.91	0.95	0.8	0.9	0.465	0.68
11	0.432	0.85	0.55	0.593	0.85	0.8	0.55	0.682	0.85	0.8	0.55	0.373	0.37
12	0.457	0.95	0.65	0.781	0.95	0.8	0.55	0.8	0.95	0.8	0.55	0.407	0.452
14	1.527	0.95	0.55	1.662	0.95	0.8	0.55	1.752	0.95	0.8	0.55	0.629	0.42
15	0.83	0.95	0.9	0.948	0.95	0.8	0.9	1.183	0.95	0.8	0.9	0.495	0.68
16	0.395	0.85	0.9	0.525	0.85	0.75	0.9	0.68	0.85	0.75	0.9	0.359	0.57
18	0.549	0.85	0.9	0.712	0.85	0.75	0.9	0.742	0.85	0.75	0.9	0.406	0.57
19	0.32	0.85	0.9	0.518	0.85	0.75	0.9	0.97	0.85	0.75	0.9	0.372	0.57
20	0.686	0.85	0.9	0.743	0.85	0.8	0.9	0.835	0.85	0.8	0.9	0.433	0.61

*(1.Süreksizlik takımında Rl=1 olarak ölçülmüştür)

Hoek ve Brown tarafından 1980'de önerilmiş ve 2002 yılına kadar önemli değişiklikler geçirmiş olan ve literatürde geniş uygulama alanı bulan Hoek- Brown yenilme ölçütünde kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı Mohr-Coulomb kriterini dikkate alarak makaslama dayanımı parametreleri aşağıdaki bağıntılardan bulunmaktadır (Hoek vd. 2002)

$$\sigma_{cm7} = \sigma_{ci}\, s^{a} \tag{13}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right), \quad s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right), \quad m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \tag{14}$$

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \tag{15}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}\right](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \tag{16}$$

Burada, a, s ve m_b kaya kütlesi yapısına bağlı katsayılardır, σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, D kaya kütlesi örselenme sayısı, GSI Jeolojik Dayanım İndeksidir. İncelenen jeoteknik

birimlerde şevler küçük ölçekli patlatmalarla açılmış olup bu patlatmalar nedeniyle kaya kütlesin orta derecede hasar oluşmuştur. Bu durum dikkate alınarak incelenen jeoteknik birimler için tünel veya şevde yapılan kazının niteliğine göre önerilmiş olan çizelgeden D=0.7 olarak seçilmiştir.

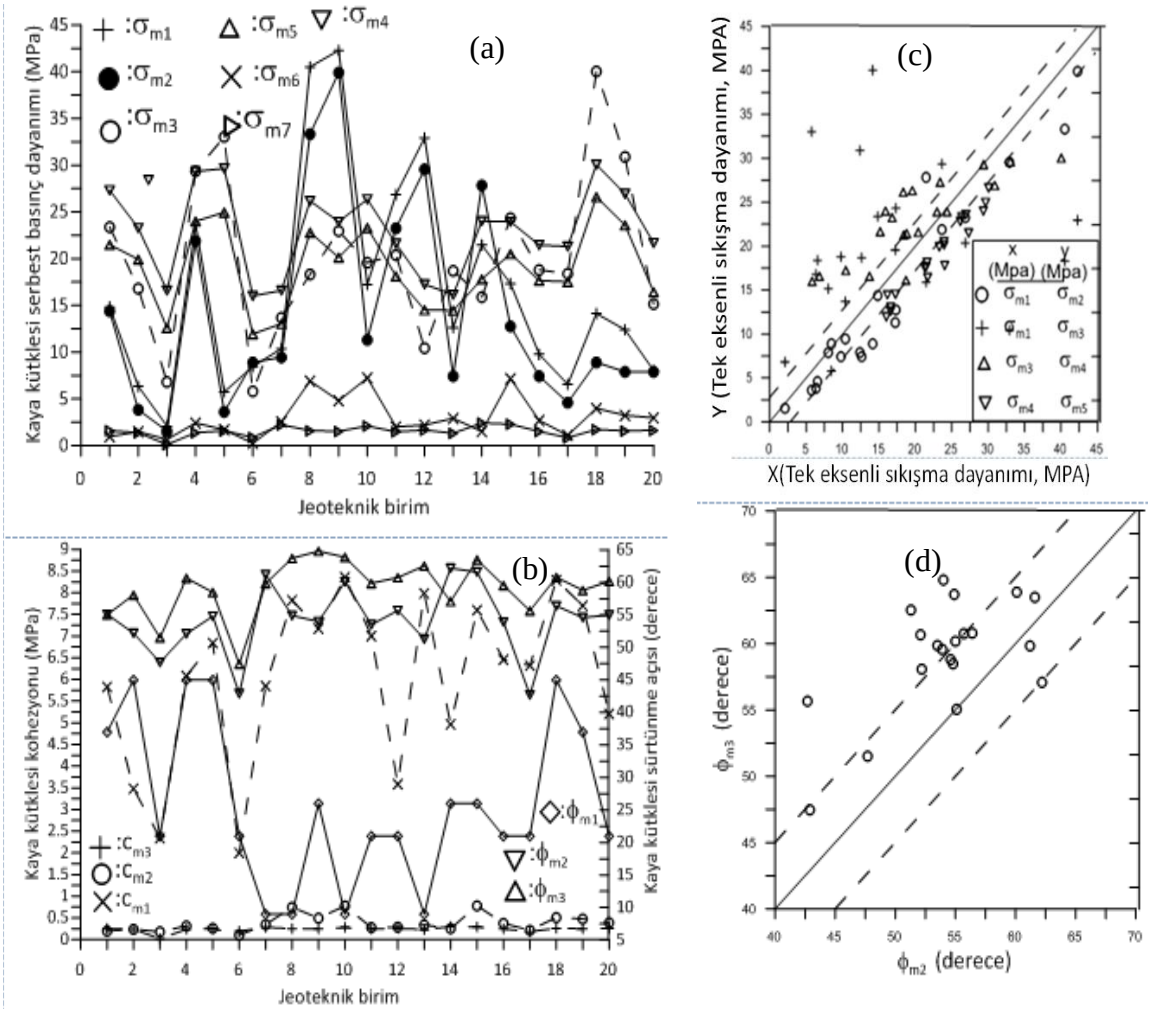
Çizelge 5. Jeoteknik birimlerde SSPC sistemi ve Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre tahmin edilen tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{cm}) ve makaslama dayanımı parametreleri (c_m ve ϕ_m)

	σ_{cm6}	c_{m2}	ϕ_{m2}	Jv	SR	SCR	GSI	σ_{cm7}	c_{m3}	ϕ_{m3}
1	1.6165	0.1988	55.	5.0075	52	8	42	0.9683	0.2541	55
2	1.3947	0.2398	58	7.57	44	10	44	1.4936	0.2388	52
3	0.1126	0.1817	51	8.05	43	8	39	0.6562	0.0218	48
4	1.3855	0.3160	60	7.3	45	12	51	2.4261	0.2379	52
5	1.5975	0.2627	58	6.28	48	10	46	1.7001	0.2534	55
6	0.8871	0.1021	47	10.8	38	5	30	0.2572	0.1933	43
7	2.235	0.3486	59	2.83	62	10	53	2.5528	0.2869	61
8	1.6008	0.7473	63	5.469	50	15	61	6.9214	0.2531	55
9	1.5263	0.4970	64	5.478	50	14	58	4.8135	0.248	54
10	2.1122	0.7763	63	4.144	55	14	61	7.2416	0.282	60
11	1.4831	0.2799	59	5.469	50	10	48	2.0144	0.2445	53
12	1.6669	0.2879	60	4.72	53	10	49	2.2081	0.2572	56
13	1.3283	0.3400	62	7.263	45	12	50	2.9191	0.2332	51
14	2.429	0.2557	57	1.827	69	7	49	1.5136	0.3006	62
15	2.2967	0.7811	63	3.91	56	14	62	7.1699	0.2906	62
16	1.5201	0.3758	59	5.907	49	12	52	2.6926	0.2477	54
17	0.8501	0.2160	55	2.718	62	6	42	1.1065	0.1861	43
18	1.7299	0.5099	60	4.575	53	12	54	3.9849	0.2612	56
19	1.5756	0.4774	58	6.038	48	12	52	3.2452	0.2514	55
20	1.6405	0.3925	60	4	56	12	56	2.9737	0.2586	55

GSI değerini bulmak için Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır. Yapısal Özellik Puanı (SR) süreksizlik sıklığının bir ifadesi olup, hacimsel çatlak sayısına (J_v) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sönmez ve Ulusay, 2002). Süreksizlik Yüzey Puanı (SCR) ise, Beianiawski (1989) tarafından önerilen jeomekanik sınıflandırmada süreksizlik durumu için verilen yüzeyin pürüzlülük puanı, ayrışma puanı ve dolgu puanının toplanmasıyla bulunmuştur (Çizelge 5). m_i sabiti üç eksenli sıkışma deneyinde doğrusal yenilme zarfının eğiminin tersidir. Bu değer deneysel yöntemle tayin edilemediği zaman kaya türlerini esas alan bir çizelgeden de belirlenebilmekte olup, dasit için m_i değeri bu çizelgeden 25 olarak alınmıştır. İncelenen jeoteknik birimlerin Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre ölçülen dayanım parametreleri Çizelge 5'te verilmiştir

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada Gümüşhane- Trabzon karayolu Zigana geçidi yakınındaki (KB Türkiye) dasitik volkanitlerin yüzeylendiği kazı şevlerinde 20 jeoteknik birim tanımlanmıştır. Bu jeoteknik birimlerin RMR ve Q Sistemleri, Hoek-Brown ölçütü ve SSPC'ye dayanan farklı görgül bağıntılarla tek eksenli sıkışma dayanımı ve makaslama dayanımı parametreleri (ϕ_m ve c_m) tahmin edilmiş ve bu değerler birbiriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 2a ve b). Bu karşılaştırma yapılırken, σ_{cm1} ve σ_{cm2} arasındaki ortalama sapmanın (mutlak değer olarak farkların ortalamasının) σ_{cm1} ve σ_{cm2}'nin aritmetik ortalamasına oranı yüzde olarak bulunmuştur. Bu oran σ_{cm1} - σ_{cm2} karşılaştırması için %19 olarak hesaplanmıştır. Bu yöntem diğer karşılaştırmalar için de uygulanmıştır.



Şekil 2. RMR ve Q Sistemleri, Hoek-Brown ölçütü ve SSPC'ye dayanan görgül ilişkilerden tahmin edilen kaya kütlesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (a) ve makaslama dayanımı parametrelerinin (ϕ_m ve c_m) karşılaştırılması (b) ("a" da $_1$ ve $_2$ alt indisi RMR, $_{3,4}$ ve $_5$ alt indisi Q sistemi, $_6$ alt indisi Hoek-Brown ölçütü ve $_7$ alt indisi SSPC'iden elde edilen değeri, "b" de ise 1 alt indisi Q sistemi, $_2$ alt indisi Hoek-Brown ölçütü ve $_3$ alt indisi SSPC'den elde edilen değeri göstermektedir. "c" ve "d" de verilen kesikli çizgiler %90 güven aralığını göstermektedir)

Söz konusu oran σ_{cm1} - σ_{cm3} karşılaştırması için %61, σ_{cm3} - σ_{cm4} karşılaştırması için %23, σ_{cm3} - σ_{cm5} karşılaştırması için %19 ve σ_{cm4} - σ_{cm5} karşılaştırması için %18 olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda RMR ve Q Sistemlerinden bulunan değerlerinin birbirine yakın olmadığı görülmüştür. Ancak RMR'yi esas alan Sheorey (1997) ve Asef vd. (2000) tarafından verilen ilişkilerden (Eşitlik 1 ve 2) elde edilen σ_{cm1} ve σ_{cm2} arasındaki farkın önemli olmadığı, benzer şekilde Q sistemi ile (Eşitlik 3, 4 ve 5 ile) elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin (σ_{cm3}, σ_{cm4} ve σ_{cm5}) birbirine yakın olduğu görülmüştür (Şekil 2c). Hoek-Brown ölçütü ve SSPC'ye dayanan farklı görgül bağıntılarla bulunan σ_{cm} değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamakta olup, aralarında istatistiksel olarak geçerli bir ilişki de bulunamamıştır (Şekil 2a). İncelenen jeoteknik birimlerin, Q Sistemi, Hoek-Brown ölçütü ve SSPC'ye dayanan farklı görgül görgül ilişkilerden elde edilen kaya kütlesinin makaslama dayanımı parametreleri (ϕ_m ve c_m) birbiriyle kıyaslandığında Q Sistemi ile elde edilen değerlerin (ϕ_{m3} ve c_{m3}) diğerlerine göre çok yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 2b). SSPC ve Hoek-Brown ölçütü ile elde edilen kohezyon değerleri (c_{m1} ve c_{m2}) arasında anlamlı bir fark varken sürtünme açısı değerleri (ϕ_{m1} ve ϕ_{m2}) birbiriyle uyumludur (Şekil 2d). Ayrıca SSPC ve Hoek-Brown ölçütü ile elde edilen kohezyon değerleri arasına geçerli bir istatistiksel ilişki bulunamamıştır.

İncelenen jeoteknik birimlerin kaya kütlesi tek eksenli sıkışma dayanımıın Süreksizlik yüzey durumu ve blok boyutu ve GSI değerlerine bağlı olarak incelenmiş ve Çizelge 6'da verilen ilişkiler bulunmuştur. Bu ilişkilerde süreksizlik yüzey durumu (SC*) ilSI grafiğinde verilen en büyük süreksizlik yüzey puanının göre normalleştirilerek ifade edilmiştir. Bu normalleştirme için ölçülen süreksizlik yüzey durumu puanı en büyük süreksizlik yüzey durumu puanına (18'e) bölünmüştür

Çizelge 6. Farklı görgül ilişkilerden bulunan dayanım özelliklerinin Jeolojik Dayanım İndeksi, blok boyutu ve süreksizlik yüzey durumuna bağlı olarak değişimi

$\phi_{m2}=38.23e^{0.0087GSI}$	(r=0.921)	(17)	$\sigma_{m3}=0.883GSI-0.491$	(r=0.678)	(21)
$c_{m2}=0.0145e^{0.0672GSI}$	(r=0.969)	(18)	$\sigma_{m6}=0.0202GSI$	(r=0.935)	(22)
$\phi_{m3}=34.05e^{0.0092GSI}$	(r=0.723)	(19)	$\sigma_{m6}=0.835V_b-0.242SC^*+0.83$	(r=0.798)	(23)
$c_{m3}=0.0421GSI+0.298$	(r=0.639)	(20)	$\sigma_{m7}=0.01657e^{0.0895GSI}$	(r=0.9999)	(24)
(r: korelasyon katsayısı)			$\sigma_{m7}=0.888V_b+5.889SC^*-2.032$	(r=0.910)	(25)

Örnek sayısı ve korelasyon katsayısı değerleri birlikte değerlendirildiğinde Q sistemi ile elde edilen kayama dayanımı parametrelerinden yararlanılarak Mohr-Coloumb ölçütüne göre bulunan kaya kütlesi tek eksenli sıkışma dayanımı σ_{cm3}) GSI değeri kullanılarak güvenilirlikle tahmin edilebilmektedir (Eşitlik 21). Benzer durum Hoek-Brown ölçütü ve SSPC sistemi ile elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{cm6} ve σ_{cm7}) ve kayma dayanımı parametreleri (c_{m6}, ϕ_{m7} ve c_{m7}, ϕ_{m7}) içinde geçerlidir (Eşitlikler 17, 18, 19, 20, 22 ve 24). Ayrıca Hoek-Brown ölçütü ve SSPC sistemi ile elde edilen serbest basınç dayanımının (σ_{cm6} ve σ_{cm7}) blok boyutuna ve süreksizlik yüzey durumuna bağlı olarak tahmin edilebileceği görülmüştür (Eşitlikler 23 ve 25). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar farklı kaya türü ve alanlar için test edilmelidir.

4. KAYNAKLAR

Asef, M.R., Reddish, D.J, Lloyd, P.W., 2000 Rock-support interaction analysis based on numerical modeling. Geotechnical and Geological Engineering, 18, 23-37.

Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39, 185-216.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classification, John Wiley& Sons, New York.

Ceryan, N., 2005. Kaya kütle sınıflandırma sistemlerinin ve SSPC yönteminin bekçiler (Maçka,-Trabzon)-Torul (Gümüşhane) arasında seçilen kazı şevlerine uygulanışı. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Hack, R., Price, D., Rengers, N., 2003. A new approach to rock slope stability a probability classification (SSPC). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 62, 167-184.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T, Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, In: Bawden HRW, Curran J, Telsenicki M (eds) Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Society (NARMS-TAC 2002) Symposium, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, 267-273.

IAEG, 1995. The description and classification of weathered for engineering purposes (Geological Society Engineering Group Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1995(28), 207-242.

Sheory, P.R., 1997. Empirical Rock Failure Criterion. Oxford IBH Publishing Co. and A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Singh, B., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K,, Mehrotra, V.K., 1997. Rock mass strength parameters mobalized in tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 12(1), 47-54.

Sonmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilmleri, 26,77-99.

Ulusay, R., Sönmez, H., 2002. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası yayınları No:60, Ankara.

Gümüştaş Atık Baraj Yerindeki (KD Türkiye) Kaya Kütlelerinin Geçirimliliklerinin ve Taşıma Gücünün Değerlendirilmesi

Assessment of Permeability and Bearing Capacity of the Rock Masses at the Gümüştaş Waste Dam Site, NE Turkey

S. Alemdağ[1,*]

[1] *Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye (*selcukalemdag@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, kaya dolgu gövde olarak planlanan Gümüştaş atık barajının temel kayasını oluşturan andezit ve andezitik breş kaya kütleleri geçirimlilikleri ve taşıma gücü farklı ampirik eşitlikler ve sayısal analizler kullanılarak değerlendirilmiştir. Baraj gövdesi ve cevher atığından kaynaklanan, temeldeki toplam gerilme sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmiş ve kaya kütleleri için hesaplanan taşıma güçleriyle karşılaştırılmıştır. Baraj eksen yeri ve göl alanındaki kaya kütlelerinin geçirimliliği; açılmış olan sondaj kuyularında yapılan basınçlı su testi deneyleriyle (Lugeon deneyi) ve sonlu elemanlar yöntemi (sızıntı analizi) ile değerlendirilmiştir. Atık barajlarından yeraltısuyunasızacak kimyasallar insan sağlığı ve çevre açısından hayati önem taşıması dolayısıyla, baraj gövdesi memba şevi ve göl alanı jeomembran kullanılarak tamamen geçirimsiz hale getirilmeli ve andezitik breşlerin sıyırılıp baraj eksen yerinden kaldırılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık Barajı, Geçirimlilik, Lugeon Deneyi, Sızıntı Analizi, Taşıma Gücü

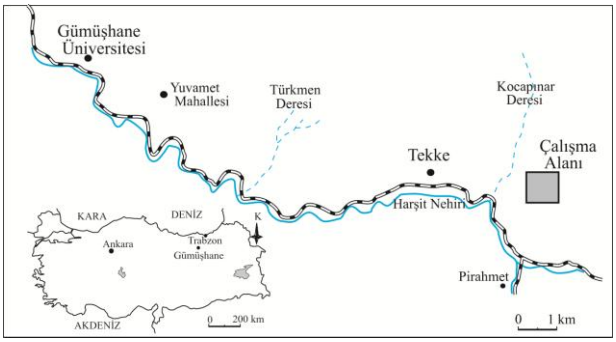
ABSTRACT: *In this study, the permeability and bearing capacity of andesite and andesitic breccia rock masses, forming the basement for Gümüştaş waste dam, planned as a rock fill housing, were evaluated using various empirical equations and numerical analysis. The total stress obtained through the body of dam and ore waste on the basement was determined by a finite element method and compared with bearing capacities calculated for the rock masses. The permeability of the rock masses at the dam site and the reservoir were appraised with pressure water test experiments (Lugeon test), performed within open bore holes and finite element method (seepage analysis). Since chemicals seeping from the waste dams into the groundwater are of vital importance for human health and the environment, the dam body, upstream slope and reservoir must be made completely impermeable using geomembrans.*

Keywords: *Bearing Capacity, Lugeon Test, Seepage Analyses, Permeability, Waste Dam*

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde yeraltı zenginliklerinin ekonomiye kazandırılması hususunda yapılan çalışmalar aynı zamanda hayati önem taşıyan çevresel problemleri de beraberinde getirmiştir. Çağın modern teknolojisine bağlı olarak gittikçe artan maden zenginleştirme atıkları önemli çevre problemlerinden birini oluşturmaktadır. Bu nedenle atıkların toplanması ve güvenli bir şekilde depolanması çevre sağlığı açısından hayati önem taşımaktadır.Bu çalışmada Gümüşhane ili Harmancık köyü sınırları içerisinde ve Gümüşhane-Erzurum karayolunun yaklaşık 16. km'sinde bulunan (Şekil 1) Gümüştaş Atık Barajının güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi amacıyla, temeli oluşturan kaya kütlelerinin taşıma gücü ve geçirimliliği ampirik ve sayısal yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Kaya kütlesinin taşıma gücü ve geçirimliliğini belirlemede çeşitli araştırmacılar (Barton et al. 1974; Hoek veBray, 1981;Bieniawski, 1989; Foyo et al. 2005; Coli et al. 2008; Ersoy et al. 2008;Alemdag et al. 2008; Melkoumian et al. 2009;Jiang et al. 2011; Gurocak and Alemdag, 2012)tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Gümüştaş Atık Baraj yerindeki andezitik breş ve andezitlerin taşıma gücünün belirlenmesinde, Hoek-Brown yenilme

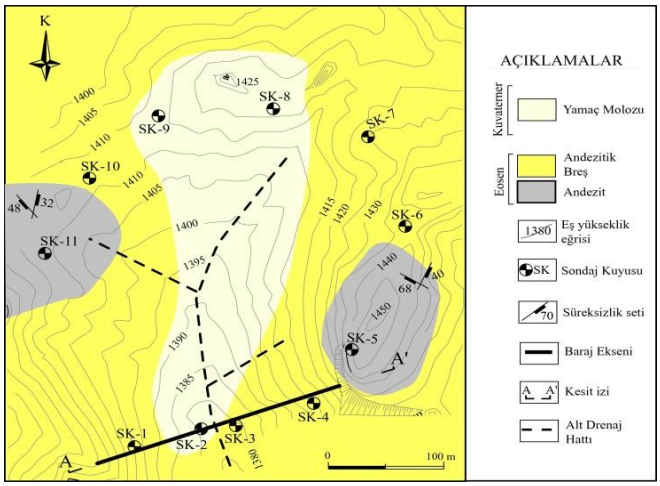
kriterinden (Hoek et al. 2002) elde edilen kaya kütle sabitleri (mb, s, a) kullanılarak Wyllie, (1992) ve Merifield et al., (2006) tarafından önerilen taşıma gücü eşitliklerinden faydalanılmıştır. Baraj eksen yerindeki gerilme dağılımı ise Phase^2 v6.0 (Rocscience, 2007) bilgisayar programı kullanılarak belirlenmiştir. Gümüştaş Atık Baraj yerindeki andezit ve andezitik breşlerin geçirimliliğinin belirlenmesinde, eksen yeri ve göl alanında açılan sondaj kuyularında yapılan basınçlı su testi deneyleri ve sonlu elemanlar sızma analiz yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1.Yerbulduru haritası

2. ARAZİ VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Gümüştaş atık barajı, Eosen yaşlı Alibaba Formasyonu'nun andezit ve andezitik breş üyesinin yüzlek verdiği alanda inşa edilecek olup (Şekil 2), barajın kret uzunluğu 200m, temelden yüksekliği 37m, ve memba yüzü jeomembranla kaplı kaya dolgu tipinde planlanmıştır. Gümüştaş atık barajı eksen yerindeki birimlerin jeoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışma, arazi ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. Arazi çalışmaları kapsamında andezitik breş ve andezit kaya kütlelerinin içerdiği süreksizliklerin mühendislik özellikleri ISRM (2007) tarafından önerilmiş tanımlama ölçütleri dikkate alınarak ve hat etüdü yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan hat etütleri ile elde edilen sonuçlar kantitatif GSI abağına göre (Sönmez ve Ulusay, 2002) değerlendirilmiş ve parametelere ait puanlar Çizelge 1de verilmiştir.



Şekil 2. İnceleme alanının mühendislik jeolojisi haritası

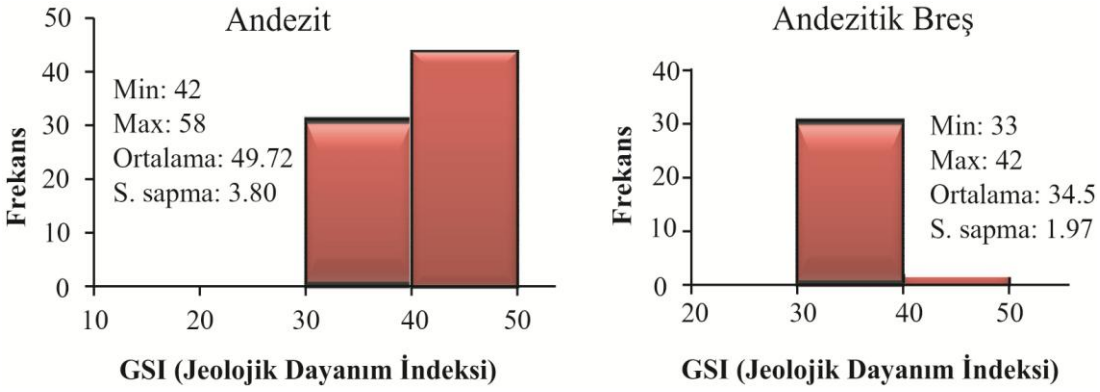
Çizelge 1.Andezit ve andezitik breşlerin içerdiği eklem özelliklerinin GSI abağına göre değerlendirilmesi

Eklem özellikleri	Tanımlama	Puan	
		Andezit	AndezitikBreş
Pürüzlülük (Rr)	Az pürüzlü	-	3
	Pürüzlü	5	-
Bozunmanın derecesi (Rw)	Orta derecede bozunmuş		3
	Az bozunmuş	5	-
Dolgu (Rf)	Kalsit dolgu(2-4 mm)	4	4
Süreksizlik yüzey koşulu puanı (SCR)		14	
		10	

Baraj eksen yerinin geçirimliliğini belirlemek için basınçlı su testlerinin yapılması ve laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere karot örneklerin alınması amacıyla, Gümüştaş Madencilik tarafından 11 adet karotlu jeoteknik sondaj kuyusu açılmıştır. Sondajlardan elde edilen karot örneklerinde yapılan RQD ölçümlerinden andezitik breşlerin zayıf-çok zayıf ve andezitlerin ise orta-iyikaya kalitesinde olduğu belirlenmiştir.Baraj eksen yerindeki birimlerin kaya kütle dayanımını belirlemek amacıyla GSI (Jeolojik Dayanım İndeksi) sınıflama sisteminden faydalanılmıştır. GSI değerini belirlemek için Sönmez and Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır. Bu sınıflamada kullanılan SCR (Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı) değerleri Çizelge 1'de verilmiş olup, SR (Yapısal Özellik Puanı) değerini belirlemek için kullanılan hacimsel eklem sayısı (J_v) Palmström (2005) tarafından önerilen Eşitlik 1kullanılarak kaya kütlesinin her metresi için J_v parametresi hesaplanmıştır.

$$J_v = 44 - \frac{RQD}{2.5} \quad (1)$$

Andezitik breş ve andezit kaya kütleleri için belirlenen GSI değerlerinin dağılımı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma alanındaki andezit ve andezitik breş kaya kütlelerine ait GSI değerlerinin frekans dağılımı

Kaya kütlesinin deformasyon modülü Hoekvd. (2002) tarafından önerilen aşağıdaki ampirik eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\,10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (GPa) \quad (2)$$

Eşitlikte;
σ_{ci}= Tek eksenli sıkışma dayanımı,

D = Örselenme faktörüdür.
Bu çalışmada, baraj eksen yerinde yapılan sıyırma kazısı mekanik olarak yapıldığından, örselenmenin fazla olacağı düşünülerek 0.7 olarak kabul edilmiştir.
Sızıntı analizlerinde kullanılan parametrelerden birisi olan kaya kütlesinin Poisson oranını belirlemek amacıyla eksen yerinde sismik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kaya kütlelerinin V_p ve V_s hızları belirlenmiş ve ASTM (2005) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak kaya kütlelerinin dinamik Poisson oranları hesaplanmıştır.

$$\nu = \left[0.5\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1 \right] / \left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

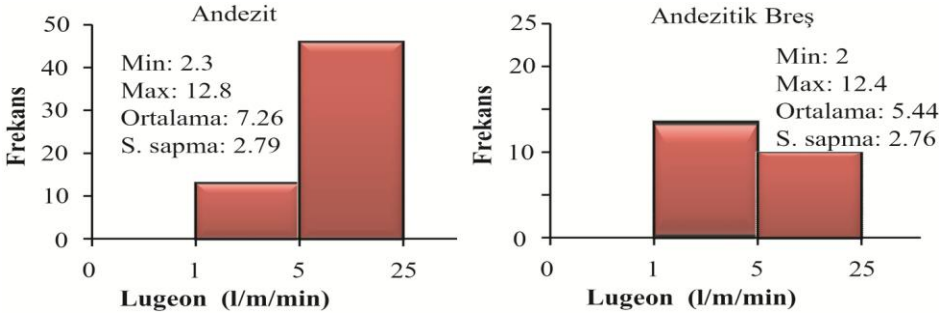
Eşitlikte;
ν = DinamikPoisson'soranı,
V_p= P dalga hızı (m/s),
V_s= S dalga hızı (m/s)'dır.

Eşitlik 3 kullanılarak yapılan hesaplamalarda andezitik breşlerin Poisson oranı 0.37, andezitlerin Poisson oranı ise 0.32 olarak belirlenmiştir. Baraj eksen yerindeki kaya kütlelerinin geçirimlilik özelliklerini belirlemek amacıyla, açılmış olan araştırma sondajlarında basınçlı su testleri yapılmış ve kaya kütlelerinin Lugeon (Lugeon, 1933) değerleri belirlenmiştir. Deney esnasında 10 atm basınca çıkılamadığı seviyelerdeki geçirimliliği hesaplamak için Nonveiller(1989) tarafından önerilen aşağıdaki Eşitlik4 kullanılmıştır.

$$\mathrm{LU} = \frac{Q*10}{P*L} \quad (4)$$

Burada;
LU = Lugeondeğeri (l/min/m),
Q = Kuyuya verilen su miktarı, (l/min),
L = Kademe boyu, (m),
P= Uygulanan gerçek basınç (kg/cm^2)'tır.

Hesaplanan Lugeon değerlerinin dağılımını gösteren Şekil 4'e göre, andezitik breşler az geçirimli, andezitler ise geçirimli özelliktedir.



Şekil 4.Baraj eksen yerindeki andezit ve andezitik breş kaya kütlelerine ait Lugeon değerlerinin frekans dağılımı

Gümüştaş atık baraj yerinde geçirimsizlik amacıyla kullanılacak kilin mühendislik özelliklerini belirlemek için üç adet örselenmiş numune alınmış olup, yapılan elek analizi ve kıvam limitleri deney sonuçlarına göre killerin yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu belirlenmiştir.Ayrıca, killerin sıkıştırılmış haldeki geçirimlilik katsayısını belirlemek amacıyla iki adet örselenmiş örnek üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deneyler optimum su içeriğinde ve Standart Proctor

enerjisinde sıkıştırılmış kil örnekleri üzerinde, ASTM D 5856 (2007) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kilin ortalama geçirimlilik katsayısı değeri $1.21*10^{-9}$ m/sn olarak belirlenmiştir.

3. TAŞIMA GÜCÜ

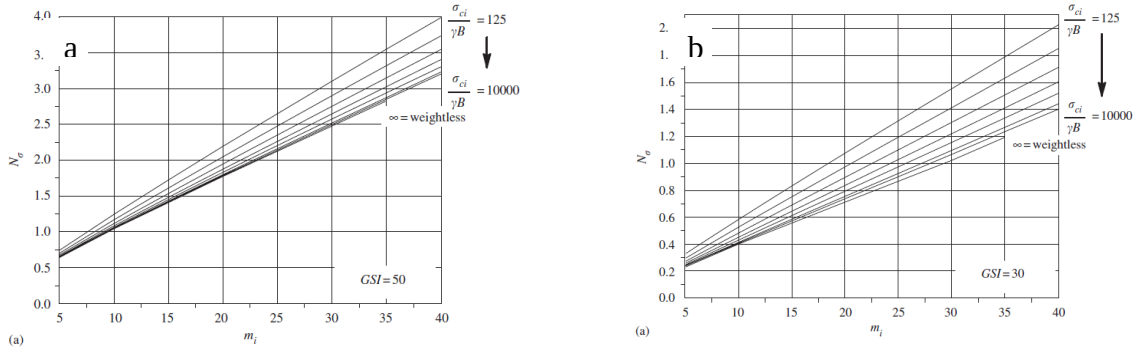
Bu çalışmada, Gümüştaş atık barajı eksen yerindeki andezit ve andezitik breşlerin taşıma gücü hesaplamalarında Wyllie (1992) ve Merifield et al. (2006)tarafından önerilen taşıma gücü eşitlikleri kullanılmıştır. Araştırmacılar kaya kütlesinin taşıma gücünü belirlemek için sırasıyla (Eşitlik 5-6) aşağıdaki formülleri önermişlerdir.

$$q_u = \frac{C_{f1} s^{0.5} \sigma_{ci} \left[1 + (m_b s^{-0.5} + 1)^{0.5} \right]}{F} \quad (5)$$

$$q_u = \sigma_{ci} N_\sigma \quad (6)$$

Bu eşitliklerde;
σ_{ci}:Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)
m_b, s, a :Hoek–Brown kaya kütlesi sabitleri
C_{f1}:Düzeltme faktörü (Şerit temel için 1 alınmıştır)
F :Güvenlik katsayısı (Bu çalışmada 3 tercih edilmiştir)
N_σ:Taşıma gücü faktörü;

N_σ değerini belirlemek için Şekil 5'teki abaklar kullanılmış olup, abaklarda andezit ve andezitik breşler için kullanılan parametreler ise en az, en çok ve ortalama olarak; GSI değeri 42-58 (49.72), σ_{ci} 81-115 (94.3), γ 26-27.8 (27.3), mi 25, B=1 alınmıştır (şerit temeller için). Andezitik breş için gerekli parametreler; GSI değeri 33-42 (34.5), σ_{ci} 50-66 (54.5), γ 25.1–25.6 (25.4), mi 19, B=1 Bu parametrelere göre Şekil 5'deki abaklar kullanılarak andezitler için (GSI=50)N_σ değeri 2.2 ve andezitik breşler için ise (GSI=30) N_σ değeri 0.7 olarak belirlenmiştir.

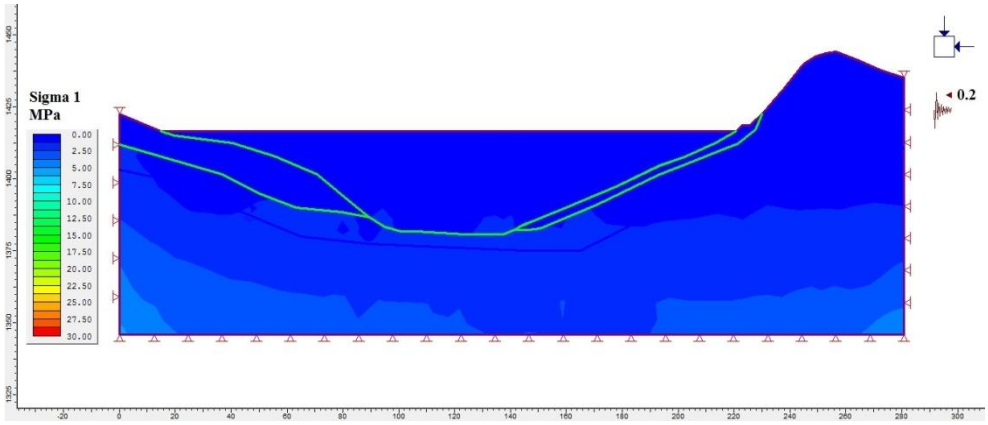


Şekil 5a,b.Taşıma gücü faktörünün($N_{\square}$ □ □ belirlendiği abaklar (a:Andezit, b: Andezitik Breş)

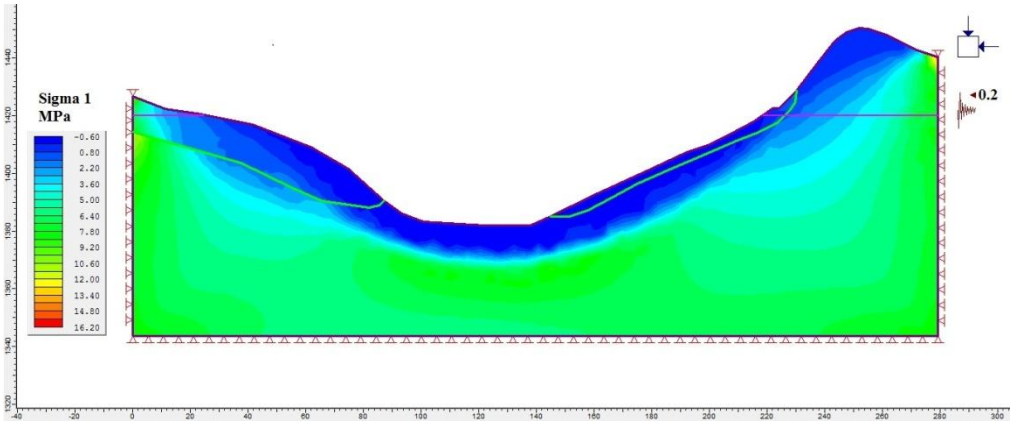
Yapılan hesaplamalara göre andezitin taşıma gücü 7.36 ile 207.47MPa, andezitik breşin taşıma gücü ise 1.52 ile 38.15 MPa arasında değişmektedir.

Baraj gibi büyük mühendislik yapılarında taşıma gücü en önemli parametrelerden biri olduğu için, bu çalışmada hem atık barajı gövdesinin, hem de göl alanında birikecek olan cevher atığının temel kayaya uygulayacağı gerilme hesaplanmıştır. Baraj temel kotunda oluşacak maksimum asal gerilmenin (σ_1) belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Phase^2 v6.0 (Rocscience, 2007) bilgisayar programı kullanılmıştır. Baraj eksen yerinde sağ ve sol yamaçta farklı kaya kütleleri yüzeyleme verdiği için kesit baraj eksenine paralel olarak alınmıştır. Böylece her iki kaya kütlesinde baraj gövdesi ve atıktan kaynaklanacak normal gerilmeleri belirlemek mümkün olmuştur. Gerilme analizinde bölgenin

depremselliği de dikkate alınarak yatay yer ivmesi 0.2g olarak alınmış (Saygılı, 2014) ve maksimum asal gerilme dağılımları belirlenmiştir (Şekil6, 7).



Şekil6.Baraj yerinde gövde dolgusundan kaynaklanan gerilme dağılımı



Şekil 7. Baraj yerinde cevher atığından kaynaklanan gerilme dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, sıyırma kazısı sınırında gövde dolgusunun oluşturacağı en yüksek gerilme değeri 2.50 MPa, göl alanında birikecek olan cevher atığının oluşturacağı en yüksek gerilme değerleri ise 0.8 MPa dır. Bu değerler, temel kotundaki toplam gerilmenin 3.3MPa olacağını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar kaya kütlelerinin taşıma güçleri ile karşılaştırıldığında, taşıma gücü açısından herhangi bir problem yaşanmayacağını söylemek mümkündür.

4. GEÇİRİMLİLİK

Baraj eksen yeri ve göl alanındaki kayaçların geçirimliliğini belirlemek için sondaj kuyularında yapılan basınçlı su testlerinden elde edilen su kayıpları değerlendirilerek Lugeon geçirimlilik değerleri

hesaplanmış (Şekil 8) olup, andezit ve andezitik breş kütlelerinin az geçirimli-geçirimli özellikte olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen aşağıdaki ampirik eşitlik yardımıyla kaya kütlelerinin geçirimliliği belirlenmiştir.

$$K = \frac{Q \ln(2mL/D)}{2\pi LH} \qquad (7)$$

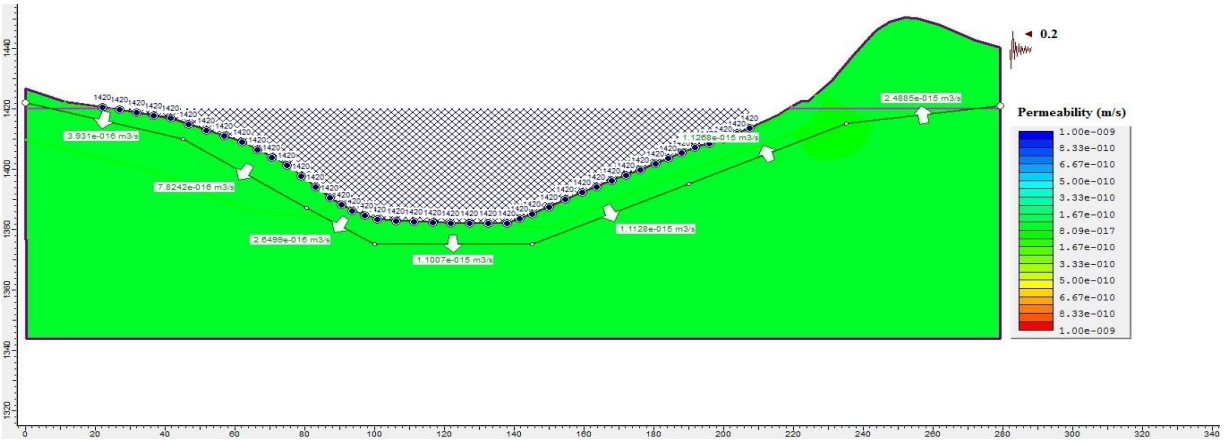
Burada; K geçirgenlik katsayısı (m/s), Q akış miktarı (m^3), L deney aralığı (m), Ddeney kuyusunun yarıçapı (m), H dinamik yük (m) ve m (10^6)

Eşitlik 7'ye göre andezit kaya kütlesinin ortalama geçirimliliği $2.99x10^{-5}$ m/s, andezitik breş kaya kütlesinin ise $1.69x10^{-6}$ m/s olarak hesaplanmıştır.

Lugeon geçirimlilik değerleri ve HoekveBray (1981) tarafından önerilen eşitlikten elde edilen değerler baraj yerindeki andezit ve andezitik breş kaya kütlelerinin az geçirimli-geçirimli olduğunu göstermektedir. Bu durum atık barajında birikecek olan ağır metal ve zenginleştirmede kullanılan çeşitli kimyasalların yeraltısuyuna karışmasına sebep olacaktır. Bu nedenle, baraj eksen yeri ve göl alanı doğal kil serilip sıkıştırılması ve/veya jeomembranuygulamaları ile tamamen geçirimsiz duruma getirilmelidir.

5. GEÇİRİMSİZLİK UYGULAMALARI VE SAYISAL ANALİZLER

Baraj eksen yeri ve göl alanındaki andezit ve andezitik breşlerin, yapılacak iyileştirmeler ile geçirimsiz hale getirilmesi gereklidir. Bu konuda yapılan en yaygın uygulama tipi geçirimli alana kil serilmesi ve sıkıştırılmasıdır. Memba şevi ve göl alanına geçirimsiz özellikte kil serilerek bir iyileştirme yönteminin uygulanması halinde, geçirimlilik probleminin ortadan kalkıpkalkmadığını kontrol etmek amacıyla sayısal analziler yapılmıştır. Sayısal analizlerde Phase^{2}v6.0 Sonlu Elemanlar Programı kullanılmıştır(Rocscience, 2007). Sonlu elemanlar yöntemi sızma analizine göre (Şekil 7), inceleme alanında yapılması planlanan Gümüştaş atık barajı tabanında gerçekleştirilen kil uygulamasından sonra baraj yeri ve göl alanındaki geçirgenlik değelerinin $1.67*10^{-10}$ m/s - 8.09*10-17 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Geçirimsizliği sağlamak amacıyla yapılan kil uygulaması sonucunda, baraj yeri ve göl alanı geçirimsiz hale gelmektedir.



Şekil7. Gümüştaş atık baraj yerinde uygulanan sızma analizi profili

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Gümüştaş atık barajı eksen yeri ve göl alanındaki kaya kütlelerinin taşıma gücü ve geçirimliliği, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler, ampirik eşitlikler ve sayısal analizlerle değerlendirilmiştir.

İnceleme alanındaki kaya kütlelerinin taşıma güçleri farklı araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Baraj yeri ve göl alanında hem baraj gövdesinden hem de göl alanında birikecek olan cevher atığından kaynaklanacak gerilmeler sayısal analizlerle belirlenmiştir.

Yapılan hesaplamalara göre andezitin taşıma gücü (q_u) 7.36-207.46MPa arasında değişirken, andezitik breşin taşıma gücü ise 1.52-38.15 MPa arasında değişmektedir. Sayısal analizler sonucunda, baraj gövdesinin ve göl alanına birikecek olan cevher atığının temel kayaya uygulayacağı en büyük asal gerilme değeri yaklaşık 3.3MPa olarak belirlenmiştir. Taşıma gücü değerleri ortaya çıkacak olan en büyük asal normal gerilme değeri ile karşılaştırıldığında, baraj eksen yerindeki andezitlerde taşıma

gücü açısından herhangi bir problemin oluşmayacağını söylemek mümkündür. Ancak andezitik breşlerin taşıma gücünün Wyllie'nin eşitliğine göre 1.52 MPa olması, bu kaya kütlesinin taşıma gücünün inşa edilecek kaya dolgu barajın temele uygulayacağı gerilme açısından uygun olmayacağını göstermektedir. Bu nedenle, sol yamaçta kalınlığı 2-3m arasında değişen andezitik breşler tamamen kaldırılmalı, sağ yamaçta yüzeye yakın seviyelerdeki ayrışmış ve parçalanmış andezitik breşler ise sıyırılıp alınmalıdır. (Paragraflar arasında boşluk bırakınız)

Baraj eksen yeri ve gölalanı için Lugeon değerleri ve ampirik hesaplamalarla yapılan değerlendirmelerde andezit ve andezitik breş kaya kütlelerinin az geçirimli-geçirimli özellikte olduğunu ve sızıntı problemlerinin olacağını göstermektedir. Atık barajları için hayati önem taşıyan bu mühendislik problemini gidermek için baraj yeri ve göl alanına geçirimsiz kil serilerek sıkıştırılması sonucunda baraj yeri ve göl alanındaki boşalım değerleri yapılan sızma analizleri ile belirlenmiştir. Sızma analizinden elde edilen boşalım değerleri $1.1*10^{-15}$ m^3/s - $7.8*10^{-16}$ m^3/s, geçirimlilik ise $1.67*10^{-10}$ m/s - $8.09*10^{-17}$ m/s aralığındadır. Bu sonuçların sıfıra çok yakın olması eksen yeri ve gölalanı için geçirimlilik probleminin ortadan kalkacağını göstermektedir. Ancak atık barajlarında olası sızmaların insan sağlığı ve çevre açısından olumsuzlukları hayati önem taşıdığı günümüzde, ek önlemlerin alınması gereklidir. Bu kapsamda baraj ekseni memba şevi ve göl alanında serilen 50cm lik kil üzerine sırasıyla jeosentetik kil membran, jeomembran ve drenaj jeokompozit gibi jeotekstiller kullanılarak inceleme alanı tamamen geçirimsiz hale getirilmelidir.

7. KATKI BELİRTME

Yazar, bu çalışmayı destekleyen, çalışma süresince bütün olanaklarından yararlandığı Gümüştaş Madencilik A.Ş. personelinden İ. Hakkı Çubukçu, Erdal Güldoğan, Uğur Ölgen ve Korhan Çubukçu'ya teşekkür eder.

8. KAYNAKLAR

Alemdag, S.,Gürocak, Z., Solanki, P., Zaman, M., 2008.Estimation of bearing capacity of basalts at Atasu Dam site, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,67, 79-85.

ASTM, 2005.Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. ASTM Publications.

ASTM D-5856, 2007.Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous materialusing a rigid-wall, compaction- mold permeameter. AnnualBook of ASTM Standards. American Society of Testing Materials, Easton, MD.

Barton, N. R.,Lien, R.,Lunde, J., 1974.Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. RockMechanics, 4, 189-239.

Bieniawski, Z.T., 1989.Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York.

Coli, N.,Pranzini, G., Alfi, A.,Boerio, V., 2008. Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnelin flows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis. Engineering Geology, 10, 174-184.

Ersoy, H, Bulut, F.,Ersoy, A. F.,Berkün, M., 2008.Municipal solid waste management and practices in coastalcities of theEastern Black Sea: a case study of Trabzon City, NE Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(3), 321-333.

Foyo, A.,Sanchez, M.A., Tomillo, C., 2005. A proposalfor a secondary permeability index obtained from water pressuretests in dam foundations. Engineering Geology, 77, 69-82.

Gürocak, Z., Alemdağ, S., 2012.Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,71, 221-229.

Hoek, E.,Bray, J.W., 1981.Rock Slope Engineering.Institute of Mining and Metallurgy, 3rd edition,Stephen Austin and Sons, London.

Hoek, E.,Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002.Hoek–Brown failure criterion-2002 edition. In: Proceedings of the 5th North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada, 1, 267-73.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, KozanOfset, 628 p.

Jiang, H.,Wang, X., Xie, Y.,2011.New strength criteria for rocks under polyaxial compression. Canadian Geotechical Journal, 48(8), 1233-1245.

Lugeon, M., 1933.Barrages et geologic methods de rechercheterrasement et un permeabilisation. Litrairedes Universite, Paris.

Melkoumian N, Priest, S.D., Hunt, S.P., 2009.Further development of the three-dimensional Hoek–Brown yield criterion. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42(6), 835–847.

Merifield, R.S.,Lyamin, A.V., Sloan, S.W., 2006. Limit analys issolutions for the bearing capacity of rockmasses using the generalized Hoek-Brown criterion. International Journal of Rock Mechanics and MiningScience, 43, 920-937.

Nonveiller, E., 1989.Grouting Theory and Practice. Elsevier, Amsterdam.

Palmstrom, A., 2005.Measurements of andcorrelations between block size and rock quality designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology,20(49), 362-377.

Rocscience,2007. Phase^{2}6.0finite element groundwater seepage. Geomech Software and Res. Rocsci Inc. Toronto.

Saygılı, R., 2014. Türkiye deprem bölgeleri haritası, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

Sönmez, H.,Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. Bulletin of Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University,26, 77-99.Wyllie, D.C., 1992.Foundations on Rock.Chapman and Hall, London

Doğal Yapı Malzemeleri ve Tarihi Yapılarda Mühendislik Jeolojisi

Garipçe Piroksenli Andezitinin Malzeme Özellikleri ve Doğal Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği

Investigation on Material Properties and Usability of Garipçe Pyroxene Andesiteas a Natural Building Stone

B. Akgür[1,*], Y. Mahmutoğlu[1]

[1] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul-Türkiye*
*(*berna_tjn@hotmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, İstanbul Boğazı'nın batı yakasında, Rumeli kavağı-Kilyos arasında geniş alanlarda görülen volkanik kayaçların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve doğal yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda Kuzey Marmara Otoyolu'nun Garipçe kesiminde açılacak otoyol yarmasının bulunduğu bölgede, yarmadan elde edilecek volkanik malzemenin kullanım olanakları da irdelenmiştir. Proje güzergâhını da içine alan geniş bir alanda araştırmalar sürdürülmüş ve araziden elde edilen örnekler laboratuvar ortamında deneye tabi tutulmuştur. Sonuçta otoyol kazılarından çıkacak malzeme miktarı ve nitelikleri ortaya konmuş, bölgedeki volkanik kayacın doğal yapı taşı olarak kullanım olanakları irdelenmiştir. Üç adet araştırma sondajından alınan karot örnekleri üzerinde laboratuvarda fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Aynı örnekler üzerinde P-dalga hızları da ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde bölgedeki andezitik kayaçların yapıtaşı standartlarında aranan özellikleri sağlamadığı görülmüştür. Deneylerde kullanılan örneklerin donma-çözülme işleminden olumsuz etkilenmesi ve basınç direncinin düşük olması nedenleriyle bölgeden elde edilecek taşın atmosferik etkilere açık dış mekanda kullanımın sakıncalı olacağı anlaşılmıştır. Ancak, araştırmaya konu piroksenli andezitin inceleme alanı ve civarındaki bazı tarihi yapılarda kullanıldığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Piroksenli Andezit, Doğal Yapı Taşı, Garipçe, Kuzey Marmara Otoyolu

ABSTRACT: *The main scope of this study is to investigate the material properties and usability of the volcanic rocks between Rumelikavağı and Kilyos at the western side of the Bosphorus. In this context, volcanic materials obtained from different depts of investigation boreholes on the route of the Northern Marmara Motorway around Garipçe were tested in laboratory. The field observations and surveys were carried out in a large area including the motorway alignment. The physical and mechanical tests were performed according to specification related with building materials. Ultra-sonic test also performed on the same specimens. The results of laboratory studies were compared with the properties of similar building materials used in Turkey and also standard values in related specifications. As a result of this study, it is concluded that the pyroxene andesite in the region do not provide the required properties of the natural building stone. It is influenced negatively by atmospheric agents, therefore it is not suitable for outdoor use. On the other hand, it was observed that andesitic rocks were used as a main building material on the walls of historical structures such as castles at the vicinity of investigated area.*

Keywords: *Pyroxene Andesite, Natural Building Stone, Garipçe, Northern Marmara Motorway*

1. GİRİŞ

Doğal yapı taşları insan hayatına binlerce yıl önce girmiştir. Önceleri barınma ihtiyacını gidermek için kullanılan doğal yapı taşları zamanla barınmanın dışında süsleme ve dekor işlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Dünyada bilinen ve etkileri günümüze kadar devam eden önemli uygarlıkların birikim ve kültürel kimlikleri doğal taş sayesinde yaşatılabilmiştir. Refah düzeyi yüksek toplumlar, estetik görünüm ve doğal çevreye uyum açısından, taş kullanımına yönelme eğilimindedir. Doğal yapı taşları,tarihi ve kültürel değer taşıyan cami, kilise, katedral, kale gibi önemli yapıların yenilenmesi amacıyla yaygın olarak kullanılır. Ayrıca,doğal taş büyük kent merkezlerinin halka açık umumi

yerlerinin düzenlenmesinde, rekreasyon alanlarında, yol ve kaldırım döşemesi, bordür taşı, duvar ve dayanma yapısı malzemesi, çatı örtüsü, kıyı tahkimatı malzemesi, dalgakıran ve baraj dolgusu, kırmataş üretimi gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.

Doğal yapı taşlarının renk, doku ve mineralojik bileşimlerine göre; estetik görünümlü, homojen yapılı, fiziksel, mekanik ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı, oyma ve süslemeler için aranan teknolojik özelliklere sahip olması istenir.Anadolu uygarlıkları bu tür tercihleri dikkate alarak farklı türden kayaçları yapı malzemesi olarak kullanmıştır.Özellikle kesilebilirlik, işlenebilirlik ve dekoratif özellikleri ile diğer bir çok taş türüne oranla homojen yapıda ve daha dayanıklı olmasından dolayı volkanik kayaçlar da yaygın olarak tercih edilmiştir(Erguvanlı vd., 1989; Mahmutoğlu vd., 2003).

Bu çalışma, İstanbul Boğazı'nın batı yakasında, Sarıyer ilçesi sınırları içinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).Rumeli kavağı-Kilyos arasında geniş alanlarda görülen volkanik kayaçların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği deneysel çalışmalara dayalı olarak araştırılmıştır.Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle doğal taş standartlarındaki veriler karşılaştırılmış ve inceleme alanında bulunan volkanik kayacın doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği irdelenmiştir. Deneysel çalışmalarda TS 10835 (1993), ISRM (2007) ve TS 699 'a (2009) standartları göz önünde tutulmuştur.

Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

İnceleme alanında bulunan volkanik kayacın malzeme özelliklerini belirlemek için Kuzey Marmara Otoyolu'nun Garipçe kesiminde açılacak yarma boyunca farklı noktalarda açılmış 3 adet araştırma sondajının 5-50 m leri arasından alınan toplam 45 karot örneği kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan örnekler Şekil 2 deki harita ve kesit üzerine işaretlenmiş sondajlardan alınmış, sondajların konum ve özellikleri ile numune alınan derinlikler Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2. Metot

İnceleme alanının tabanını oluşturan Garipçe piroksenli andezitinin doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliğini belirlemek için TS 699 (2009) ve ISRM 2007 de öngörülen fiziksel-mekanik deneyler yapılmıştır. Daha sonra, elde edilen sonuçlar TS EN1467 (2012), TS 10835 (1993) ve TS

EN1469 (2015) standartlarında belirtilen değerlerle karşılaştırılarak, Garipçe piroksenli andezitinin doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği irdelenmiştir. Kuzey Marmara Otoyolu'nun 3. Boğaz Köprüsünün Boğazın batı yakasındaki devamında derinliği 40 m ye ulaşan yarmanın bulunduğu alanda açılan araştırma sondajlarının farklı derinliklerinden alınan karot örnekleri üzerinde fiziksel, mekanik ve teknolojik deneyler yapılmış, elde edilen sonuçlar ülkemizde doğal yapı taşı olarak kullanılan aynı türdeki volkanik kayaçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1. Deney örneklerinin alındığı Kuzey Marmara Otoyolu güzergah araştırma sondajları.

Sondaj No	Koordinatlar		Arazi kotu (m)	Yeraltısu seviyesi (m)	Sondaj derinliği (m)	Örneklerin alındığı derinlik (m)
	x	y				
AVE-105	423998	4564551	113	2,30	35	5 - 20
AVE-106a	424098	4564499	118	7,20	50	30 - 50
AVE-109	424422	4564152	101	6,70	30	20 - 30

3. İNCELEME ALANININ JEOLOJİSİ

İnceleme alanı Üst Kretase yaşlı volkano-sedimentlerden oluşan Garipçe Formasyonu (Keskin vd., 2003) ve Oligosen-Miyosen yaşlı, gevşek kırıntılı çökeller ile temsil edilen Meşetepe Formasyonu'ndan oluşmaktadır (Şekil 2).

İnceleme alanında stratigrafik istifte en altta bulunan ve geniş yayılım gösteren Garipçe Formasyonu, başlıca volkanoklastik sedimentlerile lavlardan oluşur (Keskin vd., 2003).Volkano-sedimenter seviyeler blok-kül akıntıları, volkanik breş, akma breşi, hyaloklastitler, volkanojenik kumtaşı şeklinde görülür. Formasyon üste doğru Rumeli feneri civarında koyu gri, yeşilimsi gri masif lavlara geçer. Lavlar andezit ve bazaltik andezit bileşimli olup,Garipçe koyu ve Rumeli feneri Kalesi civarında en iyi yüzleklere sahiptir (Şekil 3a).

Garipçe Formasyonu'nun üzerine açısal uyumsuzlukla Meşetepe Formasyonu gelmektedir (Gedik vd., 2005).Geç Oligosen-Erken Miyosen yaşlı formasyon yaygın olarak sarı-sarımsı kahverenkli, gri renkli, ince-orta taneli kum, gri, koyu sarı renkli kumlu kil ile tutturulmamış, az tutturulmuş, sarımsı ve koyu kahverenkli çakıl-kum-kil ardalanmasından oluşur. Formasyon göl, akarsu ve yelpaze ortam çökelleri ile temsil edilir (Yavuz, 2008). Çalışma alanında Rumeli feneri'nin kuzeybatısında, Demirciköy'ün güneyinde ve Garipçe'nin kuzeybatısında gözlemlenmiştir.

Bu birimlerin üzerine uyumsuz olarak gelen alüvyonlar genellikle derelerin içinde silt, kil, çakıl ve kumlardan meydana gelen gevşek çökellere karşılık gelir.

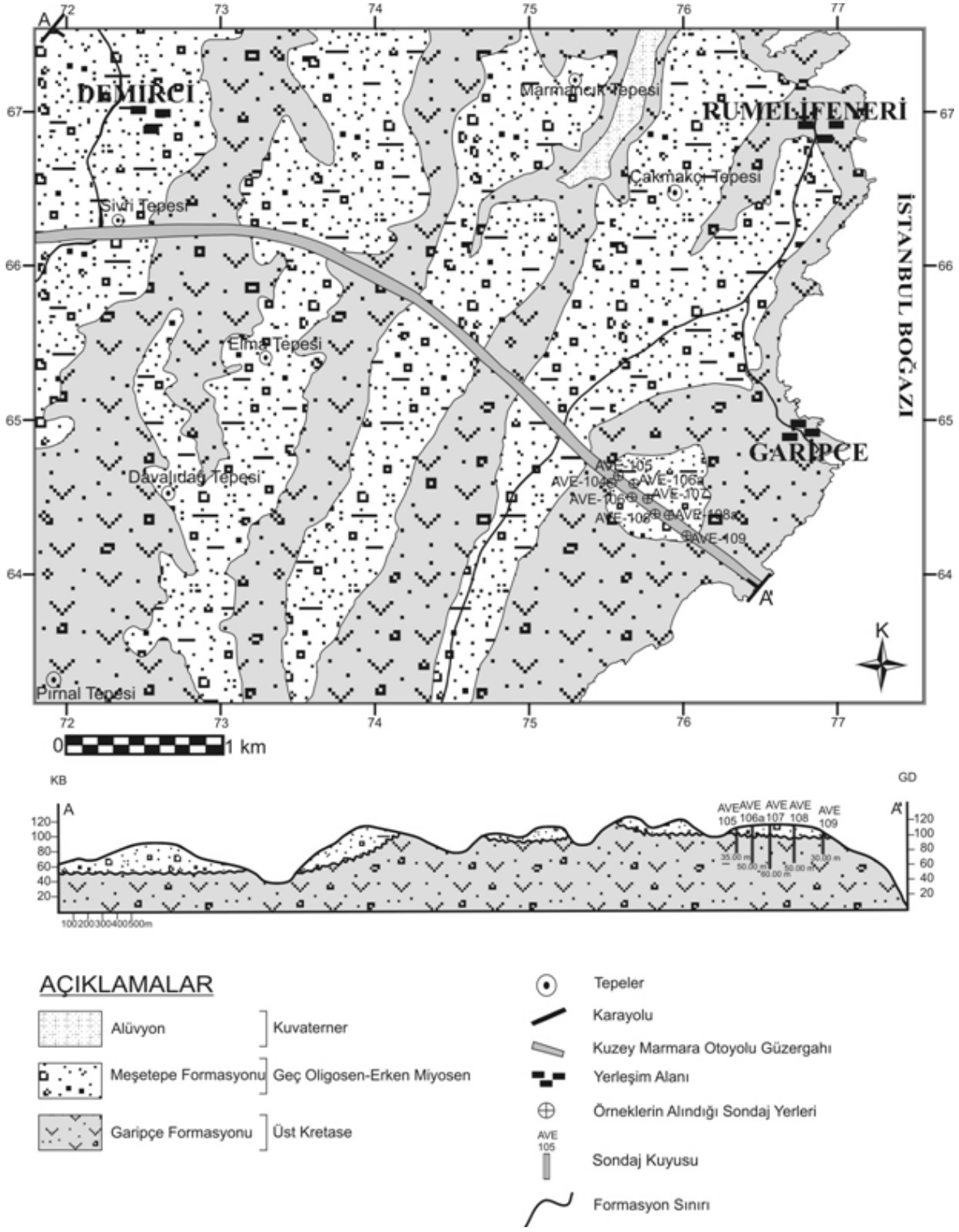
4. GARİPÇE PİROKSENLİANDEZİTİNİN YAPI TAŞI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

Doğal taşların kullanılacağı yere ve yapıya göre uygun olup olmadığı belirlenirken, öncelikle mineralojik bileşimlerinin, daha sonra fiziksel, mekanik ve teknolojik özelliklerinin ortaya konması istenmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralı bir şekilde sunulmuştur.

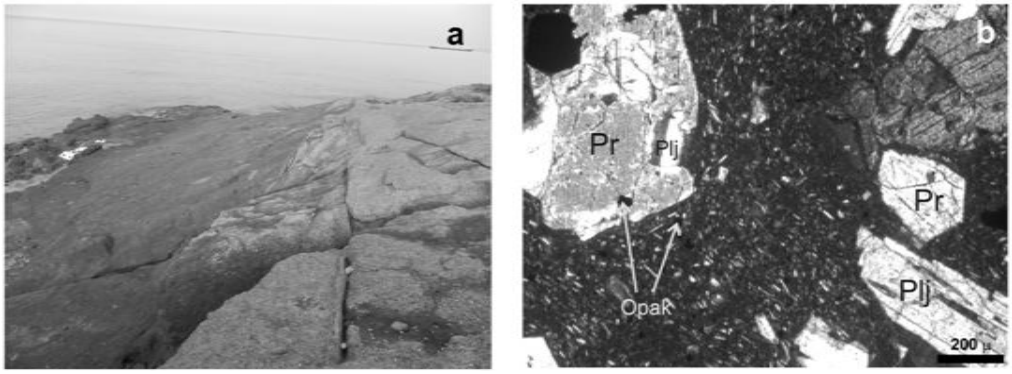
4.1. Mineralojik-Petrografik Özellikler

Arazinin farklı noktalarından ve Üçüncü Boğaz Köprüsü'nün boğazın batısında bağlandığı otoyol güzergahında açılan araştırma sondajlarından alınan deney örneklerin ince kesitleri incelenmiştir. İncelenen kesitlerde plajioklas mikrolitlerinden ve camdan oluşan bir hamur içinde dağılmış fenokristallerizlenmiştir. Bazı örneklerde mikrolitlerde akma izi gözlenmiştir. Kayaç, mikrolitik porfirik doku göstermektedir. Fenokristaller çoğunlukla plajioklas ve piroksenden oluşur (Şekil 3b).

Bazı kesitlerde opak mineraller ile amfibol minerali de görülmüştür. Plajioklaslar genellikle öz-yarı özşekilli, albit ve polisentetikikizli olup bazıları zonlu yapı göstermektedir. Piroksenler, matriks içinde dağılmış, öz-yarı özşekilli, iki yönde belirgin dilinime sahip, ayrışmış olup,fissürlü yapıdadır. Bazı piroksenlerde alterasyon sonucu opaklaşma gözlemlenmiştir. İncelenen kesitlerden hareketle deney örnekleri piroksenli andezit olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası.



Şekil 3. a)Garipçe Piroksenli Andezitinin inceleme alanının İstanbul Boğazı'na kıyı bölgesinde görülen yüzleği,b) polarizan mikroskop altındaki görünümü(Çapraz ışık × 10, Plj; plajioklas, Pr; piroksen).

4.2. Fiziksel Özellikler

Malzeme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneylerin tümünde araştırma sondajlarından alınan çapı 61 mm olan silindirik örnekler kullanılmıştır.TS 699'a uygun olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen fiziksel özelliklerin aritmetik ortalamaları ve TS standartlarında aranan değerler Çizelge 2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Buna göre, piroksenli andezitlerin ortalama birim hacim kütlesi (23,7 kN/m^3), TS 10835,TS EN 1469 ve TS EN 1467 sayılı standart değerlerinin altında kalmıştır. Ortalama kütlece su emmesi (% 4,60), TS 10835, TS EN 1467 ve TS EN 1469'a göre fazladır. Gözeneklilik derecesi (% 10,82), TS 10835 ve TS EN 1469standart değerlerine göre fazladır. Don sonrası ağırlık kaybı (% 2,16), TS EN 1467'ye göre standart değerini sağlarken, TS 10835'e göre sınır değerin üzerindedir.

Çizelge 2. Garipçe Piroksenli Andezitinin ortalama fiziksel özelliklerinin standartlarda aranan değerler ile karşılaştırılması.

Fiziksel özellikler	Garipçe Piroksenli Andeziti	TS 10835	TS EN 1467	TS EN 1469
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	23,7	> 26	> 26	> 26
Ağırlıkça su emme (%)	4,60	< 0,7	< 1,8	< 0,75
Don sonrası ağırlık kaybı (%)	2,16	< 1	< 5	-
Görünür gözeneklilik (%)	10,82	2	-	< 2

Piroksenli Andezit örnekleri ANON (1979)'a göre gözeneklilik derecesine göre orta boşluklu kaya sınıfına,kuru birim hacim ağırlığına göre ise orta kuru birim hacim ağırlığına sahip kayaç gurubuna girmektedir. Deney örnekleri üzerinde ultra-sonik hız ölçümü ayrıca yapılmış, elde edilenP dalgası hızına (Vp) göre araştırmaya konu Garipçe Piroksenli Andeziti'nin sınıflamadaki yeri Çizelge 3'tegösterilmiştir.

Çizelge 3.Garipçe Piroksenli Andeziti'ninP dalgası hızına göre yapılan sınıflamadaki yeri (ANON, 1979).

Sınıf	Vp (m/s)	Tanımlama	Garipçe Piroksenli Andeziti Vp (m/s)
1	< 2500	Çok düşük hız	
2	2500 - 3500	Düşük hız	
3	3500 - 4000	Orta hız	2585
4	4000 - 5000	Yüksek hız	
5	> 5000	Çok yüksek hız	

4.3. Mekanik Özellikler

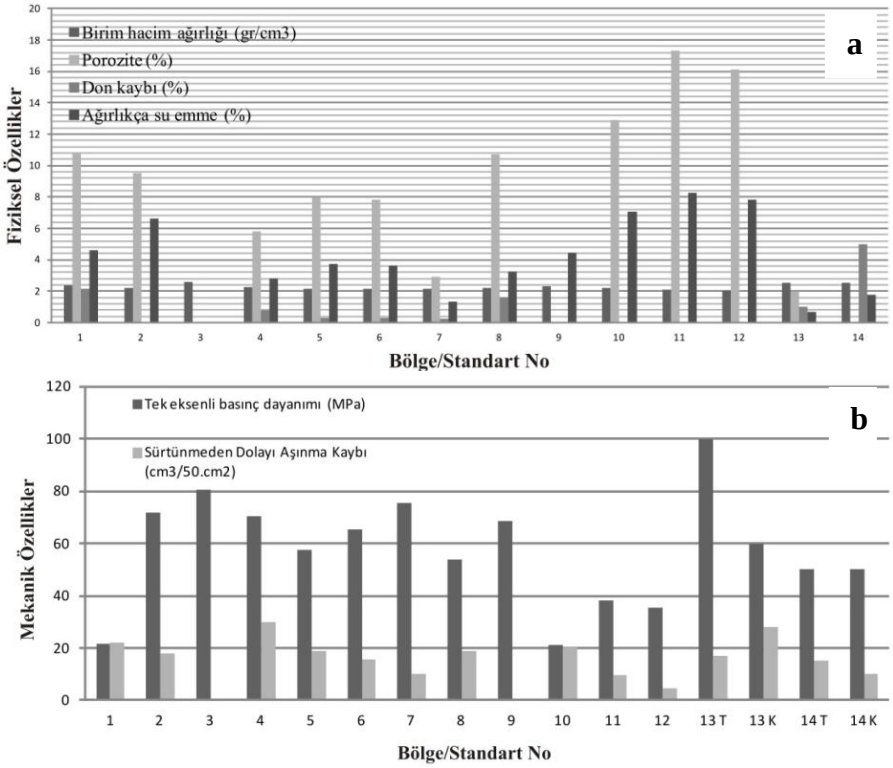
Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla ISRM (2007)'de öngörülen yöntemler kullanılarak tek eksenli basınç, sürtünmeden dolayı aşınma kaybı ve nokta yükleme deneyleri yapılmış ve standartlarda istenilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Piroksenli Andezit örneklerinin basınç dayanımları ortalaması 216 kg/cm^2 olarak bulunmuştur. Bu değer TS EN1467 (2012) ve TS 10835 (1993) sayılı standartlarda öngörülen değerin altında kalmıştır. Sürtünmeli aşınma deneyi silindir numuneler üzerinde yapılmış ve sürtünme alanı büyüklüğüne göre gerekli düzeltme yapılmıştır. Sürtünmeden dolayı aşınma kaybı ise 22,11 cm^3/50 cm^2 olarak belirlenmiştir.Bu değer TS 10835 kaplama taşı için öngörülen değeri sağlamaktadır.Garipçe Piroksenli Andeziti'nin tek eksenli basınç dayanımı değeri, Deere ve Miller "birleştirilmiş mühendislik sınıflamasına göre "çok düşük dayanımlı kayaç" grubuna girmektedir. Piroksenli andezitlerin en düşük tek eksenli basınç dayanımı değerine göre Erdoğan (1991) "TSE 2513'te Yapılması Önerilen Yapı Taşı Sınıflaması"na göre tek eksenli basınç dayanımına göre "çok hafif-hafif yapıtaşı" grubuna girmektedir. Birim hacim ağırlıklarına göre, "normal yapı taşları" sınıfında yer almaktadır. Bu özelliği ile taban döşemesinde kullanılamayacağı ancak iç cephe kaplamasına uygun olabileceği görülmektedir. Ayrıca, Garipçe Piroksenli Andeziti üzerinde nokta yükleme deneyleri uygulanmış, 10 örnek için elde edilen ortalama Is_{50} değeri 1,54 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer tek eksenli deney sonuçlarıyla uyumludur. Nokta yük direncine göre yapılan sınıflandırma göz önünde tutulduğunda(Bieniawski, 1975) Garipçe Piroksenli Andeziti düşük dayanımlı kaya sınıfına girmektedir.

4.4.Garipçe Piroksenli Andezitinin Türkiye'de İşletilen Diğer Volkanik Kayaçlarla Karşılaştırılması

Araştırma sonucunda Garipçe Piroksenli Andeziti için elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler Türkiye'nin farklı yörelerinde bulunan ve işletilen volkanik kayaçların özellikleri ile (Şimşek, 2003; Kuşçu vd., 2003; Koca vd., 2001; Çelik ve Kavas, 2001; Erguvanlı ve Ahunbay, 1989; Özçelik vd., 2003) Şekil 4'tekarşılaştırılmıştır. Fiziksel özellikleri açısından Garipçe Piroksenli Andeziti karşılaştırıldığı diğer volkanik kayaçlar ile benzerlik göstermektedir (Şekil 4a). Ancak, mekanik özellikleri dikkate alındığında, ülkemizde bilinen volkanik kayaçların hemen hemen tümünden daha zayıf olduğu anlaşılır (Şekil 4b). Bu şekillerde yatay eksende bölge/standart numarası olarak gösterilen rakamlar Çizelge 4' teki ilk sütuna karşılık gelir.

Çizelge 4.Garipçe Piroksenli Andeziti ve Türkiye'de işletilen diğer volkanik kayaçların özellikleri yapı taşı standartlarında aranan değerler.

Bölge/St. No	Bölge Adı		Birim Ağ. (g/cm^3)	Porozite (%)	Don Kaybı (%)	Su Emme (%)	Basınç Direnci (kg/cm^2)	Aşınma Kaybı (cm^3/50 cm^2)
1	Garipçe PiroksenliAndeziti		2,37	10,82	2,16	4,60	215,71	22,11
2	Gölbaşı-Ankara		2,24	9,51	0,04	6,64	716,00	18,10
3	Çubuk-Ankara		2,62	-	-	-	807,11	0,15
4	Elvanpaşa-Afyon		2,29	5,80	0,79	2,80	706,00	30,00
5	Ağın-Afyon (kırmızı)		2,15	8,02	0,31	3,73	572,70	19,00
6	Ağın-Afyon (pembe)		2,14	7,83	0,30	3,66	652,05	15,50
7	Ağın-Afyon (gri)		2,14	2,91	0,28	1,36	755,20	10,00
8	Korgun-Çankırı		2,23	10,70	1,59	3,23	535,96	18,76
9	Kurşunlu-Çankırı		2,31	-	-	4,45	687,49	-
10	Balya-Balıkesir		2,21	12,90	-	7,06	210,00	20,27
11	Şirinçavuş-Balıkesir		2,10	17,29	-	8,24	380,00	9,60
12	Karamürsel-Od Taşı		2,06	16,10	-	7,83	352,00	4,64
13T	*TS 10835*	*Taşıma*	*> 2,55*	*2*	*< 1*	*< 0,70*	*> 1000*	*< 17*
13K	*TS 10835*	*Kaplama*					*> 600*	*< 28*
14T	*TS EN 1467*	*Taşıma*	*> 2,55*	*-*	*< 5*	*< 1,80*	*> 500*	*< 15*
14K	*TS EN 1467*	*Kaplama*						*< 10*



Şekil 4. Garipçe Piroksenli Andeziti ve Türkiye'de işletilen diğer volkanik kayaçların özellikleri ile standartlarda aranan değerlerin karşılaştırılması.

Garipçe Piroksenli Andeziti karşılaştırma yapılan kayaçlar arasında en çok Balya volkanitleri ile benzerlik göstermektedir. İzmir-Bergama Cumhuriyet Meydanı'nda kullanılan Balya volkanitleri otobreşik andezit ve andezitik tüflerden oluşmaktadır. İzmir-Bergama Cumhuriyet Meydanı'ndaki açıkhava tiyatrosunun oturma yerleri için blok kesme taş, amfinin çevre düzenlenmesinde parke taşı ve de yan cephelerde kaplama taşı olarak pembe bu taş kullanılmıştır. Buradaki uygulamada kullanılan andezit malzemesi, zamanla hava koşullarından olumsuz etkilendiği bilinmektedir (Koca vd., 2001). Bu tespit Garipçe Piroksenli Andeziti'nin benzer şekilde dış mekanlarda kullanımının sakıncalı olabileceği anlamında değerlendirilebilir.

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında İstanbul Boğazı'nın batısında, Sarıyer ilçesinin kuzeyinde yer alan volkanik kayaçların malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve doğal yapı taşı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde bölgedeki andezitik kayaçların yapıtaşı standartlarında aranan özellikleri sağlamadığı görülmüştür. Bölgedeki volkanik kayacın atmosferik etkenlere karşı hassas olabileceği, bu nedenle de dış mekanlarda kullanımının sakıncalı olacağı belirlenmiştir. Ancak, inceleme alanı içerisindeki tarihi kalelerde yapı taşı olarak Garipçe Piroksenli Andeziti'nin kullanıldığı,bu kalelerin aslına uygun yenilenmesinde bölgeden seçilerek elde edilecek malzemenin kullanılabileceği önerilmiştir.

6. KAYNAKLAR

ANON. 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part I: rock and soil materials,Bulletin of the International Association of Engineering Geology,19, 364–371.

Bieniawski, Z.T., 1975. Thepoint-load test in geotechnical practice. Engineering Geology, 9, M.

Çelik, M.Y., Kavas, T., 2001. Elvanpaşa (Afyon) traki andezitlerinin jeolojisi ve yapı taşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması.

Deere, D.U.,Miller, R.D., 1966. Engineering classification and ındex properties for ıntact rock.Univ. Illions,Uech.Rept., Tr-65-116.

Erdoğan, M., 1991. Doğal yapıtaşı standartlarına ilişkin görüş ve öneriler.Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi, 6, 153-159.

Erguvanlı, K.,Ahunbay, Z.,1989. Mimar Sinan'ın İstanbul'daki eserlerinde kullandığı taşların mühendislik jeolojisi ve mimari özellikleri. Mühendislik Jeolojisi Bülteni, 111-112.

Gedik, İ., Duru, M., Pehlivan, Ş., Timur, E., 2005. Türkiye jeoloji haritaları İstanbul F22-c paftası. No: 11-13, MTA, Jeoloji Etüdleri Dairesi.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization testing and monitoring. Ankara, Turkey.

Keskin, M.,Ustaömer, T.,Yeniyol, M., 2003. İstanbul kuzeyinde yüzeylenen Üst Kretaseyaşlı volkano-sedimenter birimlerin stratigrafisi, petrolojisi ve tektonik ortamı. İstanbul'un Jeolojisi Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.

Koca, M.Y., Yavuz, A.B., Kıncal, C.,2001. Andezitlerin dış mekan kaplama taşı olarak kullanımında bergama örneği. Türkiye III. Mermer Sempozyumu,Afyon.

Kuşçu, M.,Yıldız, A., Bağcı, M.,2003. Investigation of Ağın andesite as a building stone(Iscehisar-Afyon, W-Turkey). Industrial Minerals and Building Stones, International Symposium, İstanbul.

Mahmutoğlu. Y.,Yüzer. E.,Suner. F., Eriş. İ., Eyüboğlu. R.,2003. Deterioration and conservation of the Dolmabahçe Palace (Istanbul) building stones.International Symposium of Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul.

Özçelik, Y., Bayram, F., Engin, İ.C., Eyüboğlu, A. S.,2003. Bir mermer ocağında doğal yapı taşı olarak kullanılabilecek bölgelerin belirlenmesi ve zon haritasının oluşturulması, Türkiye IV Mermer Sempozyumu.

Şimşek, O.,2003. Çankırı-Korgun yöresi pembe andezit taşlarının mühendislik özelliklerinin araştırılması.Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Ankara.

TS EN 10835. 1993. Andezit-yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan.Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.

TS EN 699. 2009. Doğal yapı taşları–inceleme ve laboratuvar deney yöntemleri.Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.

TSEN 1467. 2012. Doğal taşlar – ham bloklar – özellikler. Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.

TS EN1469. 2015. Doğal taş mamulleri - kaplamada kullanılan plakalar – özellikler. Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.

Yavuz, O., 2008. İstanbul kuzeyi volkanitlerinin jeolojik ve petrolojik incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1. http://www.envanter.gov.tr/anit/index/detay/40648.

İzmir Karaburun Yarımadası'ndaki Mesozoyik Karbonat Kayalarının Beton Agregası ve Yapı Taşı Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of the Concrete Aggregates and Dimension Stone Properties of the Mesozoic Carbonate Rocks in the İzmir Karaburun Peninsula

H. Elçi[1,*], N. Türk[2], İ. İşintek[2]

[1] *Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı, Torbalı, İzmir*
[2] *Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir*
*(*hakan.elci@deu.edu.tr)*

ÖZ: Kireçtaşları ve dolomitler, Türkiye'nin batısındaki Karaburun Yarımadası'nda büyük rezerve sahiptir. Bu kayaçlardan günümüzde sadece blok taş üretimi yapılmaktadır. Halen İzmir'in agrega ihtiyacını karşılayan mevcut agrega ocaklarının yerleşim alanlarına oldukça yakın olması ve beraberinde getirdiği çevresel sorunlar nedeniyle yakın gelecekte bu ocakların kapatılması durumunda Karaburun Yarımadası karbonat kayaları, İzmir'in agrega ihtiyacını sağlayacak potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, Mesozoyik yaşlı Karaburun karbonat kayalarının petrografik, kimyasal ve agrega özellikleri araştırılmıştır. Jeolojik özellikleri belirlenen agregalar kullanılarak üretilen betonların taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının normal beton üretimi için uygun agrega kaynağı olma özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Ancak bu kayalar, kalınlıkları sınırlı olmakla beraber, alkali silis reaksiyonu yönünden reaktif olabilen kuvars içerikli karbonat seviyeler de içermektedirler. Ayrıca, karbonat seviyelerinden alınan bloklardan hazırlanan örnekler üzerinde fiziko-mekanik testler gerçekleştirilerek Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının doğal yapı taşı kalitesi de değerlendirilmiştir. Karaburun Yarımadası taze kireçtaşlarının ve dolomitlerinin oldukça düşük gözenekli (<%1), aşınmaya karşı dirençli ve yüksek dayanımlı olmaları nedeniyle, yapı taşı olarak kullanılmaya uygun oldukları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karaburun Karbonat Kayaları, Kireçtaşı, Dolomit, Agrega, Beton

ABSTRACT: *Limestone and dolomites located in Karaburun Peninsula in western Turkey have large reserves. There are only block stone (dimension stone) is produced from these rocks up to know. The presently aggregate supplying quarries to Izmir are expected to face to close down due to their closeness to the residential areas and environmental problems they cause. In a such situation, carbonate rocks of Karaburun Peninsula have the potential to encounter the aggregate needs of Izmir. In this study, initially, petrographic, chemical and aggregate properties of Mesozoic aged Karaburun carbonate rocks were investigated. Properties of fresh and hardened concrete produced by using these aggregates were investigated. The results showed that Karaburun Peninsula carbonate rocks have suitable properties as a source of aggregates for production of normal concrete. However, they have limited thickness and include quartz containing carbonate levels prone to in alkali-silica reactions. Additionally, the natural building stone quality of the Karaburun Peninsula carbonate rocks were assessed by performing physico-mechanical tests on blocks that were obtained from different carbonate levels. Results show that Karaburun Peninsula fresh limestone and dolomite rocks found to are suitable for use as a natural building stones with their very low porosities (<1%), high abrasion resistant and high strength properties.*

Keyword: *Karaburun Carbonate Rocks, Limestone, Dolomite, Aggregate, Concrete*

1.GİRİŞ

Karaburun, Türkiye'nin batısında ve oldukça kalın bir karbonat istifin yer aldığı bir yarımadadır. Bu özelliğiyle bu yöre, doğal taş işletmecilerinin dikkatini çekmiş ve yörede son 15-20 yılda çok sayıda (11 adet) blok taş üretimi amacıyla ocak açılmıştır. Günümüzde halen bu ocaklardan 6 tanesinde blok taş üretimi yapılmakta olup, diğerleri ise üretim verimliliği nedeniyle terk edilmiş durumdadır. Bu çalışmada Karaburun karbonat kayalarının doğal yapı taşı ve beton agregası kalitesi onların sahip

oldukları fiziko-mekanik ve durabilite özelliklerinin yanı sıra, bileşim ve doku açısından homojenlikleri de belirlenerek ortaya konulmuştur. Böylelikle İzmir şehrinin agrega ihtiyacını karşılayan mevcut agrega ocaklarının kapatılması durumunda Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının, İzmir'in agrega ihtiyacını sağlayacak alternatif sahalar olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir.

2. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Araştırma iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada Karaburun Yarımadası karbonat kayaları içerisinde açılmış (Şekil 1) blok taş ocaklarında karbonat kayalarının tabaka eğimine dik olacak şekilde ortalama her 1,5 m'de bir petrografik ve kimyasal analizler için örnekleme yapılmıştır. Petrografik analizlilerle karbonat kayaların mineral içeriği, mineral yüzdesi ve dokusal özellikleri, kimyasal analizlerle de ana element oksit yüzdeleri belirlenmiştir. Ayrıca, Dunham (1962) sınıflamasına göre dokusal özellikler dikkate alınarak bu karbonat kayalarının fasiyes adlandırması da yapılmıştır. Karbonat kayalarının, içerdikleri karbonat minerallerinin yüzdesine göre mineral homojenliği (Kalsit + dolomit > % 97 = Homojen, Kalsit + dolomit < % 97 = Heterojen) ve karbonat olmayan bileşenlerin yüzdelerine göre de kimyasal homojenliği (=%Saflık=100- [% $Si0_2$ + % (Al, $Fe)_2O_3$]) belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, karbonat kayalarının agrega özelliklerini, beton kalitesini ve yapı taşı kalitesini belirleyebilmek için, fasiyes özellikleri dikkate alınarak, blok taş ocaklarından yaklaşık 30x30x15 cm boyutlarında blok örnekler alınmıştır. Bu örneklerden hem TS 699'da (TSE, 2009a) yer alan doğal yapı taşı testleri için, hem de TS 706 EN 12620+A1'de (TSE 2009b) yer alan agrega testleri için agrega numuneleri hazırlanmış, bunların fiziko-mekanik ve durabilite özellikleri belirlenmiştir.

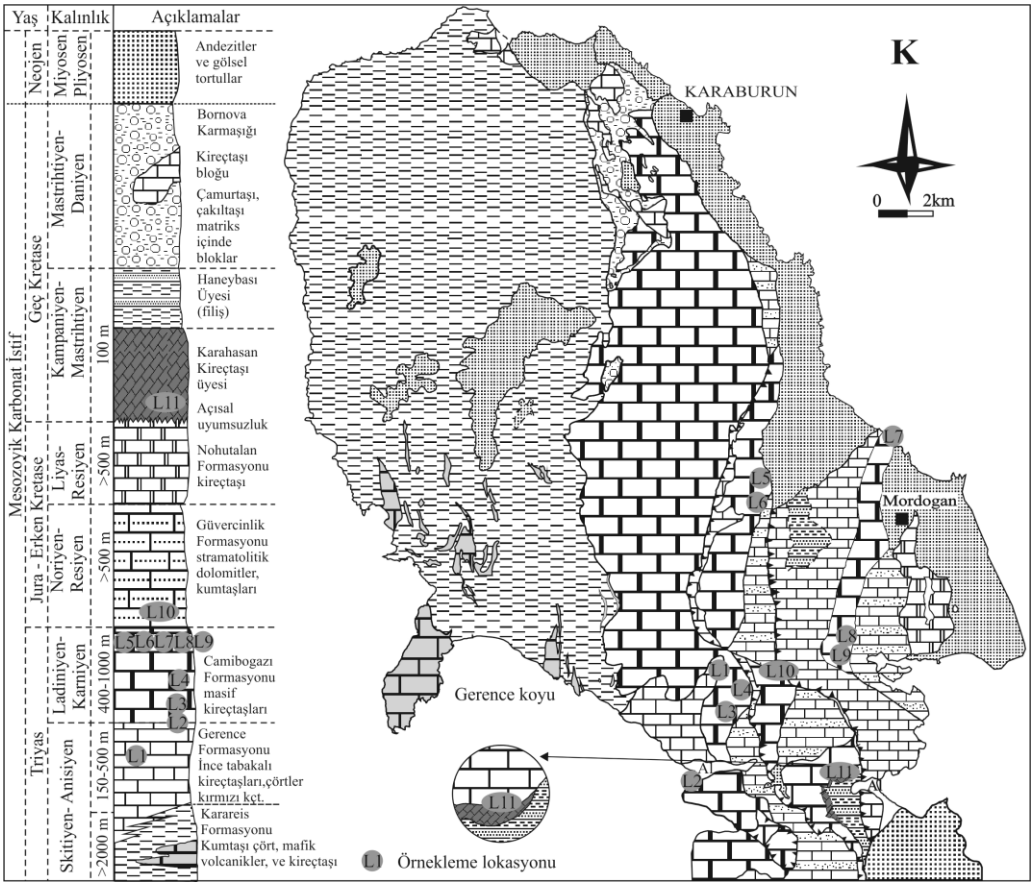
3. KARABURUN YARIMADASI'NIN JEOLOJİSİ

Çalışma alanı, İzmir-Ankara Zonu içindeki (Okay ve Tüysüz, 1999) (Şekil 1) Bornova Filiş Zon'unun (Okay ve Siyako, 1993; Okay vd., 1996) güneybatı ucunda yer alan tektonik bir kuşaktır. Karaburun Yarımadası Mesozoyik karbonatları, Erken Trias'tan Geç Kretase'ye kadar kalın bir istif sunarlar. İstif alttan üste doğru; Skitiyen-Anisiyen yaşlı Gerence Formasyonu, Anisiyen –Karniyen yaşlı Camiboğazı Formasyonu, Noriyen-Resiyen yaşlı Güvercinlik Formasyonu, Lias-Erken Kretase yaşlı Nohutalan ve Kampaniyen-Mastrihtiyen yaşlı Balıklıova Formasyonu şeklinde sıralanır (Erdoğan vd., 1990). İstifin en üst bölümünde yer alan Balıklıova Formasyonu, Karahasan Kireçtaşı ve Haneybaşı Üyesi'nden oluşur (Güngör, 1989; Erdoğan vd., 1990; İşintek, 2002). Karaburun Yarımadası'nın 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası, Mesozoyik karbonat istifi ve örnekleme lokasyonları Şekil 2'de verilmiştir.

4. KARBONAT KAYALARININ PETROGRAFİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Karaburun Yarımadası Mesozoyik yaşlı karbonat kayaları içinde açılan taş ocaklarında, 11 lokasyonda, toplam 628 m uzunlukta bir hat boyunca örnekleme yapılmıştır. Yapılan petrografik analiz çalışmaları ile bu örneklenen hat boyunca kayaçlar kireçtaşı (Kçt, 551 m), dolomitik kireçtaşı (Dkçt, 28 m), dolomit (19 m) ve çakıltaşı (Çkt, 30 m) olarak tanımlanmıştır. Kireçtaşlarının Dunham (1962) doku ağırlık sınıflaması kullanılarak yapılan fasiyes adlamasında; vaketaşı (99.6 m) istiftaşı (128,8 m) ve tanetaşı (192,6 m) oldukça yüksek kalınlıklara sahip iken, yüzertaş (6 m), Kabataş (12,8 m), çatıtaşı (31,8 m), bağlamtaşı (61,4 m), çamurtaşı (18,8 m) dolomit ve dolomitik kireçtaşı fasiyesleri daha az kalınlıkta ve ardalanmalıdır (Şekil 2). Şelf lagünü, gel-git ortamı ve resif ortamlarına ait tanetaşı, istiftaşı (kısmen), yüzertaş, kabataş, çatıtaşı ve bağlamtaşı fasiyesleri homojen özellik (kalsit + dolomit > % 97) gösterirken, yokuş önü ve derin deniz kenarı ortamlarına ait istiftaşı, vaketaşı fasiyesi daha çok heterojen (karbonat olmayan mineraller > % 3) bir özelliğe sahiptir (Çizelge 1). Karaburun Yarımadası karbonat kayaları örnekleme lokasyonlarının çökelme ortamlarıyla olan genelleştirilmiş ilişkisi Şekil 1'de sunulmuştur. Petrografik analizlerde; karbonat olmayan tane ve mineraller; mikrokristalin kuvars tane, mega-kuvars, kaya kırıntısı, çört, silisli sünger sipikülleri ve çok az miktarda kil olarak tanımlanmıştır. Çizelge 1'de Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının ana oksit yüzdeleri ve bu yüzdeler kullanılarak hesaplanan karbonat kayalarının saflık dereceleri

(kimyasal homojenliği) verilmiştir Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının ana oksit yüzdelerine göre yapılan sınıflama da büyük oranda "kireçtaşı", "dolomitik kireçtaşı" sınıfında yer alır. Bununla beraber kireçtaşlarının saflıklarını bozan ve çoğunlukla silis miktarına bağlı olarak lokasyon L1-5 "karbonat olmayan" ve lokasyon L11-5 ise "saf olmayan kireçtaşı" sınıfında yer alır (Şekil 3).

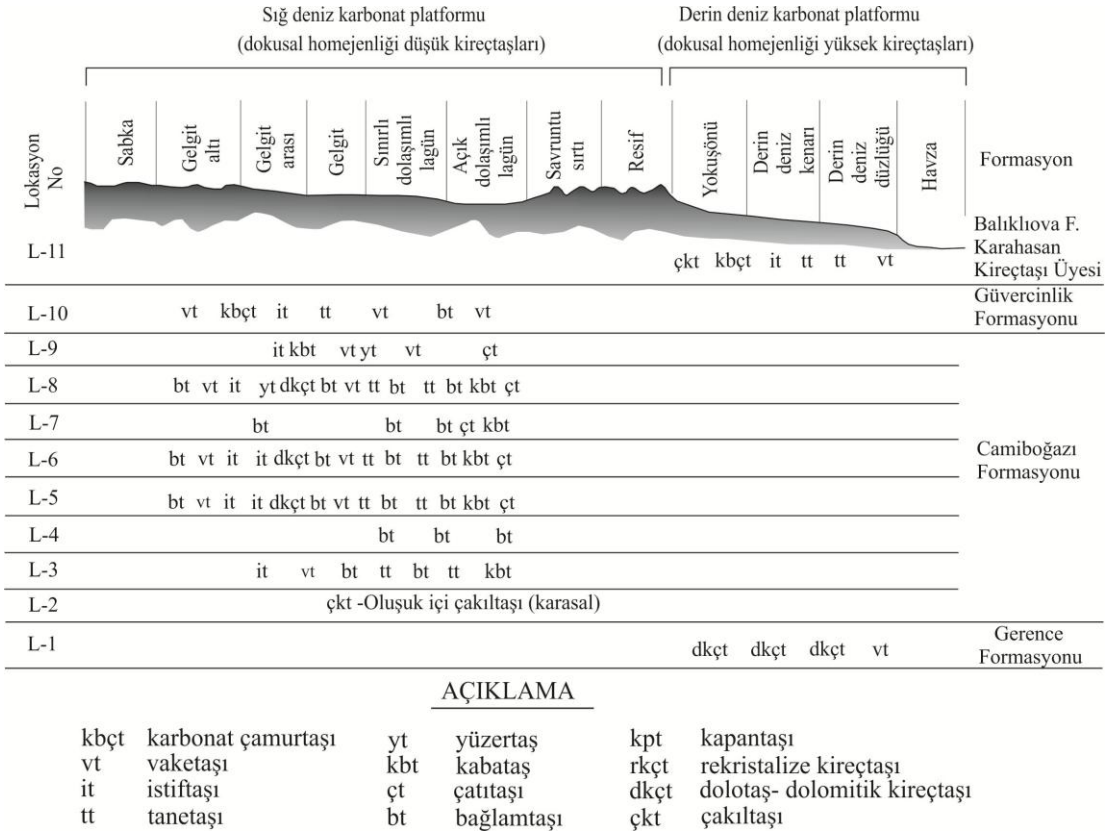


Şekil 1. Karaburun Yarımadası'nın jeoloji haritası, Mesozoyik karbonat istifi (Erdoğan vd., 1990) ve örnekleme lokasyonları.

5. KARBONAT KAYALARININ AGREGA VE BETON ÖZELLİKLERİ

Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının tane yoğunluğu (ρ) içerdikleri dolomit minerali miktarına göre 2,74 Mg/m^3'e kadar artmakta, kuvars minerali miktarına bağlı olarak da 2.67 Mg/m^3'e kadar azalmaktadır. Tane yoğunluğu intraformasyonel çakıltaşı (Çizelge 2, L2-1) ve taban çakıltaşı fasiyeslerine (Çizelge 2, L11-1) ait agregalarda, karbonat kayası agregalarına kıyasla daha düşüktür. Agregaların su emme (WA) değeri, fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyerek (Gillott, 1980; Smith ve Collis, 2001), betonun dayanımını azalttığından (Tuğrul ve Yılmaz, 2012), bu değerin %1.5'tan küçük olması tercih edilir. Karaburun Yarımadası karbonat kayaları ve çakıltaşı agregalarının su emme değeri % 0.14 – 1.20 arasındadır. Uzun (SI) ve yassı (FI) taneli agregalar, betonu aktarmada pompalama güçlüğü oluşturmalarının yanı sıra, kötü paketlenmek suretiyle betonun basınç dayanımını ve yığınsal ağırlığını düşürdüğünden (Rollings ve Rollings, 1995; Bell, 2006), agrega tanelerinin kübik olması istenir. Karaburun Yarımadası karbonat kayaları kırıldıkları zaman köşeli parçalar vermişlerdir. Dolomit ve dolomitik kireçtaşları kırıldıklarında, kireçtaşlarına kıyasla daha yassı taneler verme eğilimi göstermişlerdir. Gerek metilen mavisi (MB) değerleri, gerekse de kum eşdeğerleri (SE) Yarımada'da ki karbonatların ince madde miktarının oldukça düşük olduğuna işaret eder. Karaburun Yarımadası karbonat kayaları sahip oldukları düşük su emme özelliği nedeniyle donma çözülme (F) ve magnezyum sülfat (MS) deneylerinden etkilenmemiş, durabilitesi yüksek kayaçlardır.

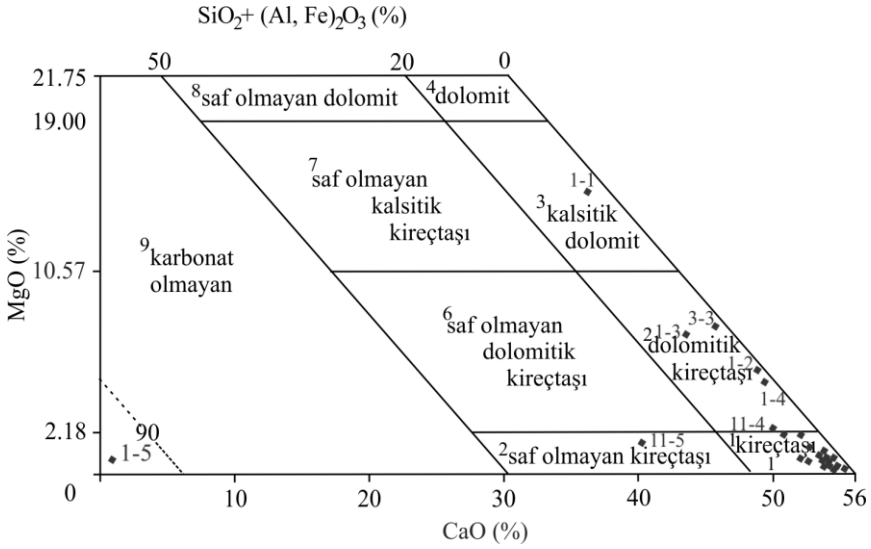
Bu değer çakıltaşlarında, çakıltaşlarının sahip oldukları dokuları ve zayıf özellikte ara madde içermesinden dolayı % 21'e kadar artar. Kireçtaşı agregalarının Los Angeles parçalanma değeri (LA) % 20'nin altındadır. Mikro deval aşınma değeri (M_{DE}) ise % 15'ten küçüktür. Bu değerler, Karaburun kireçtaşlarının aşınmaya karşı dirençli ve beton agregası olması için uygun özellikte olduğunun göstergesidir. Mikro deval aşınma değeri taban konglomerasında % 21'dir (Çizelge 2).



Şekil 2. Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının örnekleme lokasyonlarındaki çökelme ortamları.

Agregalarda bulunan sülfatlar, betonda şişmeye bağlı hasarlara, klorür ise betonda kullanılan donatının korozyonuna neden olabildiğinden, TS 706 EN 12620+A1 (TSE, 2009a) tarafından agregaların sülfat ve klorür miktarları sınırlandırılmıştır. Karaburun karbonat kökenli agregalarında suda çözülebilen sülfat (SS) miktarı 7-200 ppm, asitte çözülebilen sülfat (AS) miktarı ise 53-1465 ppm arasındadır. Suda çözülebilen klorür (SC) miktarı 29-176 ppm, asitte çözülebilen klorür (AC) miktarı ise 58-305 ppm arasındadır. Bu değerler TS 706 EN 12620+A1'de (TSE, 2009a) verilen sınır değerlerden oldukça düşüktür (Çizelge 2).

Karbonat kayalarının farklı fasiyeslerinden hazırlanan agregaların beton özelliklerini araştırmak amacıyla laboratuvarda 15 seriden oluşan deneme betonları üretilmiştir. Fasiyes farklılığının (agrega türünün) beton özelliklerine etkisini görebilmek amacıyla agrega karışım oranı ve tane çapı TS 706 EN 12620+A1 (TSE, 2009a)'de belirtilen ideal karışım olacak şekilde hazırlanmış, karışımda doğal kum yerine her agrega türüne ait kırma kum kullanılmıştır.



Şekil 3. Kireçtaşlarının saflıklarına göre sınıflaması (Elçi vd., 2014).

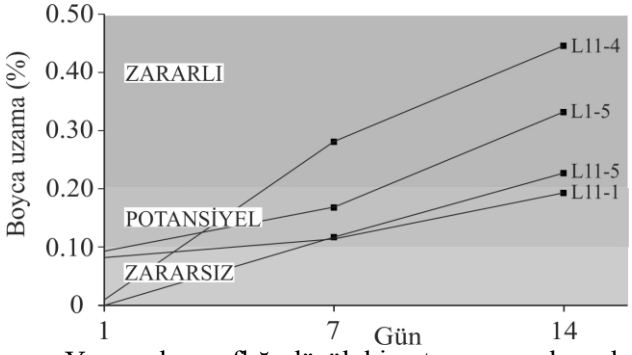
Çizelge 1. Karaburun Yarımadası kireçtaşlarının ortalama ana oksit element yüzdeleri.

Ana Oksit → / Ö. No ↓	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	KK	Toplam	Mn	[a]Saflık	[b]Adlama
L11-5	21.90	2.14	0.47	1.52	39.7	0.033	0.520	0,16	0.012	34.33	100.08	Ht	75.49	5
L11-4	5.09	0.28	0.261	2.39	49.91	0.029	0.048	E	0.046	41.75	99.804	Ht	94.37	2
L11-3	2.36	0.82	0.097	1.88	51.57	0.044	0.067	E	0.023	42.69	99.551	Ht	96,72	1
L11-2	0.917	0.127	0.036	0.743	54.017	0.012	0.020	0.02	0.009	43.35	99.232	Hm	98,92	1
L11-1	17.6	3.34	1.15	0.79	41.4	0.042	0.63	0.01<	0.011	35.05	100.01	Ht	77.91	c
L10-5	1.96	0.09	0.049	1.18	53.35	0.01	0.025	E	0.003	42.92	99.587	Hm	97.90	1
L10-3	0.93	0.21	0.055	0.19	54.6	0.061	0.047	E	0.003	43.31	99.411	Hm	98.81	1
L10-1	0.68	0.05	0.026	0.27	54.51	0.022	0.023	E	0.006	43.51	99.097	Hm	99.24	1
L9-3	0.11	0.04	0.036	0.46	55.03	0.01	0.007	0.01<	0.007	43.8	99.495	Hm	99.81	1
L8-2	0.11	0.04	0.031	0.46	55.03	0.01	0.007	0.01<	0.007	43.8	99.495	Hm	99.82	1
L7-5	0.65	0.281	0.203	0.45	54.54	0.01	0.04	0.01<	0.071	43.4	99.645	Hm	98.87	1
L6-7	0.28	0.18	0.031	11,381	42.46	0.011	0.021	0.01<	0.013	44.89	99.267	Hm	99.51	2
L5-9	0.37	0.15	0.043	9.78	41.46	0.009	0.025	0.01<	0.010	45.89	97.737	Hm	99.44	2
L4-1	0.92	0.47	0.086	2.06	52.89	0.029	0.034	E	0.014	42.96	99.563	Hm	98.52	1
L3-1	0.82	0.173	0.03	8.027	45.587	0.017	0.019	E	0.006	44.93	99.609	Hm	98.97	1
L2-1	0.53	0.39	0.126	9.39	43.65	0.009	0.008	E	0.011	45.33	99.444	Hm	97.60	c
L1-5	87.84	3.52	1.48	0.73	0.86	0.057	1.21	0.01<	0.096	3.15	99.238	Ht	8.61	9
L1-4	0.33	0.149	0.027	4.99	49.21	0.007	0.028	0.01<	0.007	44.49	99.238	Hm	99.49	2
L1-3	0.33	0.13	0.03	7.54	43.46	0.009	0.025	0.01<	0.010	44.89	99.324	Hm	99.51	2
L1-2	0.22	0.041	0.027	5.65	48.91	0.009	0.004	0.01<	0.007	44.9	99.768	Hm	99.69	2
L1-1	0.33	0.125	0.05	15.31	37.45	0.01	0.028	0.01<	0.008	46.5	99.811	Hm	97.61	3

E: Eser, KK: Kızdırma kaybı, Mn: Mineral homojenliği, a: Karbonatların saflıkları, b: Karbonatların saflıklarına (%) göre sınıflandırması (Şekil 3), c: Çakıltaşı, saflığı düşük karbonat kayaları.

Üretilen deneme betonlarında CEM I 42.5 R tipi (Portland) düşük alkali içerikli (toplam alkali içeriği < % 0.6) çimento kullanılmış ve tüm dizaynlarda çimento miktarı sabit tutulmuştur. Kireçtaşı agregalarından üretilen betonlarda yoğunluk (ρt) 2315 kg/m³ ile 2385 kg/m³ arasında, konglomera agregalarından üretilen deneme betonlarda ise 2329 kg/m³ ile 2347 kg/m³ arasında ölçülmüştür. İşlenme özelliğinin sertleşmiş betonun dayanımına olan etkisini azaltmak için çökme (Ç) değeri sabit tutulmaya çalışılmıştır. Kireçtaşı agregalarından üretilen deneme betonlarının 28 günlük basınç dayanımları (σ_b) 32.13 – 42.11 MPa arasında, konglomera agregalarından üretilen deneme betonlarının 28 günlük basınç ise 29.60 – 33.92 MPa arasında bulunmuştur.

Alkali agrega reaktifliğini (AAR) belirlemek için dolomit içerikli agregalara, Karbonat Agregaları İçin Hızlı Gözlem Testi, AAR-5 (Rilem, 2005) silisli mineral içeren agregalara ise Hızlandırılmış Harç Çubuğu Yöntemi AAR-2 (Rilem, 2000) uygulanarak kireçtaşlarının alkali agrega reaktifliği belirlenmiştir. AAR deneylerinde, toplam alkali içeriği % 0,6'dan büyük olan çimento kullanılmıştır. Test edilen dolomit kökenli agregaların hiçbirinin 28 günlük ortalama genleşme değeri sınır genleşme değerini (% 0.1) aşmadığından, Karaburun Yarımadası dolomitik kireçtaşları ve dolomitler, alkali karbonat reaksiyonuna neden olmamıştır. Fakat petrografik analizle silisli mineral türü ve kimyasal analiz ile de silisli bileşen miktarı belirlenen, L1-1, L11-5, L11-4 ve L11-5 numaralı lokasyona ait agregalarla hazırlanan harç çubuklarının, 14 günlük ortalama genleşme değeri % 0.1'den büyük çıkmıştır. Bu lokasyonlara ait agregalar ASR yönünden zararlı agregalardır. L11-1 numaralı lokasyona ait agrega ASR yönünden potansiyel tehlike arz edebilecek agregadır. L1-5, L11-4 ve L11-5 numaralı lokasyonlara ait agregalar beton yapımında kullanıldığında alkali silis reaksiyonu kaçınılmazdır. SiO_2 miktarının % 5'i geçtiği fasiyeslerde (L11-1, L11-4 ve L11-5) alkali agrega reaksiyonu sonucu harita görünümlü çatlaklar gözlenirken, SiO_2 miktarının % 2'nin altında olduğu fasiyeslerde (Çizelge 3, L11-2, L11-3) bu çatlaklar görülmemiştir.



Şekil 4. Karaburun Yarımadası saflığı düşük kireçtaşı agregalarından üretilen harç çubuklarının 14 günlük genleşme değerleri.

6. KARBONAT KAYALARININ DOĞAL YAPI TAŞI KALİTESİ

Blok taş üretimi yapılan ocaklardan alınan örnekler üzerinde gerçekleştirilen fiziko-mekanik testlerde karbonat kayaların görünür yoğunlukları (ρb) 2.7 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Dolomit minerali içeriğiyle ρb=2.734 kg/m^3'e kadar artmaktadır. Çakıltaşların da ise 2.650-2.961 kg/m^3 arasındadır. Karbonat kayaların açık gözeneklilik (po), toplam gözeneklilik (p) değerleri ve buna bağlı olarak su emme (Ab) % 1'den küçüktür. Çakıltaşında ise, gözeneklilik % 4 ve su emme % 1.5 civarındadır. Ses hızı ilerlemesi (V_p) karbonat kayalarında 6000-6300 m/s arasında iken, çakıltaşlarında 5000 m/s'dir. Isı iletim katsayısı (K) ise karbonatlarda 3 – 3.8 W/m^2/K arasındadır. Hem karbonatların hem de çakıltaşlarının sahip oldukları böhme (Bh, 7500 – 14500 mm^3) ve disk aşınma değerleri (Ds, 18-21 mm) aşınmaya karşı dirençli olduklarını, bükülme dayanımları (Rft = 11-15 MPa) ise döşemede de kullanılabileceklerinin göstergesidir. Karbonat kayalarının donma-çözülme (F), sodyum sülfat (NS) ve ıslanma kuruma (IK) sonrası ağırlık kayıpları değerleri (≈ % 0.02) ve don sonrası basınç dayanımı değerlerine bakıldığında, sert iklimlerden etkilenmediklerinin ve bu koşullarda kullanılabileceklerinin göstergesidir.

Çizelge 2. Karaburun Yarımadası karbonat kayalarının agrega ve doğal yapı taşı özellikleri.

Özellik→ / Örnek no ↓	ρ (Mg/m^3)	W (%)	SI (%)	FI (%)	F (%)	MS (%)	SE (%)	MB (g/kg)	M_{DE} (%)	LA (%)	SS (ppm)	AS (ppm)	SC (ppm)	AC (ppm)	Ç (cm)	ρt (kg/m^3)	σ_b (MPa)	LT
L1	2.74	0.16	16.57	23.29	0.15	2.77	71.81	0.24	10.40	16.89	72.4	839.7	123	206	14	2344	33.37	D- Dkçt
L2	2.68	1.12	13.16	31.05	0.67	2.71	65.32	0.38	12.66	20.22	36.2	1391.2	151	305	15	2329	29.60	Çkt
L3	2.71	0.24	21.87	42.00	0.18	1.35	73.76	0.38	9.17	17.98	29.9	181.1	130	146	13	2385	42.11	Kçt-Dkçt
L4	2.74	0.16	13.05	27.73	0.20	3.27	74.58	0.71	9.87	17.41	99.6	576.2	125	128	14	2350	32.13	Kçt
L5	2.69	0.12	26.21	36.98	0.15	2.07	72.42	0.61	14.56	19.82	99.6	568	96	83	15	2315	26.26	Kçt
L6	2.71	0.07	16.17	30.53	0.04	1.00	79.74	0.47	11.81	19.41	45.3	740.9	116	282	13.5	2342	34.50	Kçt
L7	2.68	1.12	13.16	31.05	0.67	5.71	74.38	1.57	12.66	20.22	199.2	1407.7	128	157	15	2325	35.78	Kçt
L8	2.69	0.24	16.06	25.53	0.02	2.34	58.83	0.52	12.22	19.69	135.8	1465.3	112	129	15	2347	36.11	Kçt
L9	2.70	0.13	28.03	25.26	0.03	1.67	69.28	0.50	11.99	19.56	140	1365.3	135	146	15	2344	35.31	Kçt
L10	2.70	0.16	20.16	25.26	0.11	2.43	67.46	0.47	12.13	19.55	45.3	938.4	96	58	13	2383	37.20	Kçt
L11-1	2.68	0.346	13.88	20.51	0.66	20.77	66.66	1.43	20.73	17.96	7.4	296.3	176	168	14	2347	25.68	Çkt
L11-2	2.69	0.15	17.89	26.66	0.05	0.88	68.55	0.48	12.52	17.58	63.4	403.4	96	101	13.5	2333	28.07	Kçt
L11-3	2.70	0.21	24.71	32.51	0.05	0.87	68.83	0.25	12.15	14.95	360	53	43	102	15	2350	29.47	Kçt
L11-4	2.68	0.26	18.51	28.39	0.03	0.81	71.09	0.30	12.25	14.25	62	140	29	88	14.5	2350	25.99	Kçt
L11-5	2.67	0.40	20.43	22.38	0.06	1.77	68.65	0.75	11.19	10.25	65	153	49	128	14	2336	26.74	Kçt
n	6	6	6	6	6	6	3	1	5	5	1	1	1	1	3	3	3	
Standard	TS EN 1097-6 (2013)	TS EN 1097-6 (2013)	TS EN 933-4 (2009)	TS EN 933-3 (2012)	TS EN 1367-1 (2009)	TS EN 1367-2 (2010)	TS EN 933-8 (2009)	TS EN 933-9 (2010)	TS EN 1097-1 (2003)	TS EN 1097-2 (2010)	TS EN 933-3 (2012)	TS EN 1744-1 (2011)	TS EN 1744-1 (2011)	TS EN 1744-5 (2008)	TS EN 12350 -6	TS EN 12350 -2	TE EN 12390 -3	

Özellik→ / Örnek no ↓	ρb (kg/m^3)	ρr (kg/m^3)	po (%)	p (%)	Ab (%)	FT (%)	NS (%)	IK (%)	Vp (m/sn)	K (W/m^{2}K)	σ_k (MPa)	σft (MPa)	Rtf (MPa)	Bh (mm^3)	Ds (mm)	LT
L1-1	2.734	2.745	0.428	0.533	0.157	0.017	0.098	0.018	6060	3.291	144.71	140.39	11.61	7449	17.78	D- Dkçt
L1-3	2.713	2.727	0.246	0.465	0.09	0.017	0.119	0.017	6247	3.436	116.68	98.66	12.29	11340	21.24	Kçt-Dkçt
L2	2.650	2.779	4.136	4.650	1.571	0.017	0.054	0.011	4938	2.651	50.74	55.59	10.30	14510	19.03	Çkt
L3	2.719	2.740	0.671	0.762	0.246	0.010	0.063	0.044	6370	3.250	103.96	102.81	14.29	3710	16.49	Kçt
L4	2.703	2.723	0.342	0.548	0.126	0.012	0.114	0.054	6198	3.101	117.25	119.59	14.48	10450	17.38	Kçt
L10	2.705	2.711	0.203	0.230	0.075	0.014	0.114	0.021	6265	3.763	110.20	114.66	15.03	10050	20.08	Kçt
L11-1	2.687	2.709	0.593	0.775	0.221	0.060	0.157	0.115	5058	3.092	79.45	90.68	11.08	14400	18.43	Çkt
L11-2	2.691	2.702	0.395	0.412	0.147	0.013	0.157	0.029	6208	3.098	121.19	121.36	12.41	12940	17.97	Kçt
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	10	10	10	10	10	
Standard	TS EN 1936 (2007)	TS EN 1936 (2007)	TS EN 1936 (2007)	TS EN 1936 (2007)	TS EN 13755 (2014)	TS EN 12371 (2001)	TS EN 12370 (2010)	TS 699 (2009)	TS EN 14579 (2003)	TS EN 1745 (2003)	TS EN 1926 (2013)	TS EN 1926 (2013)	TS EN 12372 (2013)	TS EN 14157 (2005)	TS EN 14157 (2005)	

*n: Örnek sayısı, LT: Litolojik tanım. Kçt: Kireçtaşı, D: Dolomit, Dkçt: Dolomitik kireçtaşı, Çkt: Çakıltaşı

7. SONUÇLAR

Karaburun Yarımadası karbonat kayaları sahip oldukları fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleriyle sert iklimlerde dahi, hem dış cephe kaplamasında hem de yer döşemesinde kullanılabilecek oldukça kaliteli doğal taşlarıdır. Gelgit, gelgit arası ve kısmen de şelf lagün ortamlarında çökelen Karaburun kireçtaşları; dokusal homojenliği düşük, bileşimsel homojenliği yüksek (saflık > % 95) kireçtaşlarıdır. Saflığı yüksek kireçtaşları ile kaliteli agrega, dolayısıyla kaliteli beton elde edilebileceği görülmüştür.

Tane destekli dokudaki tanetaşı, istiftaşı fasiyeslerine ait Karaburun Yarımadası karbonatları, dokusal homojenliği yüksek, bileşimsel homojenliği (saflığı < % 95) düşük ve kalınlıkları birkaç 15 m'yi geçmeyen fasiyesler içerebilir. Bileşimsel homojenliği düşük bu kireçtaşları ile yüksek alkali bir çimento kullanılarak üretilen betonlarda alkali silis reaksiyonu geliştiği görülmüştür. Karaburun Yarımadası dolomit kökenli kireçtaşları alkali karbonat reaksiyonu (ACR) testinde risk teşkil edecek bir genleşme değeri göstermemiştir. Bunun nedeni, yarımadadaki dolomitlerin ve dolomitik kireçtaşlarının dolospar (> 200 μm) özelliğinde ve SiO_2 içeriğinin % 2'den daha az olmasıdır.

Karbonat kayaları içerisinde kalınlıkları birkaç 15 m'yi geçmeyen çakıltaşlarına ait agregalar, karbonat agregalara kıyasla daha düşük kalitede agrega özelliğindedirler. Bu agregalarla üretilen betonlarda, karbonatlarla üretilen betonlardan daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir.

8. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 107Y052 proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Yazarlar, finansal desteği için TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

9. KAYNAKLAR

Bell, F.G., 2006. Mühendislik Jeolojisi ve İnşaat. (Çeviren: K. Kayabalı), Sistem Ofset, Ankara.

Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. American Association Petroleum Geologist, 1, 108-121.

Elçi, H., Türk N., İşintek İ., 2014. İzmir Karaburun yarımadasındaki farklı kireçtaşlarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi. 38, 2.

Erdoğan, B., Altıner, D., Güngör, T., Özer, S. 1990. Karaburun Yarımadası'nın stratigrafisi. MTA Dergisi, 111, 1-22.

Gillott, J. E., 1980. Properties of aggregates affecting concrete in North America. Quarterly Journal Of Engineering Geology, 13, 289-303.

Güngör, T., 1989. Karaburun Yarımadası Balıklıova – Barboros arasındaki bölgenin jeolojisi ve yapısal evrimi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

İşintek, İ., 2002. Foraminiferal and Algal biostratigraphy and petrology of the Triassic to Early Cretaceous carbonate assembleges in the Karaburun Peninsula, (Western Turkey). Ph.D. Thesis, Natural and Applied Science of Dokuz Eylul University, İzmir.

Okay, AI., Siyako, M., 1993. İzmir-Balıkesir arasında İzmir-Ankara Neo-Tetis Kenedinin yeni konumu. Türkiye ve Çevresinin Tektoniği-Petrol Potansiyeli Ozan Sungurlu Sempozyumu, Ankara.

Okay, A.I., Satır, M., Sıyako, M., Monıé, P., Metzger, R., Akyüz, S., 1996. Paleo- and Neo-Tethyan Events in Northwestern Turkey: Geologic and Geochronologic Constrains. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge.

Okay, A.I., Tüysüz, O., 1999. Tethyan Sutures of Northern Turkey. Mediterranean Basins: Tertiary Extension Within the Alpine Orogen. Geological Society of London, Special Publication.

RILEM TC 191-ARP., 2005. Alkali-reactivity and prevention - assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, AAR-5: Rapid preliminary screening test for carbonate aggregates. Material and Structures, 38, 787-792.

RILEM TC 106-2., 2000. Alkali aggregate reaction – the ultra accelerated mortar –bar test. Material and Structures, 33, 283-293.

Rollings, M.P., Rollings R.S., 1995. Geotechnical Materials in Construction. McGraw-Hill, London.

Smith, M.R., Collis, L., 2001. Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geological Society, Engineering Geology, Special Publication, London.

TSE, 2009b. Beton agregaları. TS EN 706, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TSE, 2009a. Doğal yapı taşları – inceleme ve laboratuar deney metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Tuğrul, A., Yılmaz, M., 2012. Assesing the quality of sandstone for use as aggregates in concrete. Magazine of Concrete Research, 64(12), 1067-1078.

Elastik Dalga Hızı Kullanılarak Kaya Kararlılığının Değerlendirilmesi

Assessment of Durability of Rock Using Elastic Wave Velocity

S. Ceryan[1,*], Z. H. Çebi Usturbelli[2]

[1] *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,*
[2] *İstanbul Sancaktepe Belediyesi İmar Müdürlüğü, Sancaktepe/İstanbul*
*(*sceryan@balıkesir.edu.tr)*

ÖZ: Kayaçların kararlılığı; kullanım süresi boyunca ufalanmaya ve bozunmaya karşı koyabilmeleri olarak tanımlanmaktadır. Literatürde, kayaçların kararlılığını değerlendirebilmek için değişik yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri kaya kararlılık indekslerinin kullanımıdır. Bu yöntem statik ve dinamik koşullar için kayaçların kararlılığının değerlendirilmesinde uygulanabilir. Bir diğer yöntem hızlandırılmış ayrışma deneyleridir. Bu deneyler, kaya bozunmasının laboratuvar ortamda benzeşimi için uygulanmaktadır. Bu çalışmada, incelenen örneklerin kararlılığını araştırmak için önceki çalışmalarda tanımlanmış P- dalga hızına bağlı indeksler kullanılmıştır. Elastik dalga hızı ölçümü, örselenmeye yol açmayan bir deneydir ve bu ölçüm kolayca tekrarlanabilir. Ayrıca bu ölçüm ilgili mühendislik özelliklerinin değişimine karşı da duyarlıdır. Bu çalışmada, KTÜ Merkez yerleşkesinde (Trabzon) çevre düzenlemesi için 1970 yılında yapılan taş örme duvarlardaki ayrışmış örnekler ve İyidere taş ocağından (Rize) alınan ayrışmamış kaya örneklerinin kararlılığı araştırılmıştır. Söz konusu örneklerin kararlılığının değerlendirilmesi için "Kaya Kararlılık Göstergeleri" hesaplanmış ve sonra P-dalga hızına bağlı indekslerle bu göstergeler ve hızlandırılmış ayrışma deney sonuçları arasındaki ilişkiler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kararlılık, Volkanik Kayalar, P-Dalga Hızı, Hızlandırılmış Ayrışma Deneyleri

ABSTRACT: *The durability of a stone is defined as a measure of its ability to resist weathering and to retain its original size, shape, strength and appearance over an extensive period of time. There are different methods to evaluate durability of rocks in the literature. One of them is the use of rock durability indicator. The method can be applied to evaluation of durability of the stone for static and dynamic conditions. The method can be applied to both static and dynamic conditions that are valid for the stone in-service. The other method is the accelerated weathering tests. These tests are applied to simulate deterioration of the rocks under laboratory condition. In this study, the indices based on P-wave velocity suggested in the literature were used to evaluate the durability of the samples investigated. The elastic wave velocity measurement is a non-destructive test, and this measurement is applied easily to repeat. In addition the measurement is sensitive to the change of the related engineering properties. In this study, the durability of weathered samples used in the stone walls the stone wall for landscaping which are built in 1970 in Karadeniz Technical University (Trabzon) and the unweathered rock samples from İyidere stone quarry, Rize NE Turkey were investigated. In order to evaluate the durability of the samples, rock durability indicators were computed, then the relationships between the indices based on P-wave velocity and these indicators with the results of the accelerated weathering test performed on the sample were obtained.*

Keywords: *Durability, Volcanic Rocks, P-Wave Velocity, Accelereted Weathering Tests*

1. GİRİŞ

Yapıtaşı olarak kullanılan kaya malzemesinin kararlılığı; üretiminden kullanıldığı yapıdaki mühendislik ömrünün sonuna kadar geçen zaman içindeki işlevini sürdürebilirliği (boy, şekil ve dayanım açısından performansını koruyabilmesi) olarak tanımlanmaktadır. Yapıtaşlarının ayrışabilirliği ise kararlılığının tersi anlamında kullanılmaktadır ve ayrışabilirlik, söz konusu malzemenin üretim ve depolama şekli, indeks özellikleri (litolojik, doku, fabrik özellikleri ve ayrışma durumu) ile çevresel koşullara (özellikle iklimsel ve hidrolojik koşullara) bağlıdır. Mühendislik yapılarında kullanılan kaya malzemesinin ayrışabilirliğinin ve ayrışma durumunun

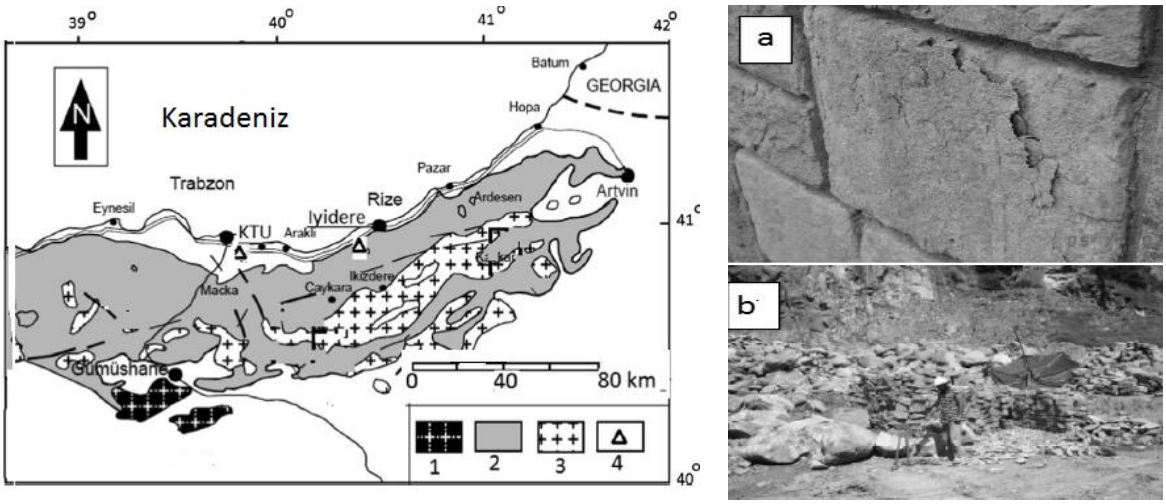
değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler; (a) indeks özellikler, (b) mühendislik deneyleri (hızlandırılmış ayrışma deneyleri, mekanik deneyler) (c) mineralojik ve petrografik analizler ve indeksler, (d) kimyasal analizler ve indeksler, (e) kaya duraylılık indeksleri (göstergeleri) ve (f) esnek hesaplama yöntemleri (etkileşim matrisi, bulanık çıkarım yöntemi) olarak gruplandırılabilir. Fookes vd. (1988) yapı malzemesi olarak kullanılan kaya malzemesinin duraylılığının tahmini için statik ve dinamik kaya duraylılık göstergeleri önermiştir. Statik Kaya Duraylılık Göstergesi (RDIs) dört mühendislik testinin (nokta yükü dayanım indeksi, magnezyum sülfat dayanıklılık testi (Hosking ve Tubey 1969), su emme ve özgül ağırlık) kombinasyonu şeklinde tanımlanmıştır. Dinamik Kaya Duraylılık Göstergesi kaya ve agreganın dinamik yükleme süreçlerinde parçalanmaya uğradığı durumlar için önerilmiştir.

Bu çalışmada, boyuna dalga hızına bağlı olarak tanımlanan Kalite İndeksi (Fourmaintraux, 1976), Ayrışma Durumu İndeksi (Ceryan vd., 2008) ve Sayısal Ayrışma İndeksi (Ceryan vd., 2008)'nin kullanım halindeki yapıtaşlarının kararlılığının değerlendirilmesinde kullanımı araştırılmıştır. Bunun için Karadeniz Teknik Üniversitesi Trabzon Merkez yerleşkesindeki çevre düzenlenmesi için yapılan taş örme duvarlarda kullanılan bazik volkanitlerin performansı değerlendirilmiştir. Söz konusu yapıtaşlarının Statik ve Dinamik Kaya Kararlılık İndeksleri (Fookes vd., 1998) belirlendikten sonra boyuna dalga hızına bağlı olarak tanımlanan indekslerle kaya kararlılık indeksleri arasındaki ilişki incelenmiş ve son aşamada bu istatistiksel ilişkiler esas alınarak boyuna dalga hızına bağlı olarak tanımlanan indekslerin kaya kararlılığının kestiriminde kullanılabilirliği irdelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmayı gerçekleştirmek için Karadeniz Teknik Üniversitesi'nin Trabzon'daki merkez yerleşkesinde çevre düzenlenmesi için 1970 yılında yapılan ve son olarak 2006 yılında önemli bir kısmı yenilenen taş örme duvarın en altında yer alan ayrışmış bloklardan ve bu blokların sağlandığı İyidere (Of-Rize) civarındaki taş ocaklarından, henüz işletilmekte olan ve İyidere-İkizdere yolu üzerinde yer alan taş ocağındaki bazik volkanitlerden ayrışmamış örnekler alınmıştır (Şekil 1). Bu örnekler mineralojik bileşimlerine göre ve örneklemenin yapıldığı yere göre 4 gruba ayrılmıştır; Bunlar; (1) İyidere taş ocağından alınan kaya parçaları ve kristal içeren tüfler (Ts1-8 örnekleri) (2) KTÜ Merkez Yerleşkesinde taş duvarlardan alınan ve bu duvardaki kayaçların yaklaşık %72'sini oluşturan kaya parçaları ve kristal içeren tüfler (Dv 1-8), (3) KTÜ Merkez Yerleşkedeki taş duvarlardan alınan bazaltlar (Bz 2-4) ve (4) KTÜ Merkez Yerleşkesinde taş duvarların yaklaşık % 20'sini oluşturan bazik vitrik tüfler (Dg 1-5)'dir. Ayrıca, İyidere (Rize) ocağına yakın kısımdan bir bazalt bloğu örneği de alınmıştır (Bz1 örneği). 1. ve 2. gruplar arasındaki fark ayrışma derecesidir. 2. gruptaki örneklerde plajiyoklasların % 50'den fazlası kalsit, zeolit, serisit ve kile dönüşmüştür. Mafik minerallerin büyük çoğunluğu, ojitten ve çok azı hornblenden oluşmakta olup, % 30-60'ı klorite dönüşmüştür (Çebi, 2008). Hamurun % 40'dan fazlası klorit, zeolit ve kalsitten oluşmaktadır. Bu örneklerde plajiyoklasların % 3-15 ve mafik minerallerin % 2-6'sı ayrışmış olup, mikro kırık boşluk oranı % 8-16, ikincil mineral oranı 13-25 arasındadır (Çebi, 2008) (. Bu örneklerin kuru birim hacim ağırlığı 20.0-22.1 kN/m^3, görünür porozitesi %11.7-16.4, toplam porozitesi %13.9-20.0, kuru durumda boyuna dalga hızı 3050-3335 m/sn arasında değişmektedir (Çebi 2008). Söz konusu duvarlardan alınan bazalt örneklerinde "mikrokırık+boşluk oranı" %3.64-9.32, ikincil mineral oranı %5.3-12.7, kuru birim hacim ağırlık 20.0-25.0 kN/m^3, görünür porozite %3.5-12.5, toplam porozite %5.3-17.0 ve kuru durumda boyuna dalga hızı 3930-4840 m/sn arasında değişmektedir (Çebi, 2008).

Laboratuvar deneyleri KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği ve Jeoloji Mühendisliği Kaya Mekaniği laboratuvarlarında yapılmıştır. İndeks özellikler, örnekteki P-dalga hız ölçümleri, Nokta Yükleme deneyi, İndirekt çekme deneyi (Brazilian deneyi), tek eksenli basınç deneyi ISRM (2007) esas alınarak, ağırlıkça su emme ve özgül ağırlık deneyleri BSI 812 (1990)'a, Los Angeles aşınma deneyi TSE 699 (1987)'a göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası (1. Paleozoik granitoid, 2 Geç Kretase volkanik ve volkano-sedimanter kayaçlar, 3-Geç Kretase-Eosen granotoid, 4-Örnekleme yerleri (Ceryan 2014'den alınmıştır), ayrışmış blok örnekleri (a) ve İyidere ocağındaki sağlam bloklar (b).

Karot örneklerinin elastik boyuna dalga (P dalgası) hızı; örnek boyunun, ultrasonik dalganın örneği kat ediş süresine oranından bulunmuştur. Süre ölçümü örneklerin hem suya doygun hem de kuru haldeki durumları için oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Örneklerin P-dalga hızından yararlanarak katı kısmının (örneğin boşluksuz ve mikro-kırıksız olduğu durumdaki) boyuna dalga hızı Eşitlik 1'de verilen ilişki (Barton, 2007) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{Vp} = \frac{n}{Vb} + \frac{(1-n)}{Vm} \tag{1}$$

Burada; n porozite, V_p örneğin boyuna dalga hızı, V_b örneğin boşluklarındaki malzemenin (hava, su, buz) boyuna dalga hızı ve V_m örneğin katı kısmındaki (minerallerdeki) boyuna dalga hızıdır.

Franklin ve Chandra (1972) tarafından geliştirilen suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi özellikle kil içeren kayaçların ıslanma-kuruma süreçlerindeki fiziksel değişimini değerlendirmede kullanılmakta olup, kayaçların kararlılığını değerlendirmede kullanmışlıdır (Ergüler ve Ulusay, 2009). Bu çalışmada, suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi 4 çevrim için bulunmuştur. $MgSO_4$ sağlamlık testi kaya örneklerinin gözenekleri içindeki tuz kristallerinin oluşumu ve kayaç örneklerinin fiziksel parçalanmasını ölçmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Hosking ve Tubey (1969)'in önerisi esas alınarak, ölçülen magnezyum sülfata dayanıklılık 5 çevrim için belirlenmiştir. Modifiye Agraga Darbe Değeri (MAIV) testi, AIV testinin yeniden düzenlenmiş şeklidir. Bu deneyde çekiç darbe sayısı deney sonunda malzemenin %5-20 arasındaki kısmının 2.36 mm'lik elekten gelmesi ile sınırlandırılmıştır. MAIV testleri BSI 812 (1990)'a göre gerçekleştirilmiştir.

3. KAYA KARARLILIK GÖSTERGELERİ VE AYRIŞMA İNDEKSLERİ

Statik Kaya Duraylılık Göstergesi (RDI_s) Eşitlik2'de verilen bağıntıyla tanımlanmıştır (Fookes vd. 1998).

$$RDI_s = \frac{I^*_{s(50)} - 0.1(SST + 5WA)}{SG_{ssd}} \tag{2}$$

Burada; $I_{s(50)}^*$ örneklerin kuru ve doygun durumlarında ölçülen nokta yükü dayanım indeksinin ortalaması, SSTmagnezyum sülfat dayanıklılık kaybı (%) (Hosking ve Tubey, 1969), WA su emme değeri (BSI 812) ve SG_{ssd} doygun özgül yoğunluktur.

Çizelge 1. İndeks, mekanik ve hızlandırılmış ayrışma deney sonuçları (Çebi, 2008)

Örnek No.	V_p (m/sn)	V_m (m/sn)	SG_{ssd}	SST (%)	MAIV (%)	$I_{s(50)}$ort (MPa)	LA_{100} (%)	LA_{500} (%)	I_d (%)	σ_c (MPa)
Dg1	3569	4702	2.325	4.52	28.27	3.32	6.7	21.6	85.99	32.66
Dg2	3520	4610	2.33	5.68	32.56	1.37	11.8	47.8	87.64	19.84
Dg3	3687	4838	2.356	4.86	29.04	2.56	6.9	24.7	88.84	34.57
Dg4	3502	4558	2.326	8.21	32.56	1.87	9.8	38.5	88.93	23.14
Dg5	3376	4597	2.326	7.74	44.44	1.12	18.4	54.3	84.28	15.48
Bz1	4838	4950	2.515	0.53	11.517	6.84	0.9	8.3	94.39	97.68
Bz2	3933	4447	2.231	0.86	23.76	5.34	2.9	7.4	92.95	57.26
Bz3	4230	4846	2.162	0.68	15.895	6.78	2.1	10.9	92.17	88.42
Bz4	3991	4667	2.126	1.07	21.153	4.96	3.3	11.2	93.82	64.81
Bztf1	3586	4621	2.321	2.27	29.15	2.73	2.7	15.6	87.4	30.54
Ts1	3418	4600	2.321	4.62	24.827	2.79	7.8	26.8	89.75	37.9
Ts2	3476	4638	2.284	2.14	22.704	2.43	9.1	28.4	92.26	38.4
Ts3	3661	4701	2.370	2.78	27.335	2.38	8.6	26.1	91.93	30.5
Ts4	3671	4644	2.243	3.04	27.72	3.26	9.3	33.4	92.26	33.4
Ts5	3443	4600	2.28	4.36	27.357	2.96	7.4	23.7	89.13	34.2
Ts6	3500	4645	2.264	3.87	23.012	3.15	7.6	23.6	88.56	36.6
Ts7	3653	4684	2.344	4.47	27.06	2.01	7.6	26.1	91.39	31.6
Ts8	3466	4560	2.335	10.73	68.64	1.12	9	31.5	89.41	15.8
Dv 1	3125	4230	2.342	6.25	35.53	1.01	17.8	57.9	76.36	20.1
Dv2	3050	4551	2.172	7.56	42.79	1.65	16.4	63.6	80.65	16.54
Dv3	3333	4402	2.28	6.02	30.36	2.17	10.6	38.7	79.51	24.38
Dv 4	3233	4457	2.344	5.79	32.89	1.14	10.2	34.2	87.34	19.36
Dv5	3219	4439	2.327	6.98	35.97	1.06	14.7	55.3	85.09	19.0
Dv6	3314	4518	2.207	9.24	64.57	1.4	14.2	59.2	84.46	15.4
Dv7	3163	4232	2.166	10.22	75.24		19.5	52.6	77.72	147.9
Dv8	3105	4200					21.6	67.5	79.2	

*(V_p: örneğin kuru durumunda ölçülen boyuna dalga hız; V_m: örneğin katı kısmındaki dalga hızı .. $I_{fp}I_d$: dört çevrim için bulunan suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi. LA_{100} ve LA_{500}: Los Angeles deneyinde 100 ve 500 çevrimdeki aşınma miktarı)

Dinamik Duraylılık Göstergesi (RDI_d) ise, yapı taşlarının dinamik yükleme süreçlerinde parçalanmaya uğradıkları durumlarda malzemenin duraylılığını değerlendirmek için Eşitlik 3'teki gibi verilmektedir (Fookes vd., 1988).

$$RDI_d = \frac{0.1[M.AIV + 5(WA)]}{SG_{ssd}} \quad (3)$$

Burada M.AIV, Tubey ve Hosking (1969) tarafından verilen değiştirilmiş agrega sıkışma dayanımını (darbe dayanımı) ifade etmektedir. İncelenen örnekler için bulunan kararlılık gösterge değerleri ile elastik dalga hızına bağlı olarak tanımlanan indeksler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çebi (2008) ve Ceryan ve Usturbelli (2011) söz konusu örnekler için ıslanma-kuruma deneylerinde 25. çevrim ve donma-çözülme deneylerinde 50. çevrim sonunda indeks ve mekanik özelliklerin değişim miktarları ile Statik Kaya Kararlılık Göstergesi (RDI_s) arasında anlamlı ilişkiler olduğunu ve bu nedenle RDI_s kullanılarak yapı taşlarının kararlılığının kestirilebileceğini belirtmişlerdir. Yine RDI_d değeriyle kaya malzemesinin dinamik yükleme koşullarındaki mühendislik davranışını ifade eden indeks özellikler; 100. ve 500. çevrim sonundaki Los Angeles aşınma değerleriyle (LA100 ve LA500) değiştirilmiş agrega sıkışma değeri suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değeri ve dinamik elastisite modülü (E_d) arasında anlamlı istatistiksel eşitlikler elde etmişlerdir.

Çebi (2008) ve Ceryan ve Usturbelli (2011) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmalara göre; RDI_s ve RDI_d yapı taşların kararlılığının bir göstergesi olarak kullanılabilir. Ancak bu göstergeleri bulmak için nokta yükleme deneyine ve Mg Sülfat dayanıklılık deneyine ihtiyaç vardır. Bu deneylerin yapılması zaman ve örnek örselenmesi açısından bazı güçlükler taşımaktadır. Ayrıca nokta yükleme deneyinin şekilsiz örneklerde kullanılabilirliğine karşın, deneyin tekrarlanamaması kullanıcı için hatalı tasarım ve ölçüm duyarlılığı gibi sorunları vardır (Topal, 2000). Elastik dalga hızı ölçümleri ise, örneğin örselenmemesi, iki yüzeyi paralel örneklerin yeterli olması ve kuru ve suya doygun örneklerde ölçümlerin kolayca tekrarlanabilmesi nedeniyle kayaların mühendislik davranışının tahmininde ve ayrışma durumunun değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ceryan ve Şen, 2003; Ceryan vd., 2005; Ceryan vd.2008).

Çizelge 2. Kararlılık gösterge değerleri ile elastik dalga hızına bağlı olarak tanımlanan indeksler

Örnek No.	IQ (%)	Imp	Ifp	Iad	Ia	RDI_s	RDI_d
Dg1	75.9	27.9	24.1	26.07	36.43	-0.92	1.924
Dg2	76.4	28.89	23.64	26.4	35.49	-1.064	2.116
Dg3	76.2	25.52	23.79	24.67	33.08	-0.971	1.948
Dg4	76.8	29.25	23.17	26.39	34.54	-1.195	2.163
Dg5	73.4	31.8	26.56	29.3	40.41	-1.297	2.678
Bz1	97.7	6.96	2.26	5.18	10.5	-0.027	0.673
Bz2	88.4	24.37	11.56	19.07	24.77	-0.619	1.694
Bz3	87.3	18.65	12.71	15.96	22.54	-0.646	1.501
Bz4	85.5	23.25	14.48	19.37	24.35	-1.017	1.949
Bztf1	77.6	23.7	22.4	23.06	32.75		
Ts1	74.3	27.28	25.7	26.5	34.03	-1.015	2.107
Ts2	74.9	26.04	25.05	25.55	31.32	-1.111	1.954
Ts3	77.9	22.11	22.12	22.11	28.4	-1.009	1.877
Ts4	79	21.89	20.95	21.43	27.51	-0.926	1.905
Ts5	74.8	26.74	25.15	25.96	34.01	-1.119	2.168
Ts6	75.3	25.53	24.65	25.09	33.66	-1.066	2.046
Ts7	78	22.28	22.01	22.14	28.85	-1.078	1.923
Ts8	76	26.25	23.98	25.14	33.07	-1.014	1.923
Dv 1	73.9	33.51	26.12	30.04	46.58	-1.411	3.559
Dv2	67	35.11	32.98	34.06	46.82	-1.329	2.424
Dv3	75.7	29.08	24.28	26.79	41.79	-1.545	2.965
Dv 4	72.5	31.21	27.46	29.4	38.34	-1.158	2.16
Dv5	72.5	31.5	27.48	29.56	40.06	-1.186	2.21
Dv6	73.4	29.49	26.65	28.11	39.28	-1.215	2.318
Dv7	74.7	32.71	25.27	29.23	45	-1.505	3.682
Dv8	73.9	33.94	26.07	30.26	44.77	-1.855	4.296

(QI: Kalite İndeksi, Imp: Minerolojik Değişim Paremetresi, Ifp: Fiziksel Değişim Parametresi, Iad: Ayrışma Durumu İndeksi,Ia: Sayısal Ayrışma İndeksi, RDI_s: Statilk Kaya Kararlılık Göstergesi, RDI_d: Dinamik Kaya Kararlılık Göstergesi)

Ceryan vd. (2008) kayaçların ayrışma durumunu tanımlamak ve ayrışabilirliğini tahmin etmek için "Sayısal Ayrışma İndeksi" (Ia) kavramını ortaya atmışlardır. Bu çalışmada, incelenen örneklerin kararlılığını değerlendirmek için bu indeks kullanılmıştır.

$$Ia = 100 - ((100 - Iad) * Id * 0{,}01) \quad (4)$$

Burada; I_d suda dayanım indeksi, I_{ad} ise "Ayrışma durumu " indeksi olup, I_{mp} (mineralojik değişim parametresi) ve I_{fp}'ye (fiziksel değişim parametresi)*"* bağlı olarak Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$Iad = \sqrt{\frac{Ifp^2 + \mathrm{Im}\,p^2}{2}} \qquad \mathrm{Im}\,p = \frac{(V_{mo} - V_m)}{V_{mo}}\ 100 \quad \text{ve} \quad Ifp = \frac{(V_m - V_p)}{V_m}\ 100 \quad (5)$$

Burada; V_p kuru örnekte P-dalga hızı, V_m örneğin katı kısmının (boşluk ve mikrokırık içermediği durumdaki) P-dalga hızı ve V_{mo} ise sağlam örnekte P-dalga hızıdır. İncelen örnekler için Imp, Ifp, Iad ve Ia değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

İyidere taş ocağından alınan sağlam ve az ayrışmış likit kristal tüf örnekleriyle bu ocaktan çıkartılan ve 1970 yılında inşa edilen KTÜ Merkez Yerleşkesindeki örme duvarlarda kullanılan kristal tüf örnekleri karşılaştırıldığında; ortalama suda dayanım indeksinin % 10.4, boyuna dalga hızının % 10, Vm'nin % 5.6, IQ'nin % 4.13 oranında azaldığı ve Imp'nin % 21.9, Ifp'nin % 17 ve Ia'nın % 25.4 arttığı görülmektedir (Çizelge 3). (Burada verilen indekslerin adlarının yazılması yerine, daha kısa olan simgeleri verilirse yerden kazanılır)

Çizelge 3. Sağlam ve ayrışmış tüflerin boyuna dalga hızı ile ilgili parametre değerleri (Çebi, 2008)

	Vp (m/sn)	Vm (m/sn)	IQ (%)	Imp	Ifp	I_{ad}	Iad	I_a
3. grup (İyidere taşocağından alınan likit kristal tüf örnekleri)								
Örnek sayısı	175	175	175	175	175	175	175	175
Ortalama	3546	4645	76	24.6	23.7	24.1	31.1	90.8
Stadart sapma	111	38.2	1.91	2.37	1.90	2.13	2.85	1.57
4.grup (Kampüsteki duvarlardan alınan likit (?) kristal tüf örnekleri								
Örnek sayısı	175	175	175	175	175	175	175	175
Ortalama	3223	4399	73.3	31.4	26.7	29.2	41.7	82.2
Stadart sapma	131	143	2.66	2.78	2.66	2.48	4.54	4.53

*(V_p: örneğin kuru durumunda ölçülen boyuna dalga hızı (m/sn); V_m: örneğin katı kısmındaki dalga hızı (m/sn). IQ: kalite indeksi. I_{fp}: Fiziksel değişim parametresi. Imp: Mineralojik değişim param. I_{ad}: Ayrışma durumu indeksi. I_a: sayısal ayrışma indeksi. Id: suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi)

P-dalga hızına bağlı olarak tanımlanan Kalite İndeksi (QI), Ayrışma durumu indeksi (I_{ad}) ve Sayısal Ayrışma İndeksi (Ia)'nin Statik ve Dinamik Kaya Kararlılık göstergelerinin (RDI_s ve RDI_d) tahmininde kullanılabilirliğini değerlendirebilmek için istatiksel modeller kurulmuştur (Eşitlik 7-11). İncelenen örnekler için QI, I_{ad} ve I_a'nın RDI_s ve RDI_d'nin tahmininde kullanılmalarının uygun olduğu belirlenmiştir. En iyi korelasyon "I_a" için elde edilmiştir.

$RDIs = 2.5 - 10.03e^{-0.0135QI}$ (r=0.685) (6) $RDId = 49.166e^{-0.0406QI}$ (r=0.747) (7)

$RDIs = 2.5 - 2.347e^{0.0164Iad}$ (r=0.751) (8) $RDId = 0.604e^{0.0505Iad}$ (r=0.852) (9)

$RDIs = 2.5 - 2.417e^{0.0114Ia}$ (r=0.763) (10) $RDId = 0.614e^{0.0363\,Ia}$ (r=0.899) (11)

Islanma-kuruma deneyinde 25. çevrim ve donma-çözünme deneylerinde 50. çevrim sonunda tayin edilen indeks ve mekanik özelliklerin değişim miktarları ile "Sayısal Ayrışma İndeksi" arasında Çizelge 4'te verilen istatistiksel ampirik ilişkiler elde edilmiştir. Islanma-kuruma ve donma-çözünme deney sonuçları (2008) tarafından verilmektedir.

Çizelge 4. Hızlandırılmış ayrışma deneyleri sonuçları ile Sayısal Ayrışma İndeksi arasındaki ilişkiler

Islanma-Kuruma 25. Çevrim			Donma-Çözülme 50.çevrim		
γ_k*=0.58e $^{0.039Ia}$	(r=0.867)	(7)	γ_k*=0.756e $^{0.08Ia}$	(r=0.910)	(8)
n_e*=-0.761*Ia*+4.595	(r=0.697)	(9)	n_e*=-0.8761*Ia*+5.21	(r=0.719)	(10)
n*=-0.701*Ia*+4.595	r=0.730)	(11)	n*=-0.702*Ia*+7.41	(r=0.661)	(12)
Vp=3.185e $^{0.051Ia}$	(r=0.808)	(13)	Vp=2.80e $^{0.061Ia}$	(r=0.876)	(14)
σ_c*=1.254e $^{0.0769Ia}$	(r=0.877)	(15)	σ_c*=3.068e $^{0.06Ia}$	(r=0.833)	(16)
σ_t*=0.4578e $^{0.0964Ia}$	(r=0.880)	(17)	σ_t*=1.1548e $^{0.081Ia}$	(r=0.847)	(18)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, boyuna dalga hızına bağlı olarak tanımlanan Kalite İndeksi, Ayrışma Durumu İndeksi ve Sayısal Ayrışma İndeksi'nin KTÜ Trabzon Merkez Yerleşkesindeki çevre düzenlenmesi için yapılan taş örme duvarlarda kullanılan bazik volkanitlerin ayrışmaya karşı dayanımının, kararlılığının ve performansının değerlendirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Önceki çalışmalarda da verildiği gibi statik ve dinamik kaya kararlılık göstergesi (RDI_s ve RDI_d) yapıtaşların kararlılığının bir göstergesi olarak kullanılabilir. Ancak, bu göstergelerin elde edilmesinde zaman, ekonomi, deneylerin tekrarlanabilirliği ve kullanılan parametreler açısından olumsuzluklar vardır. Bu çalışmada kurulan istatistiksel modeller Kalite İndeksi, Ayrışma Durumu İndeksi ve Sayısal Ayrışma İndeksi kullanılarak statik ve dinamik kaya kararlılık göstergelerinin tahmin edilebilecekleri gösterilmiştir. Bu modellerde en iyi korelasyon katsayısı Sayısal Ayrışma İndeksi için elde edilmiştir.

İyidere taş ocağından alınan sağlam ve az ayrışmış likit kristal tüf örnekleriyle, bu ocaktan alınıp 1970 yılında inşa edilen KTÜ Merkez Yerleşkesindeki örme duvarlarda kullanılan kristal tüf örneklerine ait Kalite İndeksi, Ayrışma Durumu İndeksi ve Sayısal Ayrışma İndeksi' değerleri karşılaştırılmıştır. Bu indekslerin incelenen tüf örneklerinin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılabilirliğinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Islanma-kuruma deneyinde 25. çevrim ve donma-çözünme deneylerinde 50. çevrim sonunda tayin edilen indeks ve mekanik özelliklerin değişim miktarları ile Sayısal Ayrışma İndeksi arasında istatistiksel açıdan anlamlı ilişkiler elde edilmiştir. Bu durum, Sayısal Ayrışma İndeksi'nin, incelenen örneklerin kararlılığının değerlendirilmesinde kullanılmasının ekonomiklik ve güvenilirlik açısından yeterli olacağına işaret etmektedir.

5. KAYNAKLAR

Barton, N., 2007. Fracture-induced seismic anisotropy when sharing is induced in production from fractured reservoirs. Journal Seismic Exploration. 16, 115–143.

British Standards- 812, 1979. Sampling and testing of mineral aggregates. sands and fillers. British Standarts Institution, London.

BSI. 1990. Testing aggregates: methods for determination of modified aggregate impact value. Part 112, Code no. BS812, British Standards Institution. London.

Ceryan, S., Şen. C., 2003.Two potential methods: chemical weathering index and elastic wave velocity defining potential rock durability. Proc. of Industrial Minerals and Building Stones. International Associated for Engineering Geology and Environment. İstanbul. Turkey.

Ceryan, Ş., Ceryan, N., Aydın, A., 2005. Determination of weathering in engineering time using interaction matrices. Proc. of 1st International Symposium on Travertine, Pamukkale University. Denizli. Turkey.

Ceryan, N., Usturbelli, Z.H., 2011. The estimating of durability and weathering state of tuff using rock durability indicators: a case study. In: SGEM2011 Conference Proceedings/ISSN 1314-2704, 1, 623–630.

Ceryan, S., Tudes, S., Ceryan, N., 2008. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. Environmental Geology. 55, 1319-1336.

Ceryan, N., 2014. Application of support vector machines and relevance vector machines in predicting uniaxial compressive strength of volcanic rocks. Journal of African Earth Sciences, 100, 634–644.

Ceryan, S., 2015. New weathering indices for evaluating durability and weathering characterization of crystalline rock material: A case study from NE Turkey. Journal of Afrıcan Earth Sciences, 103, 54-64.

Çebi, Z.H., 2008. KTÜ merkez kampusünde (Trabzon) çevre düzenlemesi için yapılan duvar yapıtaşlarının mühendislik zamanda ayrışma durumunun ve ayrışabilirliğinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Ergüler, Z.A., Ulusay, R., 2009. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, 355–370.

Fookes, P.G., Gourley, C.S., Ohikere, C., 1988. Rock weathering in engineering time. Quaterly Journal of Engineering Geology, 21, 33-57.

Fourmaintraux, D., 1976.Characterization of rocks; laboratory tests. Chapter IV in La Mecanique des roches appliquee aux ouvrages du genie civil by Marc Panet et all., Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris.

Franklin, J.A., Chandra, R., 1972. The slake durability test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9, 325-341.

Heidari, M., Khanlari, G.R., Momeni, A.A., Jafargholizadeh, H., 2011. The relationship between geomechanical properties and weathering indices of granitic rocks, Hamedan, Iran. Geomechanics and Geoengineering, 6(1), 59-68.

Hosking, J.R., Tubey, L.W., 1969. Research on low grade and unsound aggregates. TRRL Report 293, 1-30.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, Kozan Ofset, 628 p.

T.S.E., 1987. Tabii yapıtaşlarının muayene ve deney metotları. TS 699, UDK 6912, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Traverten Ocak Artıklarının Alternatif Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Investigation of the Usability of Travertine Quarry Wastes as Alternative Concrete Aggregate

S.B. Çelik[1,*], İ. Çobanoğlu[1], O. Çam[2], H. Etiz[1], M. Kurşun[1]

[1] Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Müh. Bölümü 20017 Kınıklı Denizli
[2] Akça Hazır Beton San. Tic. Ltd. Şti. 20150 Denizli
*(*scelik@pau.edu.tr)*

ÖZ: Denizli havzası, traverten çökeliminin görüldüğü dünya çapında önemli havzalardan birisidir. Traverten, çoğunlukla inşaat sektöründe kullanılmak üzere, açık ocak işletmeciliği ile bloklar halinde çıkarılmakta ve yurt içi ve dünya çapındaki piyasalara gönderilmektedir. Uzun yıllardan beri biriken ocak ve fabrika artıkları büyük miktarlara ulaşmış olup, alternatif olarak değerlendirilememektedir. Denizli bölgesindeki beton firmaları agrega ihtiyaçlarını çoğunlukla kireçtaşı ocaklarından patlatma ile olup, bu uygulama hem çevresel kirliliğe ve hem de maliyet artışlarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, Denizli bölgesinde agrega olarak kullanılan kireçtaşına bir alternatif olarak, sadece agrega boyutuna getirilme işlemine gereksinim duyulan traverten ocak artıklarının kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla kireçtaşı ve traverten malzemelerinden elde edilen agregalar üzerinde temel agrega deneyleri yapılmış ve küp beton örnekleri hazırlanmıştır. Beton örneklerinin 28 günlük tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri kireçtaşı ve traverten agregalı beton örnekleri için sırasıyla ortalama 44.05 ve 42.46 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler göz önüne alındığında, traverten agregalı betonun hedeflenen C30 sınıfı beton dayanım değerlerini sağladığı görülmüştür. Traverten ocak artıklarının alternatif beton agregası olarak kullanılabileceği, bu sayede ekonomik katkı ve çevresel açıdan da avantaj sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Traverten, Denizli, Ocak Artığı, Agrega

ABSTRACT: *The Denizli basin is one of the important travertine deposition basins around the world. Travertines, which are mainly used in construction industry, are being produced from open quarries as blocks and then exported to the markets both in Turkey and around the world. For a long time, quarry and factory wastes are reached to big amounts and cannot be used alternatively. In the Denizli region, concrete production companies provide their aggregate need from limestone quarries by blasting. This situation leads to both environmental pollution and increased cost. In this study, usability of travertine quarry wastes, which only need to bring aggregate size as an alternative to limestone, was investigated. Through the aim of this study, basic aggregate tests were carried out on the travertine and limestone aggregates and cubic concrete samples were prepared. Unconfined compression strength values of 28-day curing time were determined 44.05 and 42.46 MPa for limestone and travertine aggregated concrete, respectively. The test results suggest that strength values of the travertine aggregated concrete samples meet the C30 type concrete strength. Travertine quarry wastes around Denizli can be used as concrete aggregate alternatively, in this way economical contribution and also environmental advantages can be provided.*

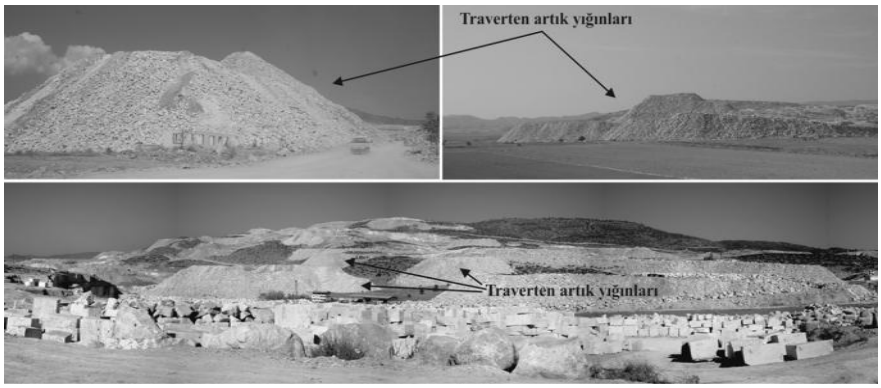
Keywords: *Travertine, Denizli, Quarry Wastes, Aggregate*

1. GİRİŞ

Agrega; doğal, yapay veya her ikisinden oluşan malzemenin genellikle 100 mm'ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmış veya kırılmamış tanelerinin yığını olarak tanımlanabilir. Agregalar, doğadan (akarsu yatakları, deniz kıyıları, çöl vb.) doğrudan doğruya taneli olarak temin edilebildikleri gibi, taş ocağı işletmeciliği ile kırılıp eleme işlemleri sonucunda da elde edilebilirler. Bu şekilde elde edilen taneli malzemeye "kırmataş", ince taneli malzemeye ise "kırma kum" denilmektedir (Arıoğlu vd., 1999). Beton yapımında çimento ve su ile birlikte kullanılan agregalar beton hacminin % 60-80'lik önemli bir kısmını kapsamaktadır. Agrega türü ve hacmi, üretilen betonun karışım oranları ve üretim

maliyeti üzerinde etkiye sahiptir (Smith ve Collis, 2001). Betonda kullanılacak agreganın fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması gerekmektedir. Bu temel özelliklerden bazıları şu şekilde sıralanabilir; özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme, Los Angeles aşınma dayanımı.Agregalar kullanım yerine göre istenen özel koşulları yerine getirmeli ve sert, temiz, yüksek dayanımlı ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Tabakalı ve boşluklu zayıf kayaçlardan elde edilen agregalar, betonun dayanımını düşürürler ve çevre koşullarına karşı dayanıklılığını azaltıcı yönde etki ederler. Günümüzde nüfus artışına paralel olarak büyüyen inşaat sektöründe daha fazla agrega kullanımına gereksinim duyulmaktadır. Bu durum, sınırlı doğal kaynakların daha hızlı tükenmesine ve aynı zamanda çevre açısından da olumsuz yönde etkilerin oluşmasına neden olmaktadır. Literatürde farklı türdeki doğal taşların beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelendiği çalışmalara rastlanmaktadır (örn.;Poitevin, 1999; Korkanç ve Tuğrul, 2004; Arslan ve Demir, 2006; Davraz ve Gündüz, 2006; Adom-Asamoah ve Afrifa, 2010; Yılmaz ve Tuğrul, 2012).Son yıllarda mermer ve traverten ocak artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliği bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Hebhoub vd. (2011), mermer artıklarının beton üretiminde doğal agrega yerine kullanımını araştırmışlar ve üretilen beton örneklerinin mekanik özellikler açısından standartları karşıladığını belirtmişlerdir. Ceylan ve Mança (2013), iri mermer agregası ile üretilen beton ile normal agrega kullanılarak üretilen beton örneklerinin sonuçlarını karşılaştırmışlar ve sonuçların birbirine yakın olduğunu ve mermer artıklarının beton agregası olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çobanoğlu vd. (2014), traverten artığını kullanarak elde ettikleri beton örneklerinin dayanımlarını incelemişler ve elde ettikleri sonuçlara göre traverten artıklarının beton agregası olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Elçi vd. (2015), kireçtaşı ocak artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğini incelemişler, kireçtaşı artıklarının normal dayanımlı beton üretiminde ince ve iri agrega olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Denizli havzası traverten oluşumlarının yaygın olarak bulunduğu ve uzun yıllardan beri yoğun bir şekilde açık ocak işletmeciliğinin yapıldığı dünyaca ünlü havzalardan birisidir. Bölgede Kaklık - Kocabaş, Honaz, Aşağıdağdere, Akköy, Karaçay ve Çivril alanları traverten blok üretiminin yapıldığı başlıca alanlardır (Çelik vd., 2014). Bu alanlardan en büyüğü ve aynı zamanda ocakların büyük bir kısmını içine alan Kaklık-Kocabaş alanıdır. Bölgede uzun süredir yapılan ocak işletmeciliğinin bir sonucu olarak farklı tane boyutlarından oluşan ocak artıkları büyük miktarlara ulaşmıştır. Artık yığınlarının depolandığı sahalar genellikle ocak yakınlarında olup,artık yığınları çok uzak mesafelerden bile fark edilebilecek boyutlara ulaşmıştır (Şekil 1).



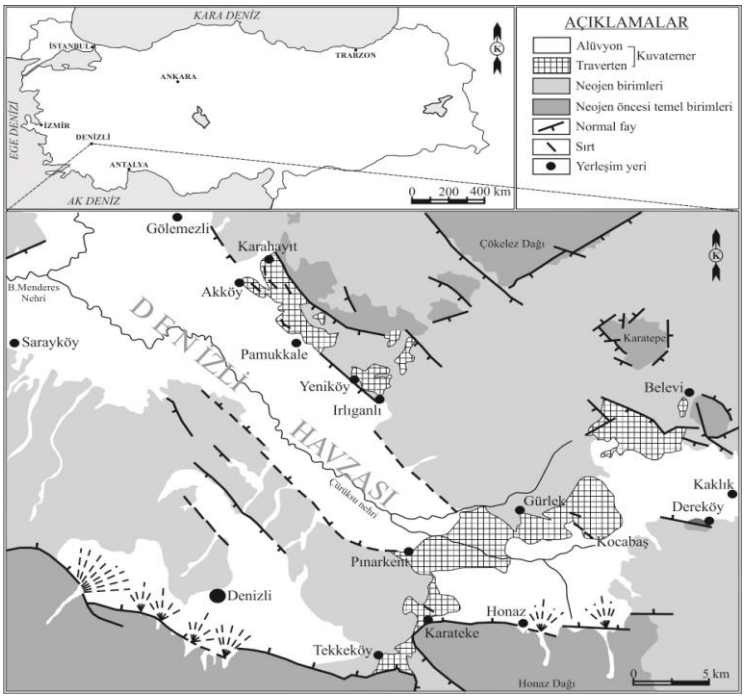
Şekil 1. Traverten artık yığınlarının görünümleri.

Bölgede artık depolama sahalarında birikmiş artık yığınlarının alternatif olarak değerlendirilmediği bilinmektedir. Bu çalışmada, traverten ocak artıklarının alternatif beton agregası olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Artıkların agrega olarak kullanılabilmesi durumunda, beton üretim maliyetlerinin düşmesi ve açılacak artık sahalarının çeşitli amaçlar için tekrar kullanılabilmesi ve bu sayede çevresel korumaya katkı sağlanabilecektir. Yıllık açığa çıkan artık miktarı üzerine net bir bilgi olmamakla birlikte, artıkların Denizli bölgesinin agrega ihtiyacını karşılayacak miktarda olduğu

düşünülmektedir. Çalışmanın amacı doğrultusunda, traverten artıklarından elde edilen agrega üzerinde temel agrega deneyleri yapılmış ve küp beton örnekleri hazırlanmıştır. Elde edilen beton örnekleri üzerinde 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda, tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla mevcut kireçtaşı ocaklarından patlatma yoluyla elde edilen kireçtaşı agregası kullanılarak hazırlanan beton örnekleri üzerinde de tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır.

2. BÖLGENİN JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE DENİZLİ TRAVERTENLERİ

Denizli havzası, 50 km uzunluğunda ve 25 km genişliğinde, her iki tarafı eğim atımlı normal faylarla sınırlı KB-GD uzanımlı bir çöküntü havzasıdır. Havza, Büyük Menderes ve Gediz graben sistemlerinin kesiştiği alanın doğusunda yer almaktadır (Şekil 2). Bölgede yaklaşık K-G yönlü açılma tektoniği hakimdir. Havzanın güney ve kuzeyindeki horst alanlarında Neojen öncesi temel kayaları yüzeylemektedir. Bu kayalar daha çok şist, mermer, kireçtaşı, ofiyolit ve evaporit türü kayalardan oluşan Menderes masifi kayalarıdır. Horst alanları arasındaki havza ise, Neojen-Kuvaterner yaşlı çökellerle örtülüdür (Şekil 2). Traverten oluşumları incelendiğinde, traverten kütlelerinin tercihli olarak normal faylara bağlı olarak çökeldiği gözlenmektedir. Travertenler, çökelim koşullarına bağlı olarak, anizotropik bir yapıya sahiptir. Bu durum arazi gözlemlerinde de kolaylıkla fark edilebilmektedir. Aynı ocak içerisindeki aynalarda bile travertenlerin renk, tabaka sürekliliği, yapısal değişiklikler gibi unsurlarının kısa mesafelerde değişiklik gösterdiği gözlemlenmektedir. Travertenler, değişik renklerde olmakla birlikte, daha çok beyaz, gri, bej ve sarı renkleri ile karakteristiktirler.Denizli travertenlerinin kuru koşullardaki tek eksenli sıkışma dayanımları taşın yapısal ve dokusal özelliklerine bağlı olarak çok geniş bir aralıkta (9.58-132.32 MPa) değişmekte olup, ortalama 88.78 MPa'dır (Çobanoğlu ve Çelik, 2012). Ortalama dayanım değeri göz önüne alındığında, ISRM (2007) tarafından önerilen kaya dayanımı sınıfına göre "sağlam kaya" sınıfındadır. Görünür porozite açısından ise, porozite değerleri 1.12 ile 38.41 arasında değişmekte olup, ortalama olarak % 8.43'dür (Çelik vd., 2014). Traverten genellikle inşaat sektöründe iç ve dış ortamlarda, taban ve duvarlarda yüzey kaplama taşı olarak hem yurt içinde ve hem de yurt dışında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2. Denizli havzasının yer bulduru ve jeoloji haritaları ve travertenlerin yayılımları (Özkul vd., 2002).

3. AGREGA ÖZELLİKLERİ VE BETON ÖRNEKLERİNİN HAZIRLANMASI

3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Beton bileşiminin saptanmasında, beton üretiminde ve malzemenin değerlendirilmesinde, agreganın fiziksel ve mekanik parametreleri önem taşımaktadır. Beton karışımında kullanılacak agreganın fiziksel ve mekanik özelliklerinin ilgili standartlarca belirlenen sınır değerleri aşmaması istenmektedir. TS 706 EN 12620+A1 (2009) standardı tüm beton tipleri için etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu >2.00 g/cm^3 olan taneleri beton agregası sınıfına sokmaktadır. Ayrıca beton karışımlarında kullanılacak iri, orta ve ince agregaların belirli sınır değerler içinde kalan tane boyu dağılımına sahip olmaları istenmektedir. Traverten ve kireçtaşı agregaları üzerinde yapılmış deneylerden elde edilen, birim hacim ağırlığı, gevşek, kuru ve doygun tane yoğunluğu ve su emme değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.TS 706 EN 12620+A1 (2009) standardı ince madde olarak 0.063 mm'den küçük tane boyundaki agregayı tanımlamaktadır. Bu değer Amerikan ve İngiliz standartlarında 0.074 mm olarak verilmiştir. Bu tane boyunun altındaki malzeme kil ve silt boyuna karşılık gelmekte ve agregada fazla oranda bulunmaları istenmemektedir. Agregalar üzerinde yapılan ince tane oranı tayini deneylerinden elde edilen değerlerin sınır değerlerin altında olduğu belirlenmiştir(Çizelge 1). Agregaların aşınma dayanımlarının belirlenmesi için TS EN 1097-2 (2010) standardına göre Los Angeles (LA)aşınma dayanımı deneyi yapılmıştır. Agregaların aşınma yüzdesi ne kadar küçük ise, parçalanmaya karşı dayanımının o kadar yüksek olduğu bilinmektedir. Aşınma kaybı olarak tanımlanan bu kayıp yüzdesinin, beton agregasında 100 devir için % 10'u, 500 devir için % 50'yi geçmemesi istenir. İlgili standart gereğince deneylerde 8 bilye kullanılmış ve 500 devir sonundaki aşınma değeri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Düşük aşınma dayanımı değerleri agregaların mekanik etkilere karşı dayanımlarının yüksek olduğuna işaret etmektedir (Yılmaz ve Tuğrul, 2012). Hazırlanan kireçtaşı ve traverten agregaları, fiziksel özellikler ve mekanik dayanım açısından öngörülen standart değerleri sağlamaktadır. TS 706 EN 12620+A1 (2009) ve TS EN 933-1 (2012) standartları farklı tane boyu gruplarına sahip agregalar için ağırlıkça yüzde geçen oranlarını tanımlamaktadır. Agregaların standartlarda belirtilen tane boyu dağılımlarına ait olmaları koşulunda betonda agrega olarak kullanılabileceği belirtilmektedir. Standartlar gözetilerek yapılan elek analizleri ile traverten ve kireçtaşı agregaları için tane boyu dağılımları belirlenmiştir.Çalışma kapsamında elde edilmiş agregaların tane boyu dağılım eğrileri ve ilgili standartça belirlenen sınır eğrileri Şekil 3'de verilmiştir.

Çizelge 1. Traverten ve kireçtaşı agregalarının özellikleri (Çobanoğlu vd., 2014'den derlenmiştir).

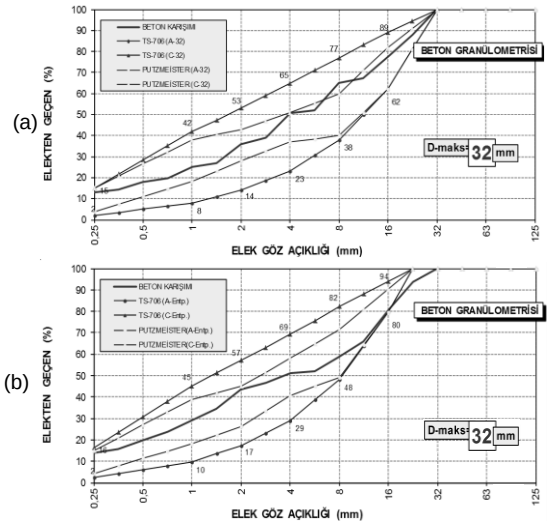
Agrega özelliği	Kireçtaşı agregası (mm)			Traverten agregası (mm)			İlgili
	0-4	4-11.2	11.2-22.4	0-4	4-11.2	11.2-	standar
Gevşek birim hacim ağ. (kg/m^3)	1740	1410	1418	1425	1143	1118	TS 706
Kuru tane yoğunluğu (kg/m^3)	2.66	2.63	2.51	2.57	2.43	2.33	EN
Doygun tane yoğunluğu (kg/m^3)	2.69	2.65	2.59	2.61	2.50	2.40	12620
Ağırlıkça su emme (%)	1.35	0.44	0.38	1.47	2.71	3.12	+A1
İnce tane oranı (%)	11.8	0.4	0.5	13.5	0.5	0.1	TS EN
Yassılık indeksi (%)	---	---	17.5	---	---	19.4	933-3
LA aşınma değeri (%)	---	---	24.24	---	---	31.68	TS EN 1097-2 (2010)

3.2. Agregaların kimyasal özellikleri

Traverten ve kireçtaşı örneklerinin kimyasal analizleri Spectro XEPOS-II PED XRF cihazı kullanılarak yapılmıştır. Agrega örneklerinin kimyasal analiz sonuçları % değerler olarak Çizelge 2'de verilmiştir. Kimyasal analiz verilerinden Ca değerleri oksit değeri şeklinde ifade edildiğinde, traverten için % 52.49 ve kireçtaşı için % 53.83 değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, kayaçların saf kireçtaşına oldukça yakın CaO değerleri sunduklarını ortaya koymaktadır. Hazır betonda agrega olarak kullanılacak kayaların MgO oranlarının < % 3 olması istenmektedir (Yılmaz vd., 2011). Bu açıdan, traverten ve kireçtaşı agregalarının istenen değerlere sahip oldukları görülmektedir.

Çizelge 2. Traverten (T) ve kireçtaşı (K) agrega örneklerine ait ana oksit element analiz sonuçları.

%	Na_2O	MgO	$Al2O_3$	SiO_2	CaO	MnO	$Fe2O_3$	TiO_2	K_2O	P_2O_5	SO_3
T	0.254	0.355	0.157	0.527	52.49	0.006	0.222	0.005	0.062	0.070	0.316
K	0.207	0.412	0.162	0.352	53.82	0.003	0.040	0.004	0.075	0.079	0.024



Şekil 3. Traverten (a) ve kireçtaşı (b) agregalarının tane boyu dağılım eğrileri.

3.3. Beton örneklerinin hazırlanması

Beton karışımının hazırlanması, karışım hesabına göre yapılmaktadır.Bu hesap; istenen kıvam, işlenebilme, dayanım, hacim sabitliği ve dayanıklılık veya aranan diğer özelliklere sahip en ekonomik betonu elde etmek amacı ile gerekli çimento, agrega, su, hava ve katkı maddesi miktarını belirleyebilmek için yapılan hesaplamadır (Şimşek, 2004). Ülkemizde beton karışım hesabı, TS EN 802 (2009)'a göre yapılmaktadır. Betonun bileşenlerinin beton imalatında kullanılmadan önce özelliklerinin saptanması gerekir. Malzemenin nitelikleri beton üretimi için uygun ise, bunların ne oranlarda kullanılacağının saptanması için bazı gereksinimlere ihtiyaç vardır. TS EN 206-1 (2002) standardı beton ile ilgili malzeme vetasarım özelliklerini tanımlamaktadır. Bu standarda göre beton 3 sınıfa ayrılmaktadır;

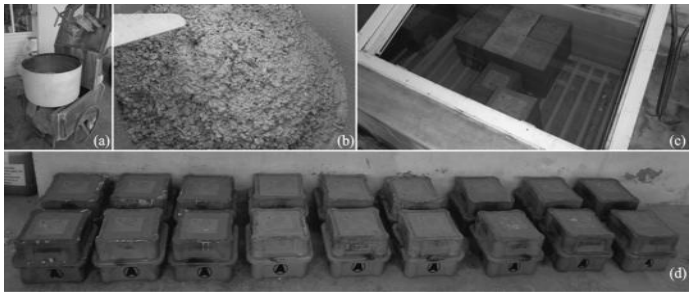
1- Normal Beton: Etüvde kurutulmuş durumdaki birim hacim kütlesi 2000ile 2600 kg/m^3arasında olan beton,
2- Ağır Beton:Etüvde kurutulmuş durumdaki birim hacim kütlesi 2600 kg/m^3'den ağır olan beton,
3- Hafif Beton:Etüvde kurutulmuş durumdaki birim hacim kütlesi 800 ile 2000 kg/m^3arasında olan beton.

Bu çalışma kapsamında agrega olarak kullanılabilirlikleri ortaya konulan traverten ve kireçtaşı agregası kullanılarak 15*15*15 cm boyutlu standart küp beton örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 4). C30/37 sınıfı normal beton hedef olarak seçilmiştir. TS EN 206-1 (2002)'de C30/37 beton sınıfı için küp örnek tek eksenli sıkışma dayanımı 37 MPa olarak tayin edilmiştir. Hazırlanan agregalar, 32 lt hacimli laboratuvar betoniyerinde (Şekil 4a) diğer bileşenlerle birlikte karıştırılarak beton örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 4b ve 4d). Karışımlarda maksimum tane çapı 32 mm ve karışımların su/çimento oranı 0.55 olarak seçilmiştir. Çizelge 3'de hazırlanan beton karışımlarında kullanılan bileşenler verilmiştir. Hazırlanan örnekler basınç dayanımı deneyleri yapılana kadar su havuzunda bekletilmiştir Şekil 4c).

4. BETON ÖRNEKLERİNİN DAYANIM ÖZELLİKLERİ VE GENEL DEĞERLENDİRMELER

Beton dayanımının en önemli ölçütlerinden biri tek eksenli sıkışma dayanımıdır. Bu özellik zamana bağlı değişim göstermekte olup, genelde 28 günlük dayanım olarak değerlendirilmektedir.

Laboratuvar ortamında elde edilen traverten ve kireçtaşı agregalı betonlar 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, TS EN 12390-3 (2010) standardına göre yapılmış ve yükleme hızı 0.5 MPa/s olarak seçilmiştir. Farklı kür süreleri sonunda elde edilmiş sıkışma dayanımı değerleri Çizelge 4'de sunulmuştur. Traverten agregalı betonun 28 günlük sıkışma dayanımı ortalama değeri 42.46 MPa ve kireçtaşı agregalı betonun ise 44.05 MPa olarak belirlenmiştir. Gerek traverten agregalı ve gerekse kireçtaşı agregalı betonlar için hedeflenen sıkışma dayanımı değerlerine ulaşılmış olup, birbirine yakın dayanım değerleri bulunmuştur. Elde edilen ortalama dayanım değerleri olarak Şekil 5'de verilmiştir. Beton örneklerinden ince kesitler yaptırılarak TS 10088 EN 932-3 (1997) standardına göre mikroskopta incelenmiştir (Şekil 6).



Şekil 4. Beton örneklerinin hazırlanma aşamalarından bazı görünümler.

Çizelge 3. Beton karışımlarında kullanılan ağırlıkça bileşenler.

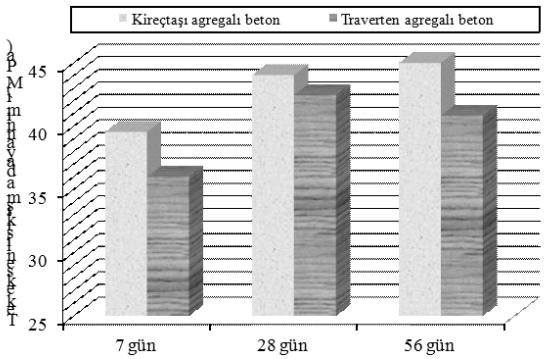
Malzeme(kg/m^3)	Traverten agregalı beton	Kireçtaşı agregalı beton
Çimento	300	300
Su	166	165
Kimyasal Katkı	4.1	3.9
Agrega (0 - 4 mm)	1007	974
Agrega (4 – 11.2 mm)	298	328
Agrega (11.2 - 22.4 mm)	587	620
Toplam Agrega	1892	1922

Çizelge 4. Traverten (T)ve kireçtaşı (K) agregalı betondanelde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri (Çobanoğlu vd., 2014).

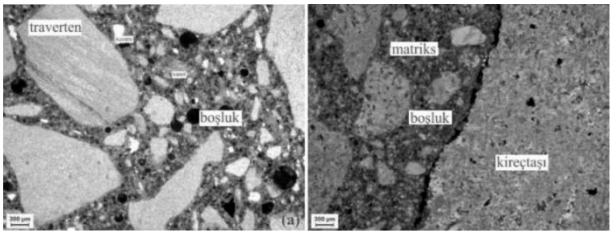
Agrega türü	Birim h.ağırlık (gr/cm³)	Süre (gün)	Yenilmeyükü (kN)	Dayanım (MPa)	Agrega türü	Birim h.ağırlık (gr/cm³)	Süre (gün)	Yenilme yükü (kN)	Dayanım (MPa)
T	2.27	7	738.1	32.80	K	2.39	7	885.3	39.34
T	2.28	7	853.6	37.93	K	2.43	7	886.2	39.38
T	2.29	7	838.8	37.28	K	2.41	7	898.2	39.92
T	2.28	28	957.0	42.53	K	2.39	28	985.7	43.80
T	2.29	28	960.8	42.70	K	2.42	28	979.9	43.55
T	2.28	28	948.1	42.14	K	2.41	28	1008.0	44.80
T	2.28	56	873.1	38.82	K	2.39	56	1031.1	45.82
T	2.29	56	931.5	41.40	K	2.39	56	1036.1	46.04
T	2.29	56	952.4	42.32	K	2.43	56	1071.1	47.60

Traverten agregaları açık kahverengi, kirli beyaz görünümleri ile belirgindir. Taneler ile matriks (çimento) malzemesinin iyi bağlandığı ve agregaların etrafında ince taneli matriks malzemesinin varlığı gözlenmiştir. Travertenin doğal yapısına bağlı olarak yer yer boşluklar bulunmakta olup, boşluk boyutlarının 50-100 μm arasında değiştiği gözlenmiştir. Kireçtaşı agregalı betonda ise, kireçtaşı agregaları ile matriks (çimento) malzemesi arasında oldukça keskin ve belirgin bir ara yüzeyin olduğu dikkati çekmiştir (Şekil 6). Kesit görüntüleri değerlendirildiğinde, tane bağlanmaları dışında büyük farklılıkların olmadığı görülmüştür. Traverten agregalarının matriks ile bağlanma derecelerinin daha iyi, buna karşılık matrikste boşlukların daha fazla, kireçtaşı agregalarında ise

agrega etrafında çizgi şeklinde boşluklu bir yapının varlığı ancak bağımsız boşlukların daha az olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Beton örneklerinin ortalama dayanım değerlerinin kür süresi ile değişimi.



Şekil 6. Traverten (a) ve kireçtaşı (b) agregalı beton örneklerinden hazırlatılmış ince kesitler.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Beton, inşaat sektörünün ana malzemelerinden biri olduğundan, üretim maliyetleri de ayrıca önemlidir. Beton üretim firmaları, çeşitli tasarımlarla daha ekonomik maliyette üretim yapmak üzere araştırmalar yapmaktadır. Toplam maliyet açısından değerlendirildiğinde, agrega birim fiyatının düşük olması beton maliyetinin de düşük olmasını sağlayacaktır. 2015 yılı birim fiyatları araştırılmış ve traverten agregasının 14 TL/ton, halen kullanılan kireçtaşı agregasının ise 16 TL/ton fiyatlarda olduğu belirlenmiştir. Denizli bölgesi için travrten atık sahaları ve kireçtaşı ocaklarının şehir içindeki herhangi bir üretim firmasına olan uzaklıklarının yaklaşık eşit olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, traverten agregasının elde edilmesi esnasında patlayıcı kullanılmaması bu agreganın biraz daha ekonomik olmasına olanak sağlamaktadır. Ekonomik açıdan bakıldığında, m^3 başına yaklaşık 1.89 ton agreganın kullanıldığı bu çalışma kapsamında traverten ve kireçtaşı agregalı beton üretiminde agrega maliyetleri sırasıyla 26.5 TL/ton ve 30 TL/ton olarak belirlenmiştir. Bu değerler ışığında, traverten agregalı betonun kireçtaşı agregalı betondan yaklaşık % 11.7 daha az maliyetli olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Beton örneklerinin 28 günlük tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri kireçtaşı ve traverten agregalı beton örnekleri için sırasıyla ortalama 44.05 ve 42.46 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler göz önüne alındığında, traverten agregalı betonun hedeflenen C30 sınıfı beton dayanım değerlerini sağladığı görülmüştür. İnce kesit incelemelerinde agrega tanelerinin çimento malzemesi ile oldukça iyi kenetlendiği ve travertenin farklı boyuttaki boşluklu doğal yapısının varlığı da gözlenmiştir. Denizli travertenlerinin ve traverten ocak artıklarının alternatif beton agregası olarak kullanılmasıyla ülke ekonomisine katkı ve bunun yanında çevresel açıdan da çok büyük faydalar sağlanabilecektir. Artık malzemelerin daha etkin değerlendirilebilmesi amacıyla yapılacakkapsamlı deneysel çalışmaların sadece bilimsel platformlarda değil aynı zamanda ilgili sanayi/endüstri kolları ile paylaşılmasıyla yaygın etkiye sahip sonuçların elde edilebilmesine olanak sağlanabilecektir.Daha sonraki çalışmalarda traverten artıklarının durabilitelerininde değerlendirildiği daha kapsamlı çalışmaların yapılması önerilir.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar, beton örneklerinin hazırlanmasında destek sağlayan Akça Hazır Beton A.Ş.'ne ve ince kesitlerin incelenmesinde katkı sağlayan, Dr. Tamer Koralay'ateşekkür ederler.

7. KAYNAKLAR

Adom-Asamoah, M., Afrifa, R. O., 2010. A study of concrete properties using phyllite as coarse aggregates. Materials and Design, 31, 4561–4566.

Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Yılmaz, A. O., 1999. Çözümlü Beton Agregaları Problemleri. Evrim Yayın Evi.

Arslan, M., Demir, İ., 2006. Kırşehir yöresi kırmataşlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(3), 489-497.

Ceylan, H., Mança, S., 2013. Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. SDÜ Teknik Bilimler Dergisi, 3(2), 21-25.

Chafetz, H.S., Folk, R.L., 1984.Travertines: Depositional morphology and the bacterially constructed constituents. Journal of Sedimentary Petrology, 54(1), 289-16.

Çelik, S.B., Çobanoğlu, İ., Atatanır, L., 2014. General material properties of Denizli (SW Turkey) travertines as a building stone. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,73, 825-838.

Çobanoğlu, İ., Çelik, S.B., 2012. Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey). Engineering Geology 129-130, 38–47.

Çobanoğlu, İ., Çelik, S. B., Çam, O., Etiz, H., Kurşun, M., 2014. Denizli bölgesi traverten artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. PAÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(3), 92-99.

Davraz, M., Gündüz, L., 2006. Isparta-Direkli köyü mevkii trakiandezit taşının beton agregası olarak değerlendirilmesi. IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu.

Elçi, H., Türk, N., İşintek, İ., 2015. Limestone dimension stone quarry waste properties for concrete in Western Turkey. Arabian Journal of Geosciences, DOI 10.1007/s12517-015-1838-z.

Hebhoub, H.,Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E., 2011. Use of waste marble aggregates in concrete. Construction and Building Materials, 25, 1167–1171.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J. A. (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. ISRM, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, 628p.

Korkanç, M., Tuğrul, A., 2004. Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate. Engineering Geology, 75, 291–307.

Özkul, M., Varol, B., Alçiçek, M. C., 2002. Denizli travertenlerinin petrografik özellikleri ve depolanma ortamları. MTA Dergisi, 125, 13-29.

Poitevin, P., 1999. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. Cement and Concrete Composites, 21, 89-97.

Smith, M. R.,Collis, L., 2001. Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications.

Şimşek, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık.

TS 10088 EN 932-3, 1997. Agregaların genel özellikleri için deney kısmı Bölüm 3: Basitleştirilmiş petrografik tanımlama için işlem ve terminoloji. TSE Yayını, Ankara.

TS 706 EN 12620+A1, 2009. Beton agregaları, TSE Yayını, Ankara.

TS EN 1097-2, 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, TSE Yayını, Ankara.

TS EN 12390-3, 2010. Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE Yayını, Ankara.

TS EN 206-1, 2002. Beton, özellik, performans, imalat, uygunluk.TSE Yayını, Ankara.

TS EN 802, 2009. Beton karışım tasarımı hesap esasları. TSE Yayını, Ankara.

TS EN 933-1, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - eleme metodu. TSE Yayını, Ankara.

Yılmaz, F., Koltka, S., Sabah, E., 2011. Emirdağ – Adaçal (Afyonkarahisar) kireçtaşlarının beton agregaları standardına uygunluğunun araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11, 1-12.

Yılmaz, M., Tuğrul, A., 2012.The effects of different sandstone aggregates on concrete strength. Construction and Building Materials. 35, 294-303.

Atık Cam ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Betonlarda Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali–silica Reactions of Concrete Produced by Using Waste Waste Glass and Blast Furnace Slag

C. Kılıçoğlu[1,*], S. Çoruh[2]

[1] *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kavak Meslek Yüksekokulu, Kavak, Samsun*
[2] *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, (*cemopanpe@hotmail.com)*

ÖZ: Türkiye, dünyada sanayileşmiş ilk G20 ülkeleri arasındadır. Sanayideki büyüme ise, çevre sorunlarını beraberinde getirmiştir. Bu durum, çeşitli katı atıkların yeniden değerlendirilme ihtiyacını doğurmuştur. Bu çalışmada, toz ve kum boyutlarına getirilmiştir. Atık camların alkali-silis reaksiyonu (ASR) genleşmesi incelenmiştir. Atık camlar cam tozu haline getirildikten sonra %5 ve %30 oranlarında çimento yerine kullanılarak hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ile genleşmeler ölçülmüştür. Atık camlar kum boyutuna (5-12 mm) getirilerek sırasıyla %50 ve %100 oranlarında kullanılarak ASR genleşmesi beton mikrobar deneyi ile ölçülmüştür (I-CA). Bunun yanı sıra, granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak ASR genleşme deneyleri beton mikrobar deneyi yapılmış ve sırasıyla %5 ve %15 oranında çimento yerine kullanılmıştır (I-GYFC). Sonuç reçete ise, (%5 cam tozu+%5 cam agrega +%5 GYFC) ve (%5 cam tozu+%5 cam agrega +%15 GYFC) ile hazırlanarak beton mikrobar deneyi ile ölçülmüştür. Cam agregaların yüksek oranda kullanımının ASR genleşmelerini arttırdığı, ancak cam tozlarının bunun aksine genleşmeyi engellediği tespit edilmiştir. Cam agregaların beton üzerindeki ASR genleşmesi, kullanılan GYFC ile kabul edilebilir oranlara getirilmiştir. Atık camların hazır beton sektöründe geri dönüştürüldükten sonra özellikle cam tozlarının ekonomik olduğu sonucuna da varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüşüm, Atık Cam, Alkali-Silika Reaksiyonu, Hazır Beton Sektörü

ABSTRACT: *Turkey is among the first G20 industrialized countries in the world. Due to the environmental and the economic reasons, there has currently been a growing trend for the use of the industrial waste by-products as supplementary materials. In this study, alkali-silica reaction (ASR) of waste glass as glass powder and as sand was investigated. After the waste glass into glass powder was used instead of 5% and 30% as cement replacement and using expansion measured accelerated mortar bar method. Waste glasses as glass powder was used reduced to 5-12 mm in proportions of 50-100% to AS, using expansion measured concrete mortar bar test. In addition, granulated blast furnace slag (GBFS) assay using ASR expansion concrete mortar bar test was made. Different mixtures with the granulated blast furnace slag portion ranging from 2.5 to 12.5% as cement replacement by weight of the mixture were tested. The other final mixture consist of (5% glass powder + 5% glass aggregate + 5% GBFS) and (5% glass powder + 5% glass aggregate + 15% GBFS). These results show that higher proportion usage of glass aggregate increases the dilation of ASR but conversely glasses dust reduces the dilation. ASR dilation of glass aggregates is reduced into acceptable proportion by adding granule blast furnace. After the recycling of waste glass powder in the ready-mixed concrete industry has been specifically analysized that it is economic.*

Keywords: *Recycling, Waste Glass, Alkali–Silica Reaction, Ready Mixed Concrete Industry*

1. GİRİŞ

Türkiye, dünyada sanayileşmiş ilk 20 ülkeden biridir (URL-1). Sanayideki büyüme ve beraberinde getirdiği çevre sorunları hızla devam etmektedir. 2014 yılında gayri safi yurt içi hasıla (GSYİH) içerisindeki inşaatın payı %6 olarak gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, Hazır Beton Birliği'ne (HBB) bağlı üyelerin tesislerinde tahmini olarak 107.000.000 m^3 beton üretilmiştir (URL-2). Cam üretiminde kullanılan en önemli girdiler, kum, soda, dolomit ve kuvars maddeleridir. Ülkemizin bu kaynaklar

açısından zengin olması nedeniyle, Türk cam sanayi % 98 oranında yerli hammadde kullanmaktadır. Ülkemiz cam sanayinin üretim kapasitesi yaklaşık 3.1 milyon tondur (URL-3). 1960'lardan itibaren cam atıklarının çimento ve beton sanayinde kullanımı çalışmaları yapılmaktadır (Pike vd., 1960; Phillips vd., 1972, Johnston, 1974). Bazı çalışmalarda ise, atık camlar normal ya da prekast elemanlar için ASR ve diğer mekanik özellikleri ile birlikte analiz edilmiştir (Chen vd., 2006; Topçu vd., 2007; Lam vd., 2007; İsmail ve Al-Hashmi, 2009; Dhir vd., 2010; Ling vd., 2011; Maier ve Durham, 2012). Camın beton üretiminde kum, ince çakıl veya çimento yerine dolgu malzemesi agrega yerine kullanılmasının nedeni, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin benzer olmasıdır (Limbachiya, 2008). Bu amaçla, yapılan çalışmada atık camlar (hiçbir şekilde cam işleme ya da cam fabrikaları tarafından kabul edilmeyen- kontamine beton içerisinde cam tozları (CT) ve cam agrega (CA) (5-12 mm) olarak kullanarak geri dönüştürülmesinin sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışmada; cam kullanılan betonlar da önemli bir durabilite sorunu olan Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) değerlendirilmiştir. Çalışmada cam agrega ve cam tozlarınının yanı sıra, Hazır Beton Sektöründe (HBS) cürufların yaygın olarak kullanılması nedeniyle puzolan olarak granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) da kullanılmıştır. ASR; reaktif silika formları içeren agregaların çimentodan kaynaklanan alkali oksitlerle reaksiyon oluşturması ve bunun sonucunda genleşebilme kabiliyetine sahip bir jelin meydana gelmesidir. Bu jel, su emdikçe hacmi daha çok artmakta betonda çatlamalara neden olmaktadır (Postacıoglu, 1987). Bu çatlaklar betonun dayanımını önemli oranda düşürür (Fookes, 1980; Postacıoğlu, 1987; Wakizaka, 1998). ASR etkisini azaltmanın yöntemlerinden biri puzolan kullanmaktır. Puzolanlar çimento harcının kirecini tutarak ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR'yi ve jel oluşumunu önler. Puzolanların bir diğer faydası ise sağladıkları geçirimsizliktir (Aşık vd., 2009; Lindgard, vd., 2012; Buck, 1987).

2. MALZEME

Bu çalışmada, beton üretiminde kullanılması düşünülen cam tozu, cam agregası ve GYFC kullanılarak ASR araştırılmıştır. Çizelge 1'de, çalışmada kullanılan grupların sembolleri verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan grupların sembolleri

Alt Gruplar	Semboller
Grup I Cam agrega (5-12 mm)	ASR-CA
Grup II Cam Tozu	ASR-CT
Grup III Granüle yüksek fırın cürufu	ASR-GYFC

2.1. Agregalar

ASR-CT, ASR-GYFC ve ASR-CA deneylerinde kullanılan agregaların kimyasal özellikleri Çizelge 2'de de verilmiştir. Bu değerler ASR deneylerinde kullanılan agregaların (kayaç) kimyasal özellikleridir. Bu agregaların reaktif olmadıkları belirlendikten sonra ASR deneylerinde kullanılmaktadır.

Çizelge 2. Deneylerde kullanılan agregaların kimyasal bileşimi (%).

	ASR-CT	ASR-GYFC	ASR-CA
CaO	50.1	49.01	48.1
SiO_2	0.67	19.02	0.71
$Fe_2 O_3$	0.47	2.61	0.49
MgO	0.35	1.02	0.32
Al_2O_3	0.3	5.08	0.3
SO_3	0.16	2.99	0.14
P_2O_5	0.12	0.11	0.15

2.2. Çimento ve Puzolanlar

Deneylerde kullanılan çimentoların tamamı CEMI tipidir. Deneylerde kullanılan çimentoların bileşimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan puzolan granüle yüksek fırın cürufudur.

Çizelge 3. Gruplarda kullanılan çimentonun ve puzolanın bileşimleri.

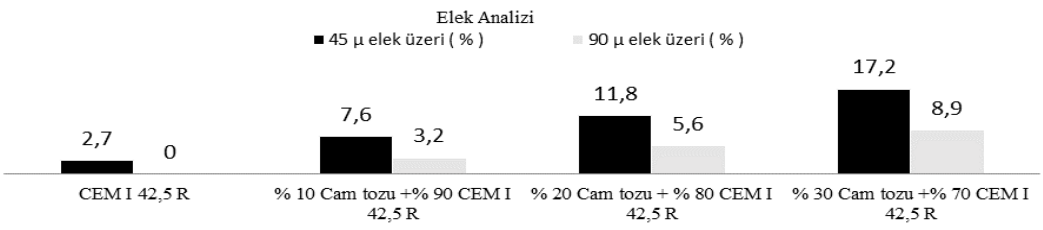
Kimyasal Bileşim						
Gruplar		I	II	III	Puzolan	Deney metodu
SiO_2 %		20,91	20,06	19,02	39.90	XRF
Çözünmeyen Kalıntı		2,09	0,3	0,3	0,28	TS EN 196-2
Al_2O_3 %		5,46	5,68	5,08	9.34	XRF
Fe_2O_3 %		3,76	2,23	2,61	1.15	XRF
MgO %		0,99	1,45	1,02	7.95	XRF
Na_2O %		0,41	0,29	0,29	0.2	XRF
SO_3 %		3,04	3,09	2,99	1.42	TS EN 196-2
CI %		0,0070	0,0064	0,0064	0.0062	TS EN 196-2
Minerolojik Bileşimler	C_3S	58,23	58,23	58,23		XRF
	C_2S	13,9	13,9	13,9		Hesaplama
	C_3A	11,28	11,28	11,28		Hesaplama
	C_4AF	6,78	6,78	6,78		Hesaplama

2.3. Cam

Bu çalışmada kullanılan camlar, tesislerde (Resman Cam San. AŞ vb.,) üretim esnasında hatalı ölçü alınarak yapılan imalat hataları olarak veya optimize edildiği halde ölçü dışındaki camların üretime ve işlemeye tekrar giremeyerek atık hale gelenler arasından seçilmiştir. Atık camlar ilk olarak 5-12 mm boyutlarında cam agregalarına (CA) dönüştürülmüştür. Daha sonra bu atık camlar değirmenlerde cam tozu (CT) haline getirilmiştir. Camların kimyasal bileşiminin analizi TS EN 572-2 (2006) ile EN 572-9 (2004)'ya göre yapılmıştır. Çalışmada agrega yerine kullanılan camların boyutları elek bileşimi yöntemiyle TS 706 EN 12620 (2003)'e göre yapılmıştır. Cam agreganın ve cam tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 4' de verilmiştir. Şekil 1'de cam tozlarının deneylerde kullanılan çimentolara göre tane boyu dağılımı eğrisi verilmiştir. Buna göre, cam tozları deneyde kullanılan çimentoya göre daha kalındır.

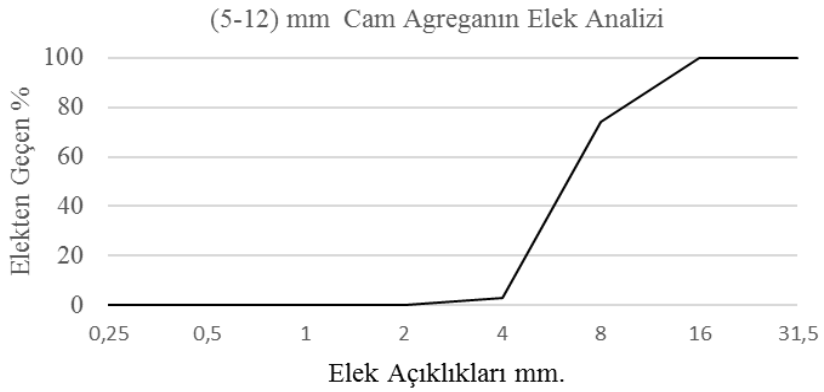
Çizelge 4. Deneylerde kullanılan camın kimyasal bileşimi.

Bileşenler	Cam (%)	Uygunluk Kriterleri
SiO_2	71,7	%69-%74
Al_2O_3	0,9	%0-%3
TiO_2	0,059	%0-%5
Fe_2O_3	0,106	%0-%5
MgO	4,20	%0-%6
CaO	8,52	%5-%14
Na_2O	13,77	%10-%16
K_2O	0,47	%0-%5
SO_3	0,24	%0-%5



Şekil 1. Deneyde kullanılan cam tozları ve çimentonun elek analizleri.

Cam agregalar kalınlıkları 6-8 mm olan camlardan seçilerek deneylerde kullanılmıştır. Bunun nedeni, atık camların yaklaşık küre şekline yakınlaştırarak karışım hazırlanırken kırılmama ve şekil indeksinde kabul edilir oranlarda olması gerektiğidir. Betonda kullanılabilecek agregaların TS EN 933-3 (2012)'e göre şekil indeksi deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre yassılık indeksi 11.85_%'dir. Bu değer kabul edilebilir sınırlar içindedir. Cam agregaların elek bileşimi sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan cam agregaların tane boyu dağılımı eğrisi

3. YÖNTEM

3.1. Cam Agregası Kullanılarak Alkali-Silika Reaksiyonu Genleşme Deneyleri

ASTM C1260 (2009) hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, ince agreganın reaktivitesini ölçmek için geliştirilmiştir. Beton mikrobar deneyinde ise, hızlandırılmış harç çubuğu yönteminden farklı olarak, ince agrega karışımda yer almamaktadır. Cam agregaların 5-12 mm seçilmesi nedeniyle bu boyuttaki malzemelerin genleşmesi beton mikrobar yöntemiyle belirlenmiştir. Beton mikrobar deneyinde ince agrega karışımda yer almamakta olup, sadece 4.75-12.5 mm boy aralığında agrega kullanılır ve hazırlanan karışım 40x40x160 mm boyutlarında kalıplara yerleştirilir. Agrega/çimento oranı 1 ve su/çimento oranı 0.33 olarak belirlenmiştir. Karıştırma işleminden sonra uygulanan kür işlemi, ASTM C1260 standardında (2009) belirtilen koşullarla aynıdır. Bu çalışmada numuneler sırasıyla 3, 7, 10, 20 ve 30 günlük deney süreleri için her biri 3 er örnek hazırlanarak ölçülmüştür. Deney için öngörülen süre 30 gündür. 30 günlük genleşme limitleri silisli kireçtaşları için %0.14 ve diğer agrega tipleri için %0.04 olarak belirlenmiştir (Grattan-Bellew, 2003). CA ile kontrol agrega ağırlıkça yer değiştirilmiştir. Çizelge 5'de ASR-CA için beton mikrobar deneyi karışım oranları verilmiştir.

Çizelge 5. Cam agrega için beton mikrobar deneyi karışım oranları.

	Kontrol	%50 Cam	%100 Cam
CEM I Çimento	900	900	900
Su	297	297	297
4.75-9.5 mm kireçtaşı (kuru)	450	225	0
9.5-12.5 mm kireçtaşı (kuru)	450	225	0
4.75-9.5 mm cam (kuru)	0	225	450
9.5-12.5 mm cam (kuru)	0	225	450

3.2 Cam Tozlarının Kullanılarak Alkali-Silika Reaksiyonu Genleşme Deneyleri

Çalışmada hızlandırılmış harç çubuğu deneyi (HHÇD) kapsamında ince cam tozlarının reaktivitesi, ASTM C1260 standardına (2009)'a göre 60 gün boyunca 25x25x285 mm boyutlarındaki harç örneklerin genleşmeleri incelenerek belirlenmiştir. Bu çalışmada da kontrol karışımında reaktif olmadığı için kırma kireçtaşı kumu tercih edilmiştir. Her karışımı temsil eden üç numune, 440 g çimento, 990 g agrega ve 207 g suyun (su/çimento=0.47) karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. ASTM C 1260 (2009)'da, 16 günlük genleşme oranlarına göre değerlendirme yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada Çizelge 6'da belirtilen karışım oranlarıyla hem kırma kum hem de cam tozları kullanılmıştır.

Çizelge 6. Cam tozu (HHÇD) deneyi karışım oranları.

Karışım Oranları			
	Kontrol	%5 Cam Tozu	%30 Cam Tozu
CEM I Çimento	400	380	280
Su	206.8	206.8	206.8
Cam Tozu	0	20	120
4.75-2.36 mm	99	99	99
2.36-1.18mm	247.5	247.5	247.5
1.18-100µ	247.5	247.5	247.5
600-300 µ	247.5	247.5	247.5
300-150 µ	148.5	148.5	148.5

3.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Alkali-Silika Reaksiyonu Genleşme Deneyleri

Bu grup çalışmada; ilk grupta %5 CT+%5 CA+%5 GYFC, ikincisinde ise %5 CT+%5 CA+%%15 GYFC kullanılmıştır. Deneyde GYFC'nun kullanılma nedeni, cam agregadan kaynaklanacak olan olası genleşmeye karşı puzolan kullanılarak negatif etkiyi azaltmaktır. Çizelge 7'deki karışım oranlarıyla beton mikrobar deneyi yapılmıştır.

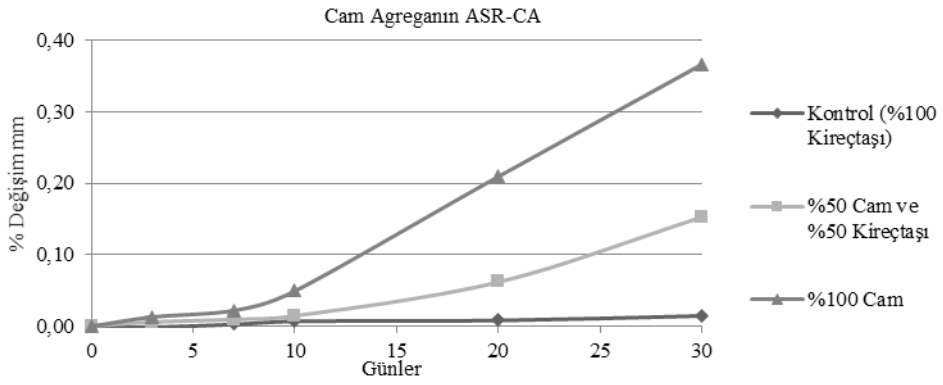
Çizelge 7. III-ASR-GYFC deneyi karışım oranları.

	Kontrol	%5 GYFC	%15 GYFC
CEM I Çimento	855	810	900
Cam tozu	45	45	45
GYFC	0	45	135
Su	297	297	297
4.75-2.36	99	99	99
2.36-1.18	247,5	247,5	247,5
1.18-100µ	247,5	247,5	247,5
600-300 µ	247,5	247,5	247,5
300-150 µ	148,5	148,5	148,5
4.75-9.5 mm cam (kuru)	23	23	23
9.5-12.5 mm cam (kuru)	23	23	23

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. ASR-CA Deney Sonuçları

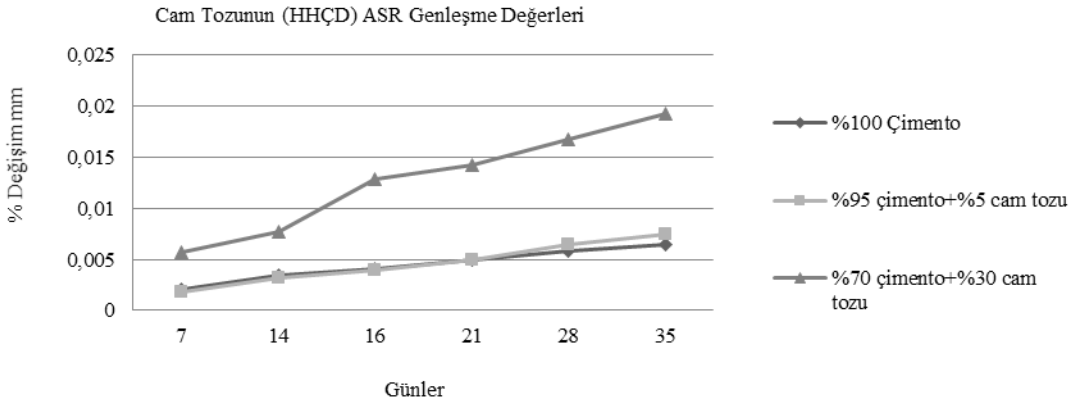
ASR-CA için 30 günlük değerler Şekil 3'de verilmiştir. Genleşmeler hem %50 hem de %100 cam agrega kullanıldığında sınır değerlerin üzerindedir. Bu nedenle cam agregaların (5-12 mm) kullanılması sakıncalıdır.



Şekil 3. Cam agregaların beton mikrobar (5-12 mm) ASR deney sonuçları.

4.2. ASR-CT Deney Sonuçları

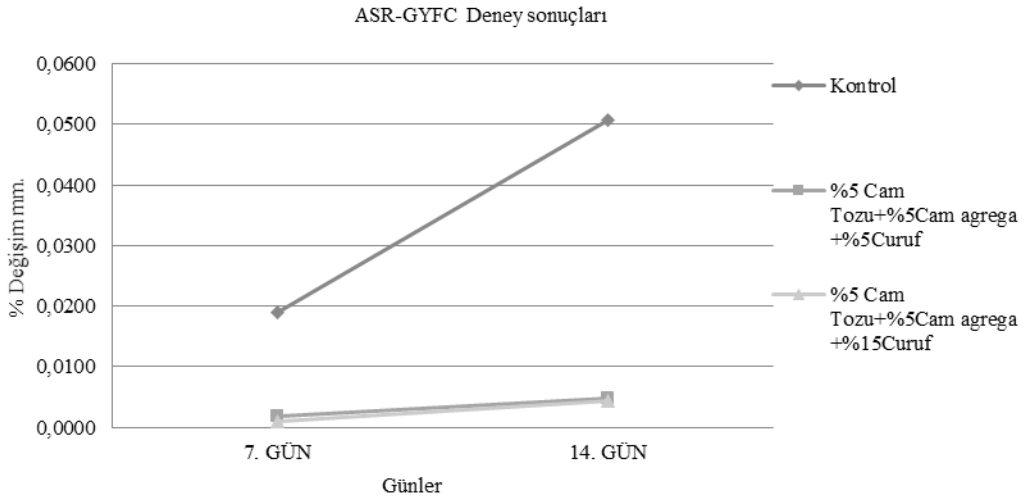
Şekil 4'de HHÇD sonuçları verilmiştir. Deneyde genleşme oranı %0.1'den düşük ise agrega "zararsız", %0.20 den büyük ise "potansiyel zararlı" kabul edilmekte, %0.10-0.20 arasında ise ek bilgi sağlayan yöntemlere başvurulmalıdır. Cam miktarının artmasıyla genleşmenin de arttığı gözlenmektedir. Bu sınıflandırmaya göre 35 inci gün sonunda dahi genleşmelerin %0.1'in altında olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Cam tozunun 35 günlük ASR değerleri.

4.3. GYFC Kullanılarak (ASR-GYFC) Yapılan Deneylerin Sonuçları

Bu grup çalışmada; öncelikle ASR-CA alınan sonuçların değerlendirilmesi sonucunda cam agregaların meydana getirdiği genleşmenin önlenmesi için GYFC kullanılmış, dolayısıyla oluşacak ASR'nin durabiliteye etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Şekil 5'de bu grup için yapılan beton mikrobar deneyi sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre; 1. gruptaki (%5 GYFC+ %5 cam tozu+%5 cam agrega) ile hazırlanan örnek, cam agreganın meydana getirdiği genleşmeyi önlediği açıktır. Bunun yanı sıra, 2. grupda ki (%15 GYFC+ %5 cam tozu+%5 cam agrega) örnekte ise; agreganın potansiyel olarak reaktif sayılabilmesi için gerekli olan limiti %0.10'nun altında değerler almıştır. Bu sonuçlara göre %5 GYFC ile %15 GYFC arasında ise önemli bir fark gözükmemektedir.



Şekil 5. ASR-GYFC deney sonuçları.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, atık camların betonda önemli bir durabilite sorunu olan ASR genleşme değişimleri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

i. Betonda agrega (5-12 mm) ile yer değiştirilen cam agregalarda yapılan alkali-silika reaksiyonu genleşme değerlerinin ölçülmesi için yapılan beton mikrobar deney sonuçlarına göre genleşmeler (ASR-CA) belirlenen limit değerlerin üzerinde ölçülmüştür. Bu gerekçelerle yalnızca cam agregalar kullanılarak üretilen betonlarda genleşmeler ve çatlaklar oluşturacağı için kullanımı uygun değildir.

ii. Cam tozu kullanılarak (ASR-CT) yapılan HHÇD deney sonuçlarına göre limit değerlerin üzerinde genleşmeler görülmemiştir. Bu nedenle geri dönüştürülen atık camlar toz haline getirilerek (%5 ve %30) beton içinde kullanılabilirdir.

iii. Cam tozunun ve cam agreganın %5 ve GYFC nun cam agreganın ise ise %5ve %15 alınarak yapılan ASR genleşme deneyleri deney sonuçlarına (ASR-GYFC) belirlenen limit değerlerin altında genleşmeler görülmüştür. Cam tozları ve GYFC nın birlikte cam agregaları ile kullanılarak cam agreganın meydana getireceği ASR genleşmeleri önlenmiş olmaktadır.

iv. Atık camların betonda her iki boyutta (cam tozu, cam agrega (5-12mm) ki kullanımı Hazır Beton Sektöründe yaygın uygulama olanaklarını sağlamış olacaktır.

v. $1m^3$ betonda yaklaşık olarak 1.8 ton agrega (kum, çakıl) kullanılmaktadır. Bölgelere göre değişmekle beraber agreganın fiyatı 6 TL/ton dur. Ülkemizde Hazır Beton Birliği verilerine göre 2014 yılı tahmini olarak çeşitli sınıflarda 107.000.000 m^3 beton satışı olmuştur. Agrega ekonomisi ülkemiz için 1.155.600.000 TL.dır. Bu üretimde %5 lik atık camın toz halinde kullanımı yaklaşık 57.780.000 TL. ekonomik avantaj sağlayacaktır.

vi. Atık camların Hazır Beton sektöründe kullanımı için iki yol vardır. İlki atık camların kullanılan tesislerde hazırlanmasıdır. Bu yöntem tesislerde yeni bir üretim şeklidir. Hazır Beton Tesislerinde tüm çalışanlarının dikkati basitçe üretim, kontrol, sevkiyat ve betonun kalıplara yerleştirilmesi üzerindedir. Diğer bir üerimin bu yapının içine eklenmesi son derece zordur. Diğer bir yöntem ise aracı firma (Hurdacı) eliyle toplanan camların H.B.T. paketlenmiş olarak ulaştırılmasıdır. Bu yöntem hem ekonomiye yeni bir iş kolu sağlar hem de ekonomik olarak daha uygundur. Buna benzer örnek ise beton içine üretim aşamasında paketler halinde taze betonun içine eklenen çelik tellerdir.

6. KAYNAKLAR

ASTM C1260-01,2003, American Society of Testing and Materials (2003) Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, 04(02).

Aşık, İ., Şen, H., Ergintav, Y., Ünsal, A., Şentürk, E., Bayrak, E., 2004, "Alkali Agrega Reaksiyonu Yönünden Zararlı Olan Bir Ocağın İyileştirilmesi", Beton 2004, İstanbul, 2004.

Buck, A.D., Mather, K., 1987., Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction in Concrete, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures Lab., Accession no ADA178479, 69 p.,

Chen, C.H., Huang, R., Wu, J.K., Yang, C.C., 2006. Waste E-glass Particles used in cementitious mixtures. Cement and Concrete Research, 36, 449–56.

Dhir R, Dyer T, Tano A, Cui Y.,2004, Towards maximizing the value and sustainable use of glass. Concrete ;38(1):38–40.

EN 572-9, 2004," Glass in building. Basic soda lime silicate glass products Evaluation of conformity and Product standard. British Standard European Norm".

Fookes, P.G., 1980,. An İntroduction To The Influence Of Natural Aggregates On The Performance And Durability Of Concrete, Quarterly Journal Of Engineering Geology, 123, 207-229.

Ismail, Z.Z., AL-Hashmi, E.A., 2009. Recycling of wasteglass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. Waste management, 29, 655-659.

Johnston, C.D., 1974. Waste glass as coarse aggregate for concrete. J Test Eval, 5, 344–50.)

Lam, C.S., Poon, C.S., Chan, D.,2007. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR considerationCement & Concrete Composites 29, 616–625.

Lindgard, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Ronning, T.F., Thomas, M.D.A., "Alkali-Silica Reactions (ASR): Literature Review on Parameters Influencing Laboratory Performance Testing", Cement and Concrete Research, 42, pp. 223-243, 2012.

Limbachiya., M., C., 2008. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. Construction and Building Materials, 23, 1078–1083.

Ling, T.C., Poon, C.S., Kou, S.C., 2011. Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars, Cement & Concrete Composites, 33, 848–854.

Maier , P.L., Durham, S.A., 2012. Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. Construction and Building Materials, 29, 428–437.

Pike, R.G., Hubbard, D., Newman, E.S., 1960. Binary silicate glasses in the study of alkaliaggregate reaction. High Res Board Bull, 275, 39–44.

Phillips, J.C, Cahn, D.S., Keller, G.W., 1972. Refuse glass aggregate in portland cement. In: Proceedings of 5th Mineral Waste Utilization Symposium, Chicago, II., II, T. Research Institute, p. 385–90.

Postacıoglu, B., 1987. Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 404 S.

Topcu, İ.B., Boğa, A.R., Bilir, T., 2007.Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glassas fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3,Waste Management, 28, 878-884.

TS EN 933-3, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 3: Tane ekli tayini yassılık endeksi", 11 s, TSE Yayını, Ankara, 2012

TS EN 572-2 TSİ, 2006, EN 572-1'de yapılarda kullanılan float cam olarak tarif edilen camın boyut ve asgari kalite özelliklerini (optik ve görünüş kusurları yönünden) kapsar, Ankara, Türkiye.

URL - 1. http://www.imf.org/external/np/g20/pdf/110411.pdf

URL - 2. http://www.thbb.org/media/1952/20132014hazirbetonsektoruverileri.pdf 2013 - 2014 yılı hazır beton sektörü istatistikleri

URL - 3 http://sgm.sanayi.gov.tr/Files/Documents/cam-sektor-raporu-04042012113317.pdf (ziyaret tarihi 16/4/2013)

Sondaj ve Kimyasal Analiz Verileri Kullanılarak Bir Kireçtaşı Ocağının 3-Boyutlu Cevher Modellemesi

3D Orebody Modeling of a Limestone Quarry Using Borehole and Chemical Analysis Data

Ş. Aliyazıcıoğlu[1,*], K. Karaman[1], F. Cihangir[1], B. Erçıkdı[1], A. Kesimal[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon*
*(*aliyazicioglu@ktu.edu.tr)*

ÖZ: Trabzon Çimento Fabrikası'na ait Taşönü (Araklı-Trabzon) endüstriyel hammadde ocağın da 2005-2007 yılları arasında üç kez düzlemsel kayma meydana gelmiştir. Bu kaymalar sonrasında ocaktan malzeme temini durma noktasına gelmiştir. Bu nedenle heyelan sahasının kuzeyinde 5 adet araştırma sondajı yapılmıştır. Sondaj verileri 3-boyutlu olarak Geovia Surpac paket programında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hammadde içeriğindeki CaO (kalsiyum oksit) miktarı üç ayrı sınıfta (düşük, orta ve yüksek) modellenerek cevher modeli ortaya konulmuştur. Bu çalışma, heyelan sahasında üretim yapılması durumunda, kireçtaşı cevherinin toplam miktarı, CaO içerik modeli ve kazının ocağın hangi bölgesinden başlamasının daha ekonomik olacağını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Taşönü (Araklı-Trabzon) Kireçtaşı Ocağı, Cevher Modelleme, CaO Miktarı

ABSTRACT: *Belonging to Trabzon Cement Factory, in the Taşönü (Trabzon–Araklı industrial raw material area, 3 planar failures occurred between 2005 and 2007 years. After these failures, raw limestone supply from the quarry came to a standstill. Therefore, 5 different exploratory drillings were bored north side of the landslide area. Drilhole data is evaluated in 3 dimensional (3D) model by Geovia Surpac program. In the scope of study, the content of CaO (calcium oxide) in limestone ore is modeled in 3 different classes (low, medium and high) as an orebody. This study indicates total amount of limestone orebody model, CaO content model and which region in topography would be more economical in order to start the reproduction in the limestone quarry.*

Keywords: *Taşönü (Araklı-Trabzon) Limestone Quarry, Orebody Modeling, CaO Content*

1. GİRİŞ

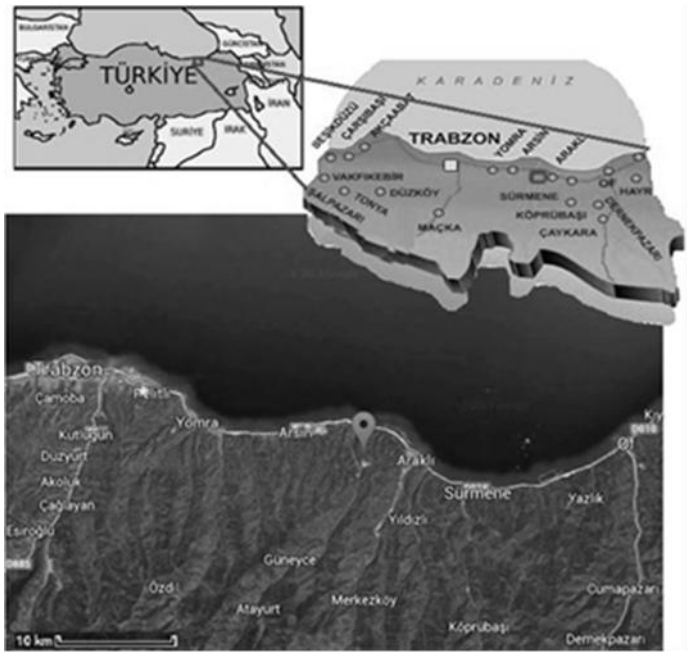
Ülke ekonomisine büyük katkılar sağlayan en önemli sanayi ürünlerinden biri çimentodur. Çimento genel olarak, doğal kireçtaşı ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı madde olarak tanımlanmaktadır. Hammadde kalitesi ve üretimi çimento fabrikalarının ekonomisinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak hammadde sahalarında meydana gelen kütle hareketleri (şev duraysızlıkları), kaliteli cevher miktarının azalması veya bitmesi gibi problemlerden dolayı üretim miktarı iyice azalmakta, hatta durmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için problemli sahada araştırma sondajları yapılmakta (Aliyazıcıoğlu vd., 2015) veya şev duraylılığı açısından sahanın mevcut durumu gözden geçirilmektedir (Karaman vd., 2013). Günümüz teknolojisinde, çimento hammaddesi üretiminin optimizasyonu için hammadde ve ocak geometrisinin 3 boyutlu (3D) olarak modellenmesi kaçınılmaz bir gerçektir. Bir maden yatağının değerlendirmesinde en önemli işlemlerden biri sondaj verilerinin doğru ve hassas bir şekilde modellenerek cevherin 3D olarak ortaya konulabilmesidir. Bir projenin başlangıcında yapılacak hataların en aza indirilmesi için rezerv miktarının ve tenör dağılımının doğru olarak belirlenmesi ve kalite dağılımının bilinmesi ekonomik olarak büyük önem taşımaktadır. Maden projesinin bilgisayar destekli olarak planlanması ve modellenmesi sayesinde sonuca klasik yöntemlere göre daha hızlı ve daha çabuk ulaşılabileceği gibi, yeni verilerle güncelleme olanağı da önemli bir avantaj oluşturmaktadır (Cebesoy, 1995; Selimoğlu, 2004). Bu çalışmada 3D modelleme tekniklerini etkin bir şekilde ortaya koyan Geovia Surpac 6.2 paket programından yararlanılmıştır. Surpac programı (URL-1, 2015) ile topoğrafik haritanın 3 boyutlu yüzey modeli haline getirilmesi, sondaj karotlarının modellenerek

görselleştirilmesi ve yüzey modeli ile birleştirilmesi, veritabanı oluşturularak jeoistatistiksel analizlerin yapılması, sondajlardan cevher yatağı modelleme, blok modelleme, yeraltı ve açık ocak madenciliği modellenmesi gibi işlevler yerine getirilebilmektedir (Aliyazıcıoğlu, 2012). Cevherin yüzeye yakın ya da yüzlek vermiş noktalarını tespit etmek, cevheri işlemede hangi açık ocak madenciliği yönteminin uygulanacağını belirleme adına önemlidir (Kennedy, 1990). Ayrıca, iyi yapılmış bir modelleme cevherin kestiriminde güvenilir bir yaklaşım sergilemesi yanında, rezervi en iyi şekilde temsil etmelidir (Arik, 1990).

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Trabzon Çimento Fabrikası'nın hammadde ihtiyacını karşıladığı Taşönü (Araklı) kireçtaşı ocağında yapılmış olan araştırma sondajları 3 boyutlu olarak değerlendirilmiştir. 2005-2007 yılları arasında 3 kez düzlemsel kaymanın meydana geldiği ocakta, kireçtaşı temini durma noktasına gelmiştir. Üretimin kontrollü bir şekilde devam etmesi için heyelan sahasının kuzeyinde 5 adet karotlu araştırma sondajı yapılmıştır. Çimento üretiminde hammaddenin kimyasal içeriği ve miktarının doğru olarak modellenmesi, üretim planlamasında etkili olmakta ve maliyetleri azaltmaktadır. Bu kapsamda çalışma sahasındaki araştırma sondaj bulguları dikkate alınarak çimento hammaddelerinden biri olan kireçtaşı biriminin yayılımının Surpac programı kullanılarak 3D modellemesi yapılmış ve kireçtaşı cevherinin toplam rezervi belirlenmiştir. Ayrıca, Surpac programında 3 boyutlu yapılan modellemede kireçtaşı cevheri CaO içeriğine göre kendi içinde düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı gruba ayrılmıştır. Sonuç olarak, çalışma sahasında üretim yapılması durumunda çimento hammaddesi olan kireçtaşı cevherinin toplam miktarı ve kazının hangi taraftan başlamasının ekonomik olacağı ortaya konmuştur.

2. ÇALIŞMA SAHASININ ÖZELLİKLERİ

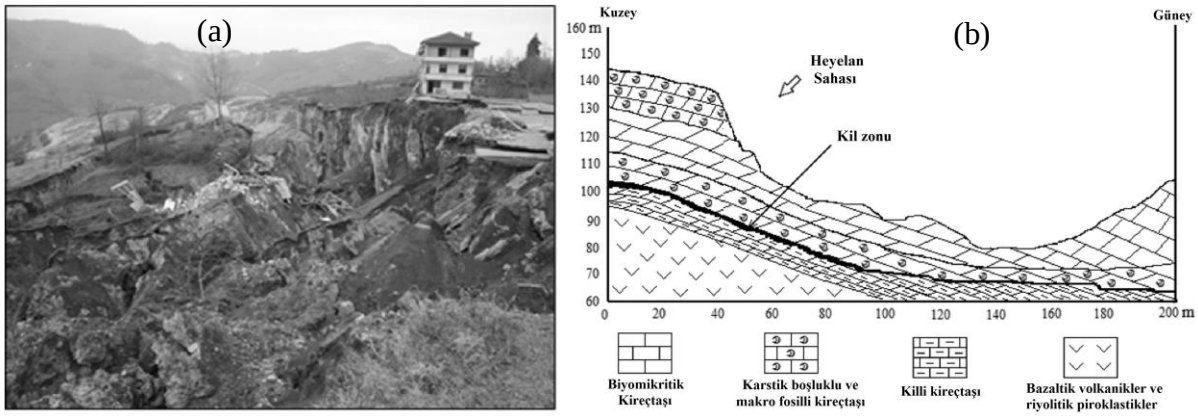
Bu çalışmanın kapsamını oluşturan kireçtaşı ocağı Trabzon ili Araklı ilçesi Taşönü köyünde bulunmaktadır (Şekil 1) (Aliyazıcıoğlu vd., 2015). Çalışma sahasında Kireçhane Formasyonuna ait biyomikritik kireçtaşı, makro fosilli boşluklu kireçtaşı, kumlu-killi kireçtaşı gibi çeşitli kireçtaşları bulunmaktadır (Karaman vd., 2013).



Şekil 1. Çalışma sahası yer bulduru haritası (Aliyazıcıoğlu vd., 2015)

Çalışma sahasında 2005-2007 yılları arasında 3 ayrı düzlemsel kayma meydana gelmiştir (Şekil 2) (Ceryan, 2009; Karaman vd., 2013). Yenilmelerin, kalınlığı yer yer 100 cm'ye ulaşan ve eğim açıları

20–30° arasında değişen bir kil tabakası üzerinde gerçekleştiği belirtilmiştir (Ceryan, 2009). Kil tabakası ve heyelan sahasındaki şevlerin eğim yönlerinin aynı olması kaymayı kolaylaştıran en önemli sebeplerden biri olarak gösterilmesinin yanında (Ceryan vd., 2009), ocakta şev eğimlerinin düzensiz ve dike yakın olması, kontrolsüz yapılan patlatmalar ve bölgeye aşırı miktarda yağış düşmesi de şev duraysızlığını tetikleyici etkenler olarak belirtilmiştir (Erçıkdı vd., 2006).



Şekil 2. Heyelan sahasından bir görünüm (a) ve jeolojik enine kesit (b) (Karaman vd., 2013).

3. SONDAJ ÇALIŞMALARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

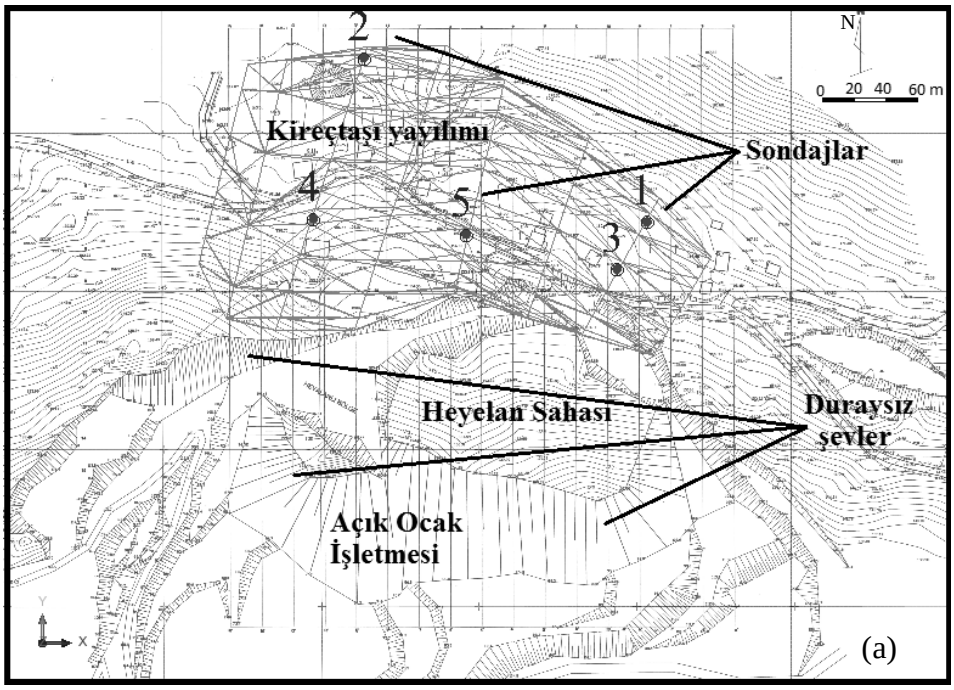
Üretimin emniyetli ve ekonomik bir şekilde yapılması için, heyelan sahasındaki şevlerin duraylılık açısından bir risk içerip içermediği ve cevher varlığının hangi kalitede olduğunun araştırılması önemli olmaktadır. Bu amaçla, heyelan sahasının kuzey ve kuzeybatısına denk gelen bölgesinde 5 adet araştırma sondajı yapılmıştır. Sondajların derinliği, başlangıç ve bitiş metrajları ile kireçtaşının kalınlığı Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'den de görüldüğü gibi, SK-4 ve SK-5 sondaj noktalarında diğer sondaj noktalarına nazaran daha kalın kireçtaşı kesilmiştir.

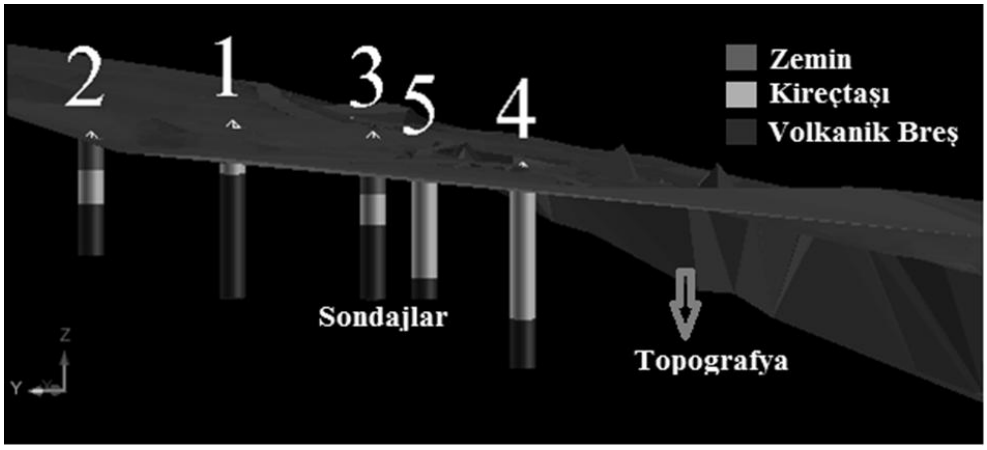
Çizelge 1. Araştırma sondajları derinlik ve kalınlık verileri

Sondaj No.	Sondaj derinliği (m)	Kireçtaşı başlangıç derinliği (m)	Kireçtaşı bitiş derinliği (m)	Kireçtaşı kalınlığı (m)
SK-1	42	9	11.5	2.5
SK-2	29	8.75	16.5	7.75
SK-3	40	14	21.5	7.5
SK-4	49	2	37	35
SK-5	33	3	28	25

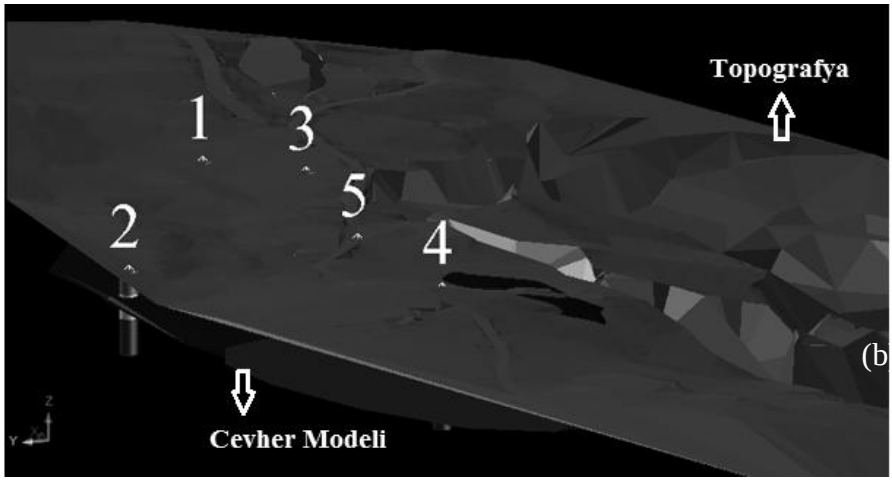
Kireçtaşının yayılımı, sondaj noktaları ve duraysız şevlerin konumu Şekil 3a'daki topoğrafik haritada gösterilmiştir. Elde edilen sondaj bilgileri, kireçtaşı oluşum metrajları ve koordinat bilgileriyle birlikte veri tabanı oluşturularak Surpac programında modellenmiştir. Ayrıca, sahaya ait düzlemsel kayma sonrası değişen topografya, topoğrafik haritada eş yükselti eğrileri kullanılarak 3 boyutlu hale getirilmiştir (Şekil 3b).

Sondaj verileri değerlendirilerek yapılan 3 boyutlu modellemeden sonra, heyelan bölgesinin kuzeyinde kalan bölge dikkate alınarak işletme sahasının topoğrafik harita sınırları içindeki cevher sınırı çizilerek sondaj loglarından kesitler alınmış ve kesitler arası üçgenleme yöntemiyle 3 boyutlu cevher modeli oluşturulmuştur (Şekil 4). Cevher modeli ile topoğrafik harita bir araya getirildiğinde, 4 numaralı sondajın bulunduğu bölgede cevherin yüzeye çıktığı gözlemlenmiştir.





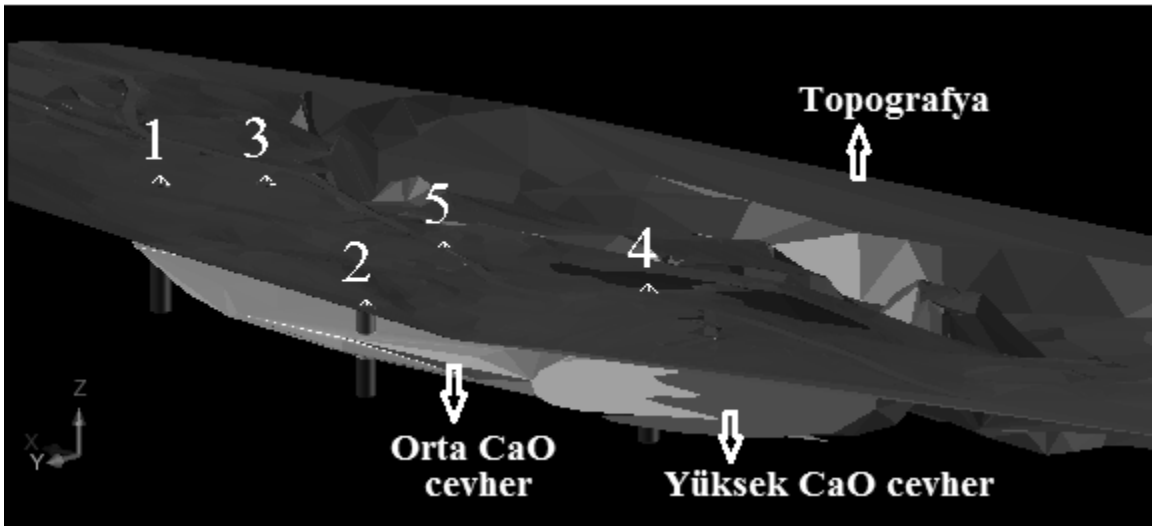
Şekil 3. Topoğrafya, sondajlar ve litoloji bilgileri



Şekil 4. Topoğrafya ve sondajlarla birlikte cevher modeli

Ayrıca, sondajlardan alınan kireçtaşı karot örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarında elde edilen CaO(%) değerlerine göre cevher, 15-30 (düşük), 30-45 (orta) ve 45-60 (yüksek) aralıklarda olmak üzere, üç ayrı gruba ayrılmıştır.

Bu veriler ışığında üç ayrı cevher modeli oluşturulmuştur. Cevher modelinin yandan görünümü Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde kırmızı renk yüksek CaO içeriğini (heyelan sahasının kuzeybatısı) sarı ile gösterilen bölge ise orta içeriğe sahip CaO değerlerini göstermektedir. Oluşturulan 4 ayrı cevher modelinin (toplam, düşük, orta ve yüksek CaO içeriğine göre modeller) hacim hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan hacimleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 5. CaO içeriğine göre ayrı ayrı oluşturulmuş cevher modeli

Çizelge 2. CaO içerikli cevher miktarları ve toplam cevher miktarı

CaO içeriği (%)	Sınıflandırma	Cevher miktarı (m^3)
15 – 30	Düşük CaO	2974
30 – 45	Orta CaO	283,992
45 – 60	Yüksek CaO	900,601

Araştırma sondajlarına göre yapılan modelleme sonucunda heyelan bölgesinin kuzeyinde yaklaşık %53'ü yüksek CaO ve %32'si orta CaO içeriğine sahip toplamda 900 bin metreküp kireçtaşı rezervi hesaplanmıştır. Ayrıca, yüksek CaO içerikli cevherin 4 ve 5 numaralı sondaj kuyuları bölgesinde yoğunlaştığı, bu bölgenin heyelan alanının kuzeybatısında ve yüzeye yakın olması sebebiyle ocakta üretime devam edilmesi durumunda, bu bölgede açık ocak üretimi yapılması önerilmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki, rezervi hesaplanan alanın iyileştirme yapılmadığı sürece (şev duraylılığı açısından) gelecekte meydana gelebilecek olası duraysızlıklardan etkilenebileceği açıktır. Bu nedenle heyelan bölgesinin üretime geçilmeden önce duraylılığı kontrol altına alınmalıdır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada heyelan sahasının kuzeyinde yapılan 5 adet araştırma sondaj bulguları 3-boyutlu olarak Gemcom Surpac paket programında değerlendirilmiş ve farklı miktarlarda CaO (kalsiyum oksit) içeriği belirlenmiştir. Sondajların değerlendirilmesiyle, hammadde CaO içeriğine göre 3 farklı sınıfa ayrılmıştır. Buna göre; ocakta kaliteli cevher miktarı %53, orta kalitedeki cevher ise % 32 civarında olup, toplam 900 bin metreküp kireçtaşı rezervi hesaplanmıştır. Ayrıca, yüksek CaO içerikli cevhere heyelan alanının kuzeybatısında 4 ve 5 numaralı sondaj kuyularında rastlanılması ve cevherin yüzeye yakın olması sebebiyle bu bölgede açık ocak üretiminin yapılması tavsiye edilmiştir.

Bu çalışma, heyelan sahasında üretim yapılması durumunda, kireçtaşı cevherinin toplam miktarı, CaO içerik modeli ve kazının ocağın hangi bölgesinden başlamasının daha ekonomik olacağını ortaya koymuştur. Ayrıca, ocakta üretime devam edilmesi durumunda öncelikli olarak heyelan bölgesinin gerekli iyileştirmeler yapıldıktan sonra üretime geçilmesi önerilmiştir.

5. KAYNAKLAR

Arik, A., 1990. Effects of search parameters on kriged reserve estimation. International Journal of Mining and Geological Engineering, 8, 319–331.

Aliyazıcıoğlu, Ş., 2011. Örnek bir bakır madeninin Surpac programı ile modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Aliyazıcıoğlu, Ş., Karaman, K., Kesimal, A., Cihangir, F., Erçıkdı, B., 2015. Bir kireçtaşı ocağında (Araklı-Trabzon) sondajların 3 boyutlu analizi yoluyla kaya şev duraylılığı değerlendirmesi. Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-IMCET 2015, Antalya.

Cebesoy, T., 1995. Bilgisayar destekli Etibank Seydişehir Doğankuzu açık işletmesinin yüzey topoğrafyasının ve boksit yatağının 3 boyutlu olarak modellenmesi. Madencilikte Bilgisayar Uygulamaları Sempozyumu, D.E.Ü, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir

Ceryan, N, 2009. Taşönü kalker ocağındaki (Trabzon) kaya şevleri duraylılığının olasılık yöntemle analizi ve kazılabilirlik. Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Ceryan, N., Çellek, S., Kesimal, A., 2009. Taşönü (Araklı/Trabzon) heyelanının kayma düzlemindeki killerin mühendislik özellikleri. 14. Ulusal Kil Sempozyumu, Trabzon.

Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., 2006. Düzlemsel kaymanın oluştuğu bir kireçtaşı ocağında güvenlik katsayılarının belirlenmesi. İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 19(2), 121–129.

Karaman, K., Erçıkdı, B., Kesimal, A., 2013. The assessment of slope stability and rock excavatability in a limestone quarry. Earth Sciences Research Journal, 17(2), 169–181.

Kennedy, B.A., 1990. Surface Mining. Second edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (US).

Selimoğlu, Ö., 2004. Bilgisayar destekli entegre açık işletme tasarımı ve planlaması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1, http://www.geovia.com/products/surpac.

Meteorolojik Koşulların Tarihi Yapılarda ve Anıtlarda Etkileri: Fatih Semti Örneği

Effects of Meteorological Conditions on Historical Buildings and Monuments: Case Study of Fatih District

S. Er[1,*], M. Yılmaz[1], S. Angı[2], S. Erişiş[1], C. Alptekin[1], A. Tuğrul[1]

[1] *Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*
[2] *Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*
*(*selmaner@gmail.com)*

ÖZ: Fatih semti İstanbul'da bulunan kökleri yüzyıllar öncesine dayanan zengin kültürel mirasa sahip bir yarımada üzerinde bulunmaktadır. Bu bölge coğrafi koşulları nedeniyle farklı meteorolojik etkilerin ve insan kaynaklı hava kirleticilerin etkisi altındadır. Bu semt de bulunan tarihi yapılarda ve anıtlarda genellikle Marmara mermeri ve Küfeki taşı kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, meteorolojik faktörlerin tarihi yapılarda kullanılmış olan Marmara mermeri ve Küfeki taşı üzerindeki etkisini tanımlamaktır. Bu amaçla öncelikle, Fatih bölgesi için meteorolojik ve diğer hava kirletici veriler toplanmıştır. Daha sonra ocaklardan alınan Marmara mermeri ve Küfeki taşları üzerinde petrografik ve fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Elde edilen verilerle tarihi yapılarda ve anıtlarda meteorolojik etkiyle meydana gelmiş yapıtaşları üzerindeki ayrışmanın nedenleri araştırılmış ve tartışılmıştır. Sonuç olarak, Fatih semtinde tarihi yapılarda yoğun olarak kullanılan Marmara mermeri ve Küfeki taşında iklimsel koşullar ve insan faaliyetlerinin ayrışma için ana parameterler olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel Etki, Tarihi Yapılar, Fatih Semti

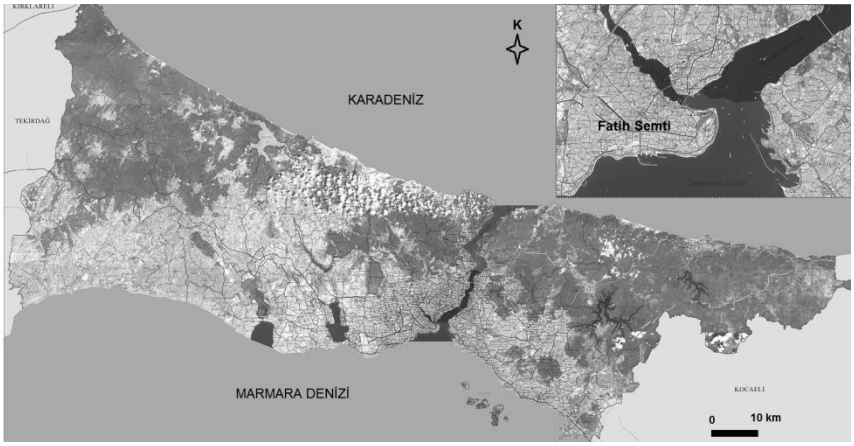
ABSTRACT: *Fatih district is on peninsula with a rich cultural heritage whose roots rise through the depth of the centuries. This region is under the influence of different meteorological effects based on geographic location and air pollutant based on human activities. Generally Marmara marble and Küfeki stone are used on historical buildings and monuments in Fatih district. The aim of this paper is to determine how these meteorological factors effect on Marmara marble and Küfeki stone. Firstly meteorological data and other air pollutant data were collected from various locations in Fatih. Then, petrographic and physico-mechanical tests were conducted on the samples collected quarries. The deteriorations occurred on the historical buildings and monuments due to meteorological effect have investigated and discussed. Results show that climatic conditions and human activity are main parameters for deterioration on Marmara marble and Küfeki stone.*

Keywords: *Environmental Effect, Historical Buildings, Fatih District*

1. GİRİŞ

Tarih boyunca, birçok medeniyete ev sahipliği yapmış, oldukça zengin bir tarihe ve kültürel mirasa sahip olanFatih semti İstanbul il sınırları içinde yer almaktadır (Şekil 1). Bu alandaki tarihi ve kültürel mirasın gerektiği gibi korunması ve gelecek kuşaklara en iyi şekilde aktarılması oldukça önemli bir konudur. Bunun için tarihi yapıların yoğun olduğu Fatih semtinin titizlikle ele alınıp zamana karşı yıpranmaya, meteorolojik ve çevresel etkenlere karşı güvenli duruma getirilmeleri gerekir. Fatih semtinin bir bakıma kimliklerini temsil eden tarihi anıtlar da meteorolojik etkilerin zararlarına maruz kalmaktadır. Marmara mermeri ve Küfeki taşının youğun olarak kullanıldığı bu semt hem atmosferdeki kirleticiler hem de olumsuz meteorolojik koşullarla ayrışma tehdidi altındadır. Yapı malzemelerinin ayrışmasında rol oynayan tüm parametrele karmaşık bir etki yapmakta ve yüksek oranda değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, doğal bir malzemenin ayrışma davranışının belirlenmesi oldukça zordur (Steiger vediğ, 1993). Ancak bu konuda yapılan çeşitli çalışmaların sonuçları, malzemelerin ayrışmasında; farklı tip hava kirleticiler, iklimsel bileşikler, mikrobiyolojik

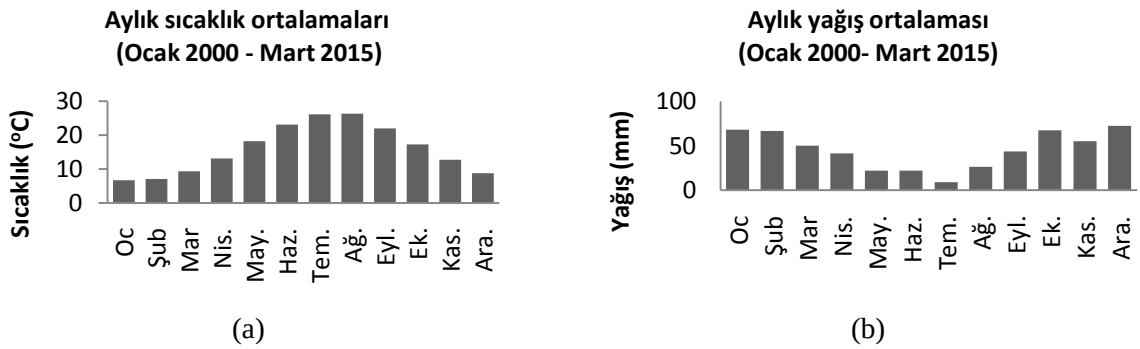
faktörler, metal oksitlere benzer katalizörler, kil mineralleri, SO_2, NOx ve organik maddelerin hazır bulunmasının önemli rol oynadığını göstermektedir (Böke vd., 1992). Bununla birlikte, malzemenin kimyasal doğası,gözenek yapısı, dayanımları, ısıl ve akustik performansları gibi özellikleri de önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.Daha da önemlisi, gözeneklerin birbirleri ile bağlantılı malzemenin iç ve dış kısımlarında su girişine imkan tanımakta ve su ayrışma süreçlerinin çoğu için temel faktör olmaktadır. Su, malzemenin çözülebilir bileşenlerini yıkayarak bünyesine alabilmekte ve bu durum su içerisinde çözünmüş kirleticilerin varlığında daha kötü etkiler yapabilmektedir. Ayrıca suyun bu çözücü gücü, tuzlarıdaha içerilere taşıma ve bunu izleyen buharlaşma veya kimyasal tortulanma vasıtasıyla tuzların gözenekler içerisinde çökelmesini sağlamaktadır. Kış ayazının yaşandığı ülkelerde soğuğa maruz kalmış gözenekli malzemelerdeki suyun donması oldukça tahrip edici iç basınçları meydana getirebilmektedir. Ayrıca organik büyümeler, likenler, algler hatta çalılar ve ağaçlar bazen bina ve anıtların yapısal anlamda tahrip olmalarına neden olabilmektedir (Haynes, 1986). Bu çalışmanın amacı, Fatih semtinde kitarihi yapı ve anıtlarda kullanılan Marmara mermeri ve Küfeki taşları üzerinde meteorolojik koşulların etkilendiklerini ortaya koymaktır. Bu amaçla bölgeye ait meteoroloji ve hava kalitesi verileri toplanmıştır. Daha sonra Marmara mermeri ve Küfeki taşının jeolojik özellikleri belirlenmiştir.Bu veriler ışığında farklı tarihi yapılar ve anıtlarda kullanılmış Marmara mermeri ve Küfeki taşının meteorolojik koşullar altındaki davranışları değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

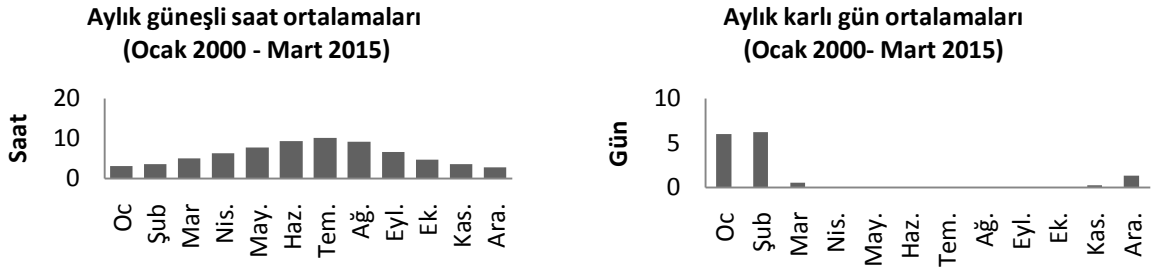
2. BÖLGENİN METEOROLOJİKVE HAVA KALİTESİ VERİLERİ

Fatih semti Akdeniz ve Karadeniz iklimlerinin geçiş özelliklerini taşımaktadır. Bölgenin tüm verileri Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Aksaray istasyonundan alınmıştır. Alınan bilgilere göre bölgenin 2010-2014 arasındaki yıllık ortalama sıcaklık değeri yaklaşık 14 C^0'dir. Bu değer kışın ortalama 5-6 C^0'ye düşmektedir (Şekil 2a). Bölgeye düşen yağış miktarı ise aylık ortalama 45 mmolup, yağış miktarı kışın yaklaşık 60-70 mm'ye çıkabilmektedir (Şekil 2b).



Şekil 2. Fatih semti a) Aylık ortalama sıcaklık dağılımı b) Aylık ortalama yağış dağılımı

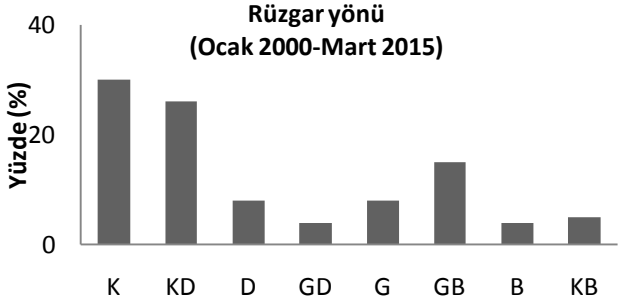
Bölge güneş görme açısından incelendiğinde, aylık ortalamasının yaklaşık 6 saat olduğu görülmüştür. Bu değer, yazın yaklaşık 10 saat olabilmektedir (Şekil 3a). Karlı gün sayısı olarak bölge kış aylarında ortalama 5-6 gün kar altında kalmaktadır (Şekil 3b).



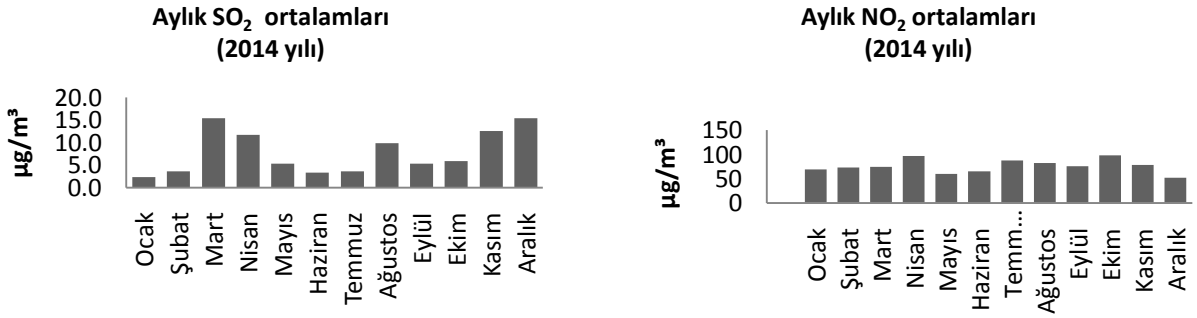
(a) (b)

Şekil 3. Fatihsemti a) Aylık güneşli saat dağılımı b) Aylık karlı gün dağılımı

Bölgedeki rüzgâr yönleri araştırıldığında K-KD yönlü rüzgârların fazla olduğu görülmektedir. Ancak az da olsa G-GB yönlü rüzgârlar da bölgede etkili olduğu da görülmektedir (Şekil 4). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Hava kalitesi izleme istasyonu 2014 verilerine göre Fatih semtimde ölçülen SO_2 ve NO_2 değerleri Şekil 5a-b de verilmiştir. Aynı istasyonun NO_x ve PM10 değerleri ise Şekil 6a-b de verilmiştir.

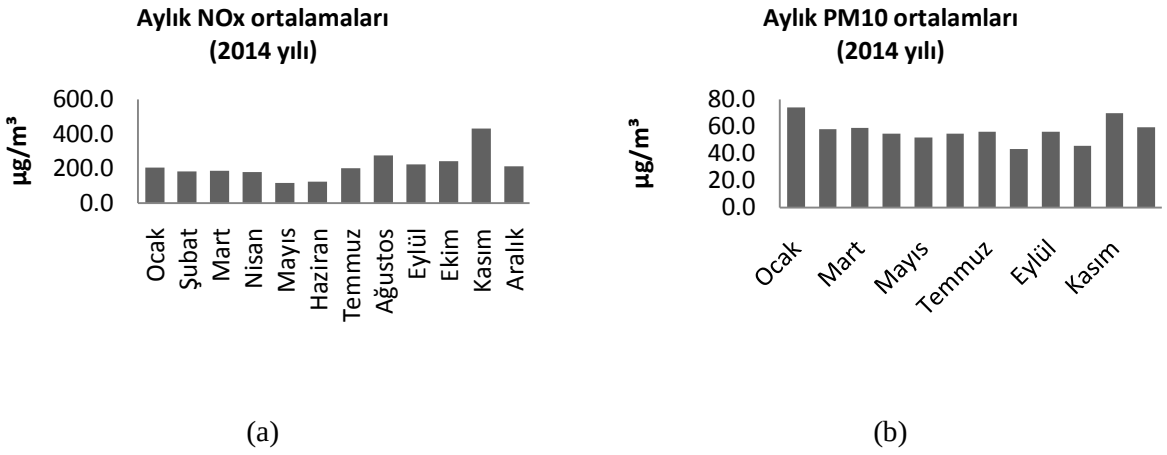


Şekil 4. Fatih semtirüzgâr yönlerinin dağılımı



(a) (b)

Şekil 5. Fatih semti a) Aylık SO_2 dağılımı b) Aylık NO_2 dağılımı



(a) (b)

Şekil 6. Fatih semti (a) Aylık NO_x dağılımı (b) aylık PM10 dağılımı

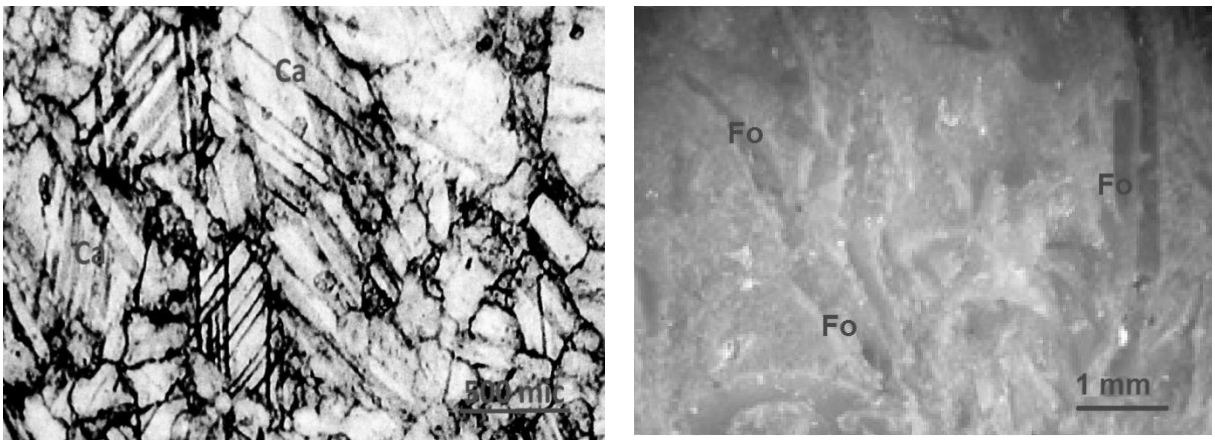
3. MARMARA MERMERİ VE KÜFEKİ TAŞININ JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ

Marmara mermerinin ve Küfeki taşının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için üretimin devam ettiği ocaklardan örnekler alınmıştır. Marmara mermeri için Marmara Adasının Saraylar Bölgesinden, Küfeki taşı için ise Edirne'nin Süloğlu yöresinden örnekler alınmıştır. Örnekler üzerinde çalışmalar İstanbul Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Doğal Yapı Malzemeleri LaboratuarındaTS 699 (2009)' e göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 1 de verilmiştir.

Çizelge 1. Marmara mermeri ve Küfeki taşının fiziko-mekanik deney sonuçları

Deney	Marmara Mermeri	Küfeki Taşı
Kuru birim ağırlık (kN/m^3)	26.18 – 27.15	19.3 – 23.8
Ağırlıkça su emme (%)	26.75 – 27. 38	4.2 – 13.2
Toplam porozite (%)	0.11 – 0.28	9.5 – 32.8
P dalga hızı (m/sn)	4658 – 4712	2875 – 3670
Basınç dayanımı (MPa)	78 – 95	18 – 28
Çekme dayanımı (MPa)	12 – 19	2.1 – 2.8
Bohme aşınma dayanımı ($cm^3/50cm^2$)	18.2 – 26.7	20.5 –54.8

Marmara mermeri ve Küfeki taşının petrografik özelliklerini belirlemek için ince kesitler hazırlanmış ve modal analiz yöntemi ile mineral içerikleri belirlenmiştir. Marmara mermerinin içeriğini büyük oranda karlspar ikizlenmesi sunan kalsit mineralleri ($CaCO_3$) oluşturmaktadır. Bu minerallerin boyu 0.5 mm ile 2.5 mm arasında değişmektedir (Şekil 7a). Bantlar şeklinde grafit zonları da ince kesitlerde belirlenmiştir.Küfeki taşının ince kesitlerinde ise üzerinde yapılmış olan petrografik analiz sonucuna göre bu taşlar, içeriğinde bol miktarda kavkı (mactra fosilli) ve az miktarda opak mineraller ve kil bulunan biyosparit bileşimli ve yaygın boşluklu, yer yer ikincil kalsit oluşumlar bulunmaktadır (Şekil 7b). Petrografik analiz sonuçlarına göre iki taşın da bileşiminde baskın olan kimyasal bileşim kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) olduğu görülmektedir.



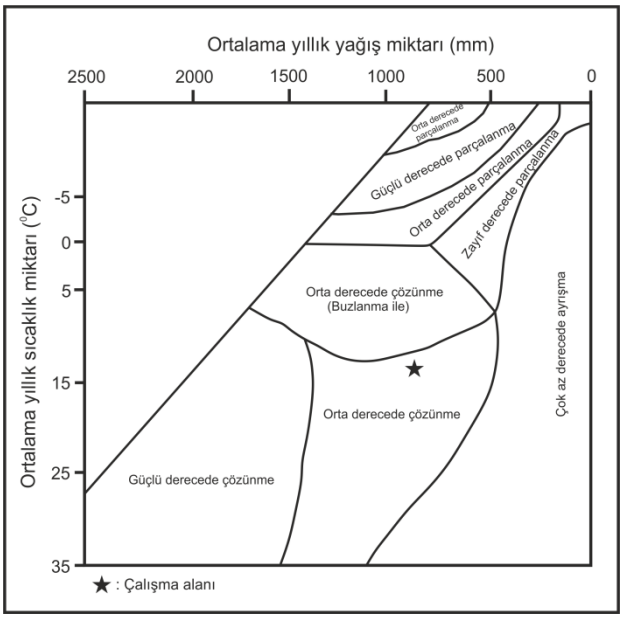
(a) (b)

Şekil 7. İnce kesit görünümleri (a) Marmara mermeri (b) Küfeki taşı

4. FATİH SEMTİNDEKİ TARİHİ YAPILARADA KULLANILAN MARMARA MEMERİ VE KÜFEKİ TAŞINA HAVA KİRLETİCİLERİN ETKİSİ

Marmara mermeri ve Küfeki taşının petrografik analizleri sonucunda iki kayacında kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) kökenli olduğu ve Küfeki taşının porozite değerinin çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Marmara mermerinin aşınma değerinin TS 10449'a göre sınır değerde (sınır değer 25 $cm^3/50cm^2$) olduğu, Küfeki taşının ise sınır değerin çok üzerinde olduğu belirlenmiştir. İstanbul ilinin yıllık yağış ve sıcaklık verileri incelendiğinde Fookes vd., (1971)'e göre bölgede orta derecede kimyasal çözünme beklenmektedir (Şekil 8). Marmara mermeri ve Küfeki taşının porozite verileri değerlendirildiğinde Fatih semtinde havada yoğunlaşarak anıtlara çeşitli şekillerde ulaşabilen nem; anıtlarda mekanik, kimyasal ve biyolojik etkiler yaratarak ayrışmayı başlatan faktördür. Nem, taştan yapılmış eserlerde tuzlanma, ufalanma, yüzeyde çatlama, çözünme şeklinde kendini göstermektedir (Şekil 9a-b) .Tugrul vd., (1999) daki çalışmalarında İstanbul'daki tarihi anıtlarda kullanılan karbonat kökenli kayaçların çevresel etkilerden çok fazla etkilendiklerini belirtmişlerdir. Öcal ve Dal, (2012) deki çalışmaların da tarihi eserlerin toprak altında iken nemli toprak içindeki suda çözünen tuzları bünyesine alarak çevresiyle bir dengeye ulaşmış olsa da açık hava ile yeniden karşılaşınca tuz kristallenme olayları ile karşılaşılmasının kaçınılmaz olduğunu ve su ile doğrudan veya yerden yükselen nem ile ıslanan taşta kendi yapısında bulunan tuzların nemle karşılaşınca hareketlenmekte, kuruma olan yerlerde beyaz çiçeklenmelere, taşta kabuklaşma, tozlaşma ve oyuk şeklinde ayrışmalara yol açtığı belirtmişleridir. Benzer gözlemler fatih semtindeki Marmara mermeri ve küfeki taşlarında da gözlenmiştir (Şekil 9c-d-e).Toz tanecikleri; şiddetli yağmur, dolu veya kar, rüzgarla birlikte bir malzemenin yüzeyine estiğinde aşınma ve erozyona ayrıca nem durumunu etkileyerek doğal taşın ayrışmasına neden olur. Rüzgâr kurumayı hızlandırır, ancak diğer taraftan yağmur suyunu gözeneklerden içeri girmeye zorlayarak taşın nem içeriğini artırır (Wessman, 1997). Rüzgarlar, kuru nehir yataklarından, sel basmış ovalardaki mil ve kayalardan kopardıkları veya yerden kaldırdıkları parçacıkları havalandırarak taşımak, bu parçacıkları çarptırarak aşındırmak ve gücü bitince de biriktirmek yoluyla yapı ve anıtların yüzeylerinde şekillendirme yapabilmektedir. Fatih Bölgesi için toz tanecikleri İstanbul içinden kaynaklı olabilecekleri gibi, rüzgarın özellikle G-GB yönünde estiği dönemlerde Sahra Çölü'nden taşınan tozlara da maruz kalabilmektedir (Şekil 10). Bunların etkisiyle tarihi yapıların G-GB kısımlarında aşınmalar görüle bilmektedir (Şekil 9e). Aşınma deneyi sonuçlarının yüksek çıkması bu bulguları desteklemektedir. İstanbul il merkezi, 15 milyonun üzerindeki nüfusuyla ülkemizin en büyük nüfuslu şehridir. Nüfusun bu denli yüksek oluşunda ileri derecede sanayi, turizm, eğitim vb. yatırımların olması gelmektedir. Bu yatırımların sonucunda trafikteki araç sayısı 17 milyonu aşmış, dolayısıyla araçlardan ve sanayi tesislerinden atmosfere bırakılan hava kirleticilerin miktarları da artmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Hava Kalitesi İzleme İstasyonları web sitesi 2014 yılı verilerine göre Fatih semtindeki SO_2 değerlerinin Avrupa Birliği (AB) limit değerlerinin altında kaldığı görülmektedir (Çizelge 2). Bu gelişmede son yıllarda kömür kullanımından doğalgaz kullanımına geçişin etkili olduğu görülmektedir. Ancak bölge NO_2-NO_x ve PM10 değerleri açısından incelendiğinde, AB limit değerlerinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Bu kirleticilerin büyük

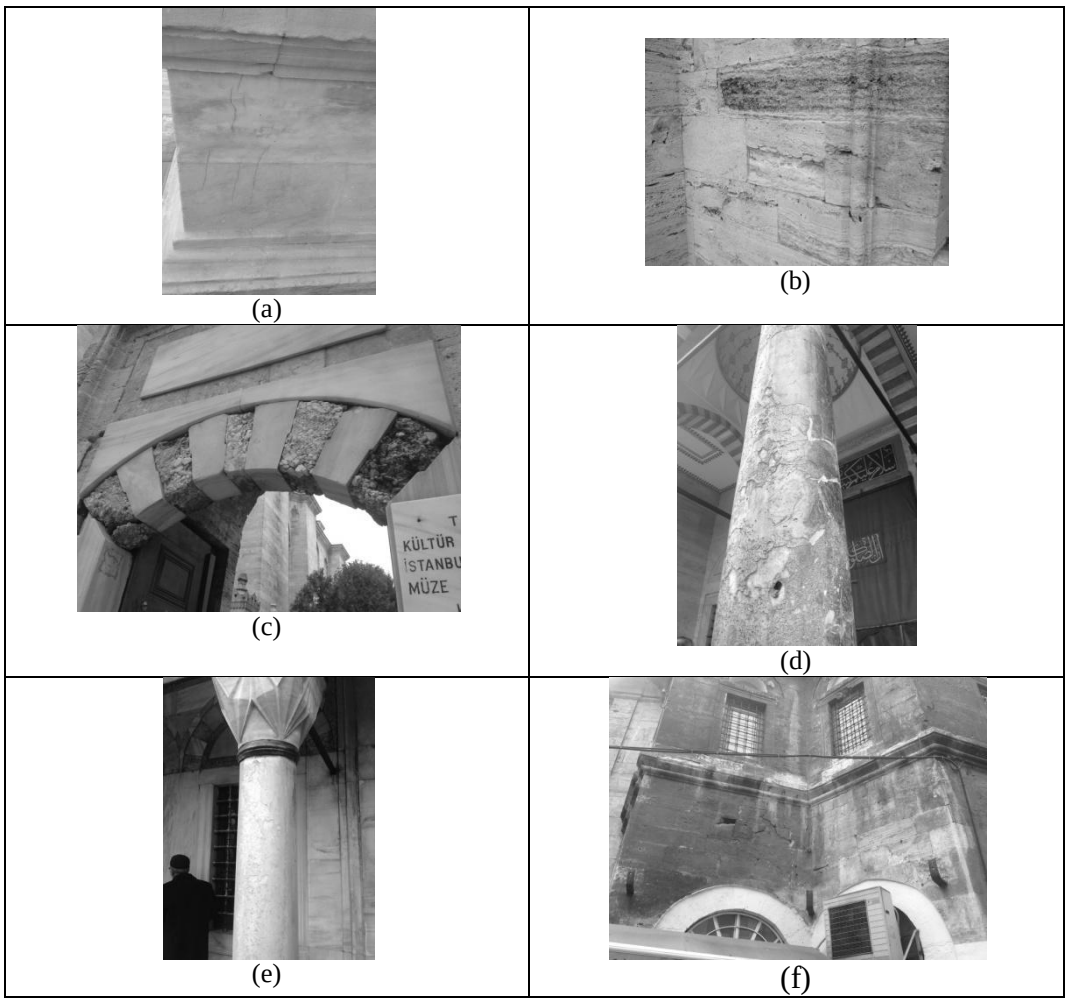
kısmı trafikteki araçlardan kaynaklanmaktadır. Tecer, (2005) deki çalışmasında partikül maddenin (PM10)kireçtaşlarına doğrudan etkisi taş tipi, depolanma miktarına ve partikül madde içeriğine bağlı olmakla birlikte, çok daha az olduğunu ancak karbonat kayaçlarında jips oluşum sürecinde partikül madde, kirleticilerin oksidasyonunda katalizör rol oynadığını belirtmiştir. Marmara mermeri ve Küfeki taşının karbonat kökenli olması, PM10 değerinin yüksek olması benzer sonuçların bölgede yapılarda görülen siyah renkli tuzlanma ile karşımıza çıkmaktadır (Şekil 9f).SO_2, doğal taşların ayrışmasında etkili olan hava kirleticilerinden biridir.SO_2'nin doğal yapı malzemelerinin üzerindeki birikmesi veya emilmesi ile doğal taşarın bünyesinde nemin ve güneşlenmenin etkisiyle tuzlar oluşmaktadır. Bölgede geçmişte bol miktarda kömür kullanımı neticesinde geçmişte bazı tarihi eserlerde yoğun tahribat olmuş olabileceğini düşündürmektedir. NOx' in atmosferdeki bulunuşu yaklaşık olarak yarı yarıya taşıt egzozu ve sabit yakma tesislerinden dolayıdır. Bu gazlar atmosferde doğal gaz çevrimine girerek, nitrik asit (HNO_3) oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlarlar. Atmosferdeki HNO_3 oluşumu ise asit yağışının oluşmasını etkilemektedir (Tecer, 2005). Fatih semtinde ölçülen yüksek NO_xdeğerinin olması, özellikle karbonat kökenli (Marmara mermeri ve Küfeki taşı) doğal taşları çözünme yoluyla etkiledikleri belirlenmiştir. (Şekil 9c-f).



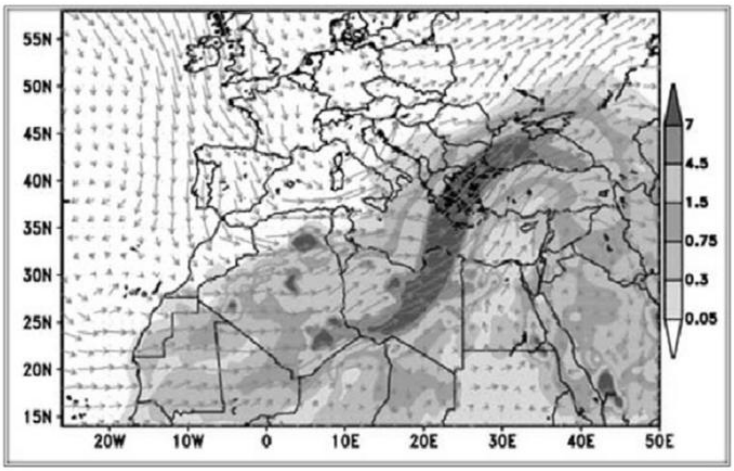
Şekil 8. Yıllık yağış-sıcaklık ortalaması ile taşların ayrışması arasındaki ilişki (Fookes vd., 1971)

Çizelge 2. Avrupa Birliği Hava kalite limit değerleri

	SO_2 (µg/m³)	NO_x (µg/m³)	NO_2 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
AB Limit Değeri	20	30	40	40
Fatih semti	12	180	75	60



Şekil 9. (a) II. Mahmut türbesi dış duvarlarında tuzlanma sonucu meydana gelen ayrışma, (b) Sultan Ahmet Camii bahçe duvarlarında meydana gelen ayrışmalar, (c) Süleymaniye Camii giriş kapısında breşlerin çimentosunun ayrışması, (d)Süleymaniye Camii dış sütununda meydana gelen erime, (e)Sultan Ahmet Camii iç avlu sütununda tuzlanma sonucu meydana gelen ayrışma), (f)Nuruosmaniye Camii güney cepsinde hava kirliliği nedeniyle meydana gelen ayrışmalar.



Şekil 10. Sahra Çölü'nden kaynaklı tozların hareket yönleri (Kılıç vd., 2014)

5. SONUÇLAR

Tarihi yarımada olarak adlandırılan Fatih semti coğrafi konumu nedeniyle farklı meteorolojik koşullara maruz kalmaktadır. Ayrıca bu bölgedeki hava kalitesi, çevresinde bulunan yoğun yapılaşma ve ağır trafik nedeniyle bozulmuştur. Bunların neticesinde bölgedeki hava kalitesi değişimleri tarihi yapılardaki doğal yapı malzemelerinde ayrışmalara neden olmaktadır. Bölgede yoğun olarak kullanılmış olan Marmara mermeri ve Küfeki taşının kalsiyum karbonat kökenli olması, Küfeki taşının porozitesinin yüksek olması ve her iki kayacın aşınma dayanımlarının düşük olması ayrışmalarını hızlandırdığı belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

Böke, H., Caner, S. E., Göktürk, H., 1992. Gypsum formation on travertines in polluted atmosphere. 7th International Congress on Deteriatiation and Conservation of Stone, Lisbon, Portugal.

Fookes P.G.,Dearman W.R., Franklin J.A.,1971.Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. Quarterly Journal of Engineering Geologyand Hydrogeology,4,139–85.

Haynes, J. M., 1986. Advances in scientific methodology for preservation of ancient monuments: conservation versus conservatism.The Science of the Total Environment,55, 365-377.

Kılıç, A., Kum. S., Ünal. A.,Kindap. T., 2014. Marmara bölgesindeki hava kirliliğinin modellenmesi, kirlilik azaltılmı ve maruziyet analizi. BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16(1), 27-46.

Öcal, A.D., Dal, M., 2012. Doğal Taşlardaki Bozunmalar. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi, İstanbul.

Steiger, M.,Wolf, F., Dannecker, W., 1993. Deposition and enrichment of atmospheric pollutionts on building sones as determined by field exposure experiments, conservation of Stone and other materials. Proceedings of the Internetional Congress, RILEM/UNESCO Paris.

Tecer, L.H.,2005. Hava kirleticilerin karbonatlı yapı malzemeleri üzerine etkileri. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(2), 231-237.

TS 699, 2009. Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuar deney yöntemleri. TSE, Ankara.

TS 10449, 1992. Mermer yapıve kaplama taşı olarak kullanılan. TSE, Ankara.

Tuğrul A., Zarif H., Yıldırım M., Gürpınar O., 1999.İstanbul'daki tarihi anıt ve yapılarda kullanılan kireçtaşlarının kirlenme ve ayrışmasında etkin faktörler. İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi, 39-51.

Wessman, L.,1997.Studies on the frostresistance of natural stone.Licentiate Thesis, Lund University, Lund Institute of Technology, Sweden.

Mekansal Planlamada Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik

İzmit Körfez Geçişi İçin Jeolojik, Jeoteknik ve Jeofizik Araştırmalar ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Geological, Geotechnical and Geophysical Investigations for the İzmit Bay Crossing and Evaluation of Their Results

O. Şimşek[1,*], İ. Kartal[2], A. O. Baki[2], A. N.Öztürk[3]

[1] *Fugrosial Ltd. Farabi Sok. No: 40/4, Çankaya/Ankara*
[2] *KGM Kamu Özel Ortaklığı Bölge Müdürlüğü, Bursa*
[3] *NÖMAYG Gebze-İzmir Otoyolu İnşaatı, İzmit*
*(*o.simsek@fugrosial.com.tr)*

ÖZ: İzmit Körfez Geçişi, yaklaşık 3 km uzunluğunda asma köprü ve güneyinde 1km uzunluğundaki yaklaşım viyadüğünden oluşmaktadır. Köprü, 2009 yılında NÖMAYG iş ortaklığına "Yap İşlet Devret" mekanizmasıyla ihale edilmiş olup, Gebze - İzmir Otoyolu'nun en kritik bağlantı noktasıdır. Proje sahası Anadolu ve Avrasya levhaları arasında sınır oluşturan dünyanın en aktif doğrultu atımlı faylardan biri olan Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın hemen yanındadır. Bu sebeple bölgenin jeolojik ve sismolojik özellikleri, temel zemin koşulları, fay lokasyonları ve karakterizasyonu ile diğer jeolojik tehlikelerin tespiti uygun bir tasarım kriteri geliştirmek için gerekli olduğu kadar yetkili firmanın projeyi finanse etmesi/tasarım ve yapım içinde kritik bileşenlerdir. Tüm bu konuları kapsayan detaylı deniz ve kara araştırmaları programlanmış ve bu çalışmalar ileri araştırma teknikleri kullanılarak 4 aylık bir süre içerisinde tamamlanmıştır. Kapsamlı saha araştırmaları ve ileri laboratuvar deneyleri yapılarak, güzergahın ve yapı yerlerinin jeolojik modeli, zemin sınıflaması, jeoteknik tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizel Çökeller, Dolomitik Kireçtaşları, Sıvılaşma, Sert Kil, Sıkı Kum

ABSTRACT: *The İzmit Bay crossing consists of a 3-km-long suspension bridge and 1 km long south approach viaduct. This bridge, which has awarded to NOMAYG JV as BOT (Built Operate Transfer) model, is most critical connection of Gebze-İzmir Motorway. This crossing is planned to be constructed nearby North Anatolian Fault Zone which is in one of the most seismically active areas in the world. Characterizing the seismotectonic setting, foundation soil conditions, potential fault locations, as well as other geohazards conditions of the region was a critical component for the project concessionaire to finance the project and obtain meaningful design and construction parameters. In order to provide these data a comprehensive geotechnical, geological and geophysical investigation program was planned for the project area, and this investigation was completed within 4 month period using advance ground investigation techniques. Integration of all site investigations and advance laboratory testing allowed a comprehensive site characterization for the project route and for the foundation of structures.*

Keywords: *Marine Deposits, Dolomitic Limestone, Liquefaction, Hard Clay, Dense Sand*

1. GİRİŞ

İzmit Körfez Köprüsü, sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden biri olan İzmit Körfezi üzerinde inşası planlanmış, yaklaşık 3 km uzunluğunda bir asma köprüdür. Körfez Geçişi yaklaşım viyadükleriyle beraber yaklaşık 4 km uzunluğundadır. Proje, 2009 yılında NÖMAYG ortak girişimi tarafından Yap İşlet Devret (YİD) modeliyle yapımına başlanan 420 km uzunluğundaki Gebze - İzmir Otoyolu Projesi'nin en kritik bağlantı noktasıdır (Şekil 1). Japon IHI firması köprünün tasarım ve yapım işlerini anahtar teslim sözleşme şekline göre üstlenmiştir. Köprü, İzmit Körfezi'nin yaklaşık 3 km ile en dar kesimi olan Diliskelesi ile Hersek Yarımadası arasında projelendirilmiştir.

Proje sahası güneyde Anadolu, kuzeyde ise Avrasya levhaları arasında sınır oluşturan Kuzey Anadolu Fay (KAF) Zonu'nda yer alır. KAF, en sonuncuları 1999 İzmit ve Düzce depremleri olan büyük depremlerle bilinmektedir (Şekil 1). Bu özelliğinin yanı sıra proje sahası, sıvılaşma potansiyeli yüksek, duraysız zemin özelliğine sahip alanlar ve yumuşak zemin özelliğine sahip denizel çökeller üzerinde yer almaktadır. Bu zor koşulların bulunduğu ortamda jeolojik, sismik ve temel zemin koşullarının ortaya çıkarılması, fay lokasyonları ve karakteristiklerinin belirlenmesi ve uygun tasarım kriteri geliştirilmesi için ileri teknoloji ekip ve ekipmanlarıyla kapsamlı bir araştırma programının gerçekleştirilmesi gereklidir. Çünkü jeolojik modelin ortaya doğru konmasının yanında Yap-İşlet-Devlet mekanizmasıyla gerçekleştirilen bir projede bir diğer kritik bileşen projenin finansı ve mümkün olan en kısa sürede tamamlanmasıdır.

Şekil 1. İzmit Körfez Geçişi yeri (KGM, 2007)

2. YAPILAN ARAŞTIRMALAR

Detaylı saha araştırmaları, ileri laboratuvar deneyleri, sismik tehlike değerlendirmeleri, saha tepki analizleri, tasarım yer hareketlerinin geliştirilmesi, kavramsal zemin tasarım analizlerinin ortaya konması ve köprü temel projesine baz oluşturmak için araştırmalara Aralık 2009'da başlamış ve Mart 2010'da tamamlanmıştır (Fugro, 2010). İşveren ve Fugro teknik ekibiyle birlikte, işverenin belirlediği iş programına uygun ve riski minimuma indirmeyi amaçlayan bir araştırma programı geliştirilmiştir. Kapsamlı saha araştırmaları, proje sahasının yakın bölgesinde bulunan KAF'ın deformasyon zonunun yapısal özellikleri ve aktif tektoniği, geçki zonun jeolojisi ve saha koşulları, köprü temellerinin yerleştirileceği alanın temel stratigrafisi gibi kritik konuları kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

Köprü aksının her iki tarafında yaklaşık 5 km genişliğindeki alanın yüksek çözünürlüklü batimetrik haritası hazırlanmış ve bu alan içinde sığ ve derin deniz sismik profilleme yapılmıştır. Batimetrik çalışmada çok ışınlı echo sounder ve yandan taramalı sonar cihazları kullanılarak deniz tabanı taranmıştır. Ayrıca, kıyı topoğrafyasını belirlemek amacıyla, kuzey ve güney kıyılarda lazer taraması yapılmıştır. Üç aşamalı olarak yapılan sismik ölçümler (1) yüksek ayrımlı çok sığ sismik görüntüleme (<10 m), (2) çok kanallı boomer yöntemiyle yapılan orta derinlikteki (<100-200 m) görüntüleme ve (3) çok kanallı hava tabancası yöntemiyle yapılan derin (<500 -1000 görüntülenme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Batimetrik çalışmada çok ışınlı ve yandan taramalı sonar cihazları kullanılarak deniz tabanı taranmıştır. Ayrıca, kıyı topografyasını belirlemek amacıyla Körfezin kuzey ve güney

kıyılarında lazer taraması yapılmıştır. Deniz tabanı zemin özelliklerini karakterize etmek üzere derinlikleri 20 m ile 80 m arasında değişen (sıvılaşma, oyulma, dayanım) 46 adet konik penetrasyon deneyi (CPT) yapılmıştır.

Temelleri denizde bulunan Kuzey Kule, Güney Kule ve Güney Ankraj noktalarında derinlikleri deniz tabanından itibaren 120 m ile 200 m arasında değişen 19 adet sondaj gerçekleştirilmiştir. Bu sondajların tamamında P-S dalga hızı ölçümleri yapılmıştır.

Karada kuzey ankraj bölgesinde derinlikleri 50-100 m arasında değişen karotlu sondajlar ve karotlar üzerinde Jeomekanik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir .

Hersek Yarımdası'ndan geçen KAF'nın haritalanması amacıyla yaklaşık 9 km uzunluğundaki hat boyunca vibro enerji kaynağıyla karada sismik yansıma araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Hersek deltasında yaklaşım yapılarının temel koşullarını araştırmak amacıyla 54 adet CPT ve 11 adet sondaj yapılmıştır. Ayrıca, Hersek deltasında KAF zonunu kapsayan 1 km uzunluğunda paleosismolojik hendek kazıları yapılmıştır.

Jeolojik araştırmalardaki stratigrafi, sondaj verileri ve konik penetrasyon testi (CPT), jeofizik araştırmalarında yorumlanan stratigrafik görüntülerle karşılaştırılmış ve birleştirilmiştir. Tüm bu jeofizik ve jeoteknik veriler, bir Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) veri tabanında toplanmıştır.

3. ARAŞTIRMA VERİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

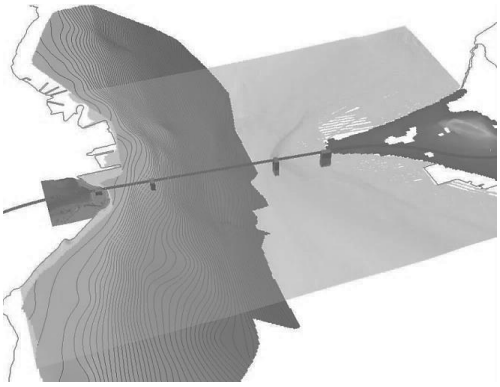
3.1 Genel Jeolojik Yapı

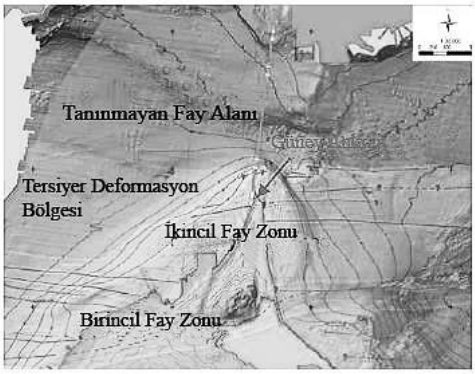
Bu çalışmada tümleşik bir yaklaşım uygulanmıştır. Jeofizik araştırmalarda elde edilen statigrafik veri ile sondaj-CPT çalışmalarıyla elde edilen stratigrafik veri karşılaştırılarak birlikte yorumlanmıştır. Jeoteknik verilerin sentez, karşılaştırma ve analizinde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılmıştır. CBS, saha karakterizasyonu çalışmalarının süresini azaltmış ve proje ihale tasarımının, jeoteknik ve deprem mühendisliği yorumlamalarıyla eşzamanlı devam etmesini sağlamıştır. Jeoteknik sondaj, CPT ve sismik yansıma verilerinin korelasyonu köprü güzergahı boyunca kuzeyde karada yüzeyleyen ana kayanın güneye doğru su altına dik bir açıyla daldığını ortaya koymuştur (Şekil 2). Bu jeolojik model kuzey ankraj noktası dışındaki temellerin denizel çökeller üzerine inşa edileceğini göstermiştir.

3.2 Fayların Tespiti ve Karakterizasyonu

Köprü güzergahının güney tarafından geçen KAFZ'na ait fayların kesin yerleri ve özelliklerinin belirlenmesinde denizde ve karada jeolojik-jeofizik-paleosismolojik araştırma yöntemleri uygulanmıştır. Yüksek ayrımlı jeofizik verilerde fayların belirlenmesinde tabakalardaki ani kesilme, bükülme ve değişimler, yansıma dizilimimde açıkça görülen offsetler, kırılma diziliminin düşey veya düşeye yakın yönelimi, deniz tabanı mikro morfolojisi ve gaz çıkışları gibi anomali ve bulgular kullanılmıştır. Bu anomaliler, diğer bir jeolojik yapı veya gürültüye bağlı da olabilir. Ancak bu yorumlama, benzer anomali dizilimlerinin kilometrelerce uzaktan çizgi korelasyonu olup, sürekliliği olan bir yapısal unsurun göstergesidir. Sismik veri aynı zamanda, güncel faylanmaya ait göstergelerin yetersiz olduğu durumlarda da kullanılmıştır. Açık deniz araştırma alanının birçok bölgesinde, sürekliliği olan yansımaları temsil eden sığ uyumsuzluklar geniş alanlar boyunca haritalanabilmektedir. Bu yansımaların, KAFZ kaynaklı yer değiştirmelerde bölünmediği alanlar, "belirgin bir faylanmanın görülmediği alanlar" olarak poligonlarla belirlenmiş ve ardından deniz tabanı ile faylanmanın görülmediği katmanın kalınlığı ölçülmüştür. Bu katmanların yaşı ise, numuneler üzerinde yapılan radyokarbon yaşlandırmaları ile kesinleştirilmiştir. Buna ek olarak, var olan ESR (Electron Spinning Resonans) yaşlandırma analiz sonuçları (Dolu vd., 2007; Meriç vd., 1995) bu sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tümleşik saha karakterizasyonuyla elde edilen stratigrafik veriler, her iki yaşlandırma yöntemiyle elde edilen verilerle uyum göstermiştir. Faylanmanın görülmediği katmanların yaşıyla ilgili elde edilen verilere göre, sualtı faylarında Holosen'de herhangi

bir yer değiştirme gözlenememiştir. Karada ve denizde yapılan fay çalışmasının sonuçları, proje sahası yakınındaki KAFZ boyunca ana deformasyon ve ikincil deformasyon zonlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, ana deformasyon zonu, Güney Ankrajın yaklaşık 2.1 km güneyinde yer almaktadır. İkincil deformasyon zonu ise, Güney Kule ile Ana Fay Zonu arasında kalan alan olarak belirlenmiştir.

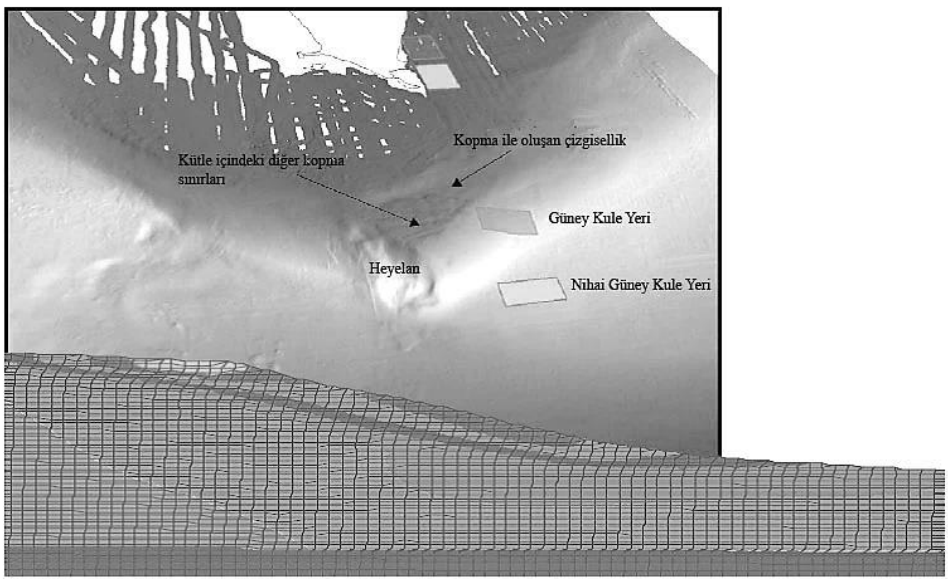




Şekil 2. Ana kayanın kuzeyden güneye dalımı Şekil 3. KAFZ'nun güzergah ile ilişkisi

3.3 Deniz Altı Şev Duraysızlıkları

Yüksek çözünürlüklü batimetri verisi elde edilmeden önce, Güney Kule'nin yeri Hersek deltasının 600 m kuzey ucundaki nispeten dik olan şev üzerinde öngörülmüştü. Yapılan yüksek çözünürlüklü batimetri, yandan taramalı sonar ve yüksek çözünürlüklü jeofizik ölçüm yöntemleriyle elde edilen veriler bu yamacın duraysız olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, jeoteknik araştırmalarda belirlenen sıvılaşma potansiyeli yüksek yüzeye yakın kum tabakaları ile altında yer alan yumuşak kil seviyelerinin duraysızlığına ilişkin elde edilen veriler, yamaç duraysızlığının Güney Kule yerinin tasarımı için kritik bir konu olduğuna işaret etmektedir. Kule lokasyonundaki yamaç hareketlerinin potansiyel etkilerini değerlendirmek için sayısal analizler yapılmıştır (Şekil 4). Bu analizlerin amacı, kule lokasyonundaki zemin hareketlerine katkıda bulunan mekanizmaları çözmek ve potansiyel bir hareketin büyüklüğünü tahmin etmektir. Bu değerlendirmelere dayanarak, Güney Kule temeli 150 m kuzeye kaydırılarak daha duraylı bir alana taşınmıştır. Güney Kule alanındaki güncel kaymanın yeri ve eski kule ayağı yeri ile ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Eski ve nihai Güney Kule yerini ve dinamik yamaç stabilitesiyle ilişkisi

3.4 Zemin Tasarım Parametreleri

Saha araştırmaları aşamasında, çok sayıda yerinde deney ve laboratuvar deneyi yapılmıştır. Zeminin mühendislik özelliklerindeki farklılıklar ve genel eğilimler, istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir. Aşağıdaki paragraflarda her bir temel yeri için yapılan çalışmalar ve önerilen jeoteknik tasarım parametreleri verilmiştir (Fugro, 2010).

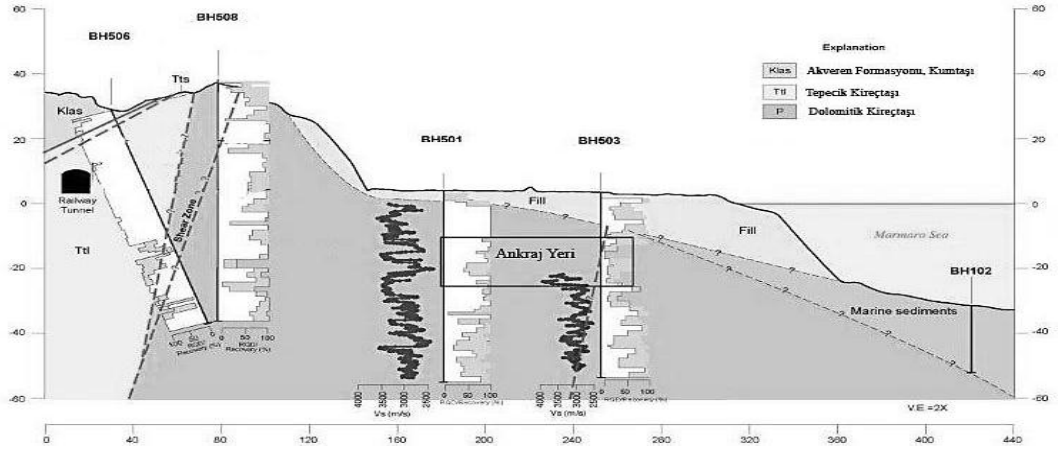
Kuzey Ankraj temeli Dil İskelesi mevkiinde Devoniyen yaşlı kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşları üzerine projelendirilmiştir (Şekil 5). Proje sahasının temel kayasının detaylı mühendislik jeolojisi haritası hazırlanmış ve kayacın süreksizlik, dayanım, ayrışma ve karstlaşma gibi özellikleri ortaya konulmuştur. Temel yerinde 7 adet karotlu sondaj yapılmış ve sondajlarda dilatometre ve basınçlı su deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dinamik analizlerde kullanmak için kuyu içi P ve S dalga hızı ölçümleri de yapılmıştır. Sondaj karotları üzerinde yapılan tek eksenli sıkışma dayanımı ve dilatometre deneylerinin sonuçları dikkate alınarak önerilen tasarım parametreleri Çizelge 1 ve 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Kuzey Ankraj temeli kayaçları için öngörülen girdi parametreleri

Tanımlama	GSI	m_i	Örselenme Faktörü	E_i (MPa)	UCS (MPa)
Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı	50	10	0.7	33750	75
Faylanmış Kaya Kütlesi	40	10	0.7	11250	25

Çizelge 2. Kuzey Ankraj Temeli Kayaçları için tespit edilen kaya kütlesi parametreleri

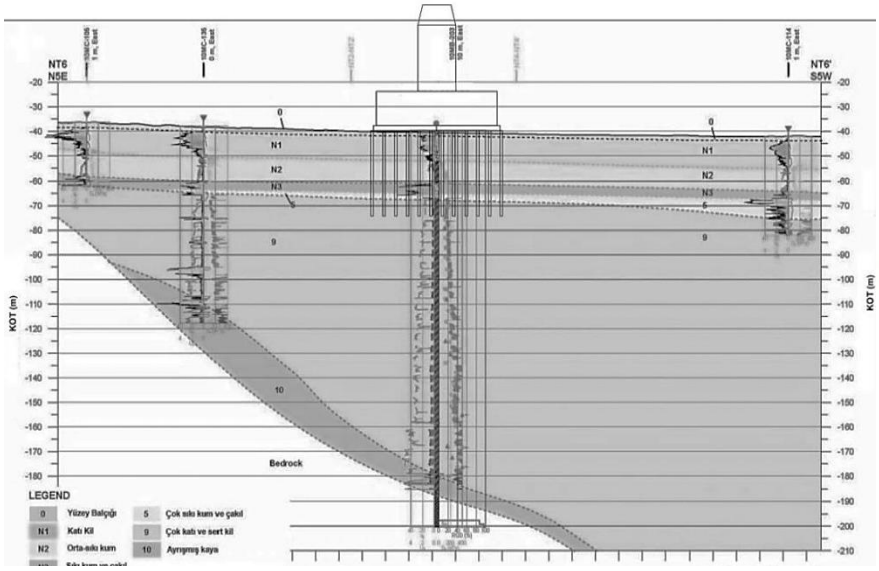
Tanımlama	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Deformasyon modülü (GPa)	Poisson Oranı
Çatlaklı Dolomitik Kireçtaşı	345	55	4.95	0.25
Faylanmış Dolonitik Kireçtaşı	108	45	2.40	0.25



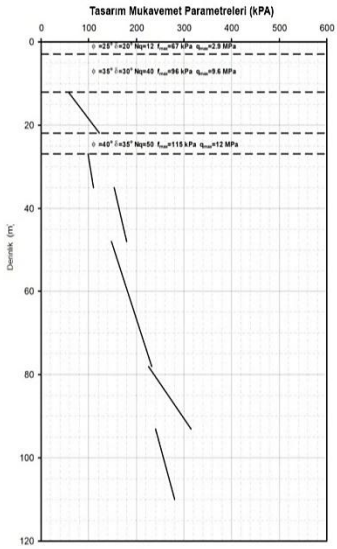
Şekil 5. Kuzey Ankraj temeli jeoloji kesiti

Kuzey Kule temeli, su derinliğinin 40 m olduğu alanda konumlandırılmıştır. Kule temeli ve civarında derinlikleri 120 m ile 200 m arasında değişen 5 adet derin sondaj ve derinlikleri 40 m ile 80 m arasında değişen 8 adet CPT yapılmıştır. Sondajlarda her 3 m'de bir örselenmemiş örnek alınmış, kanatlı kesici deneyi yapılmış olup kuyunun geri kalan kısmı ise devamlı CPT yapılarak ilerlenmiştir. Sondajların tamamında P-S dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan sondajlarda kuzeyden güneye doğru dalan ana kayaya 160 m derinlikte rastlanmıştır. Sondaj verileri deniz sismiği verileriyle uyumludur. Yapılan sondaj ve CPT verilerine göre, deniz tabanındaki yaklaşık 5 m kalınlığındaki

balçık zemin altında kalınlığı yaklaşık 20 m'yi bulan orta-sıkı kum seviyesi ile devam etmektedir. Bu tabaka altında ise katı kil ve sıkı çok sıkı kum tabakası altında çok katı ve sert kil tabakası geçilmiştir. Bu tabaka deniz tabanından itibaren 160 m derinlikte rastlanan temel kayasına kadar kesintisiz devam etmektedir. Bu seviyenin drenajsız makaslama dayanımı 100 kPa ile 300 kPa arasında değişmektedir. Şekil 6'da Kuzey Kule jeolojik kesiti, Şekil 7'de ise zemin seviyelerinin derinlikle değişen drenajsız tasarım parametreleri sunulmuştur. Parametreler, CPT uç direnci ve laboratuvar deney verileri kullanılarak belirlenmiştir. Bu kesitte görüleceği üzere, kule temeli kesonları altında iyileştirme amacıyla yapılan çakma kazıklar çok katı sert kil tabakasına indirilmiştir.

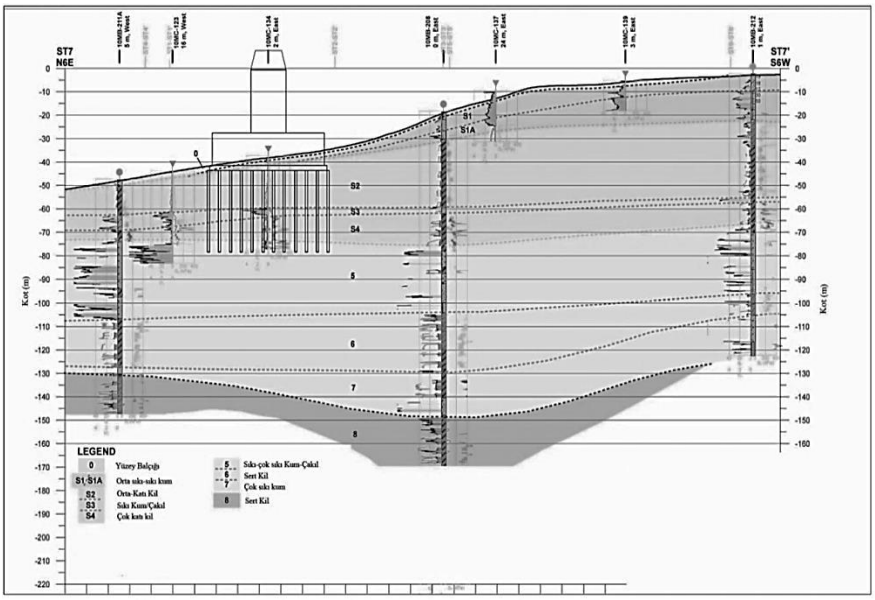


Şekil 6: Kuzey Kule temeli jeoloji kesiti

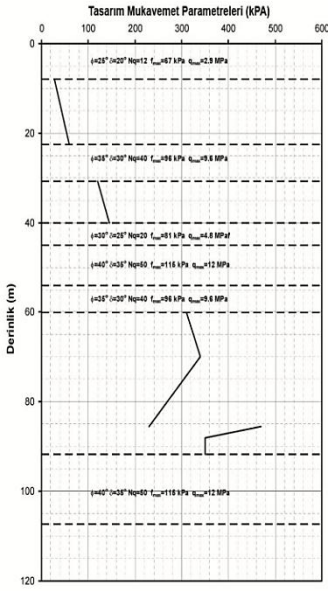


Şekil 7: Kuzey Kule zemin tasarım parametreleri

Güney Kule temeli, araştırma bulgularına göre yamaç stabilitesinin sorunlu olduğu Hersek Deltası yamaç üzerinden yamaç önündeki düzlükte konumlandırılmıştır. Kule temeli ve civarında derinlikleri 120 m ile 200 m arasında değişen 8 adet derin sondaj ve derinlikleri 40 m'yi bulan 10 adet CPT yapılmıştır. Sondajlarda her 3 m'de bir örselenmemiş örnek alınmış ve kanatlı kesici deneyi yapılmış olup, kuyunun geri kalan kısmı ise devamlı CPT yapılarak ilerlenmiştir. Sondajların tamamında P-S dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan araştırma sonuçlarına göre deniz tabanındaki yaklaşık 5 m kalınlığındaki yüzeysel kil seviyesi altında kalınlığı yaklaşık 25 m'yi bulan orta-sıkı kum, katı kil ve sıkı–kum seviyesinin altında ise çok sıkı kum-çakıl ve çok katı kil tabakası aradalanması geçilmiştir. Deniz tabanından itibaren 100 m derinde ise, çok katı sert kil seviyesine rastlanılmış olup, bu seviyenin temeline deniz tabanından itibaren 200 m derinliğe inen sondajlarla dahi erişilememiştir. Şekil 8'de Güney Kule jeoloji kesiti, Şekil 9'da ise zemin seviyelerinin derinlikle değişen drenajsız tasarım parametreleri sunulmuştur. Parametreler CPT uç direnci ve laboratuvar deney verileri kullanılarak belirlenmiştir. Bu kesitten görüleceği üzere, kule temeli kesonları altında iyileştirme amacıyla yapılan çakma kazıklar çok sıkı kum-çakıl tabakası içine sokulmuştur.

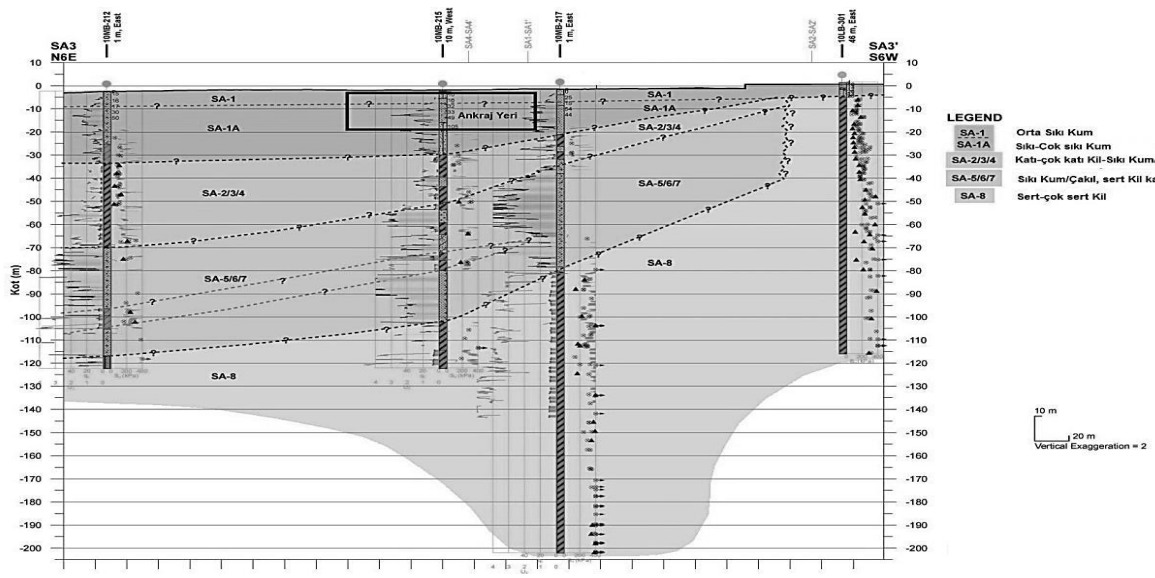


Şekil 8. Güney Kule temeli jeoloji kesiti



Şekil 9: Güney Kule zemin tasarım parametresi

Güney Ankraj, ağırlık kütle betonu olarak tasarımı yapılmıştır. Güney Ankraj temeli Hersek Deltası'nda deniz derinliğinin 2 m -5 m olduğu kesimde projelendirilmiştir. Ankraj temeli ve civarında derinlikleri 120 m ile 200 m arasında değişen 13 adet derin sondaj ve derinlikleri 40 m'yi bulan 10 adet CPT yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre deniz tabanındaki yaklaşık 5 m ile 10 m arasında değişen kalınlıktaki sıvılaşabilir kum seviyesi altında kalınlığı yaklaşık 20 m'yi bulan sıkı-çok sıkı bir kum seviyesi geçilmiştir. Şekil 10'da Güney Ankraj temelinin jeoloji kesiti verilmiştir. Ankraj ağırlık betonu temeli yaklaşık -20m kotuna kadar kazılarak sıkı-çok sıkı kum seviyesi üzerine bir keman geometrisi şeklinde yerleştirilmiştir.



Şekil 10. Güney Kule temeli jeoloji kesiti

4. SONUÇLAR

Yap-İşlet-Devret sistemiyle gerçekleştirilen Gebze-İzmir otoyolunun en kritik geçiş noktası İzmit Körfez geçişidir. Körfezin 3 km genişliğindeki Dil İskelesiyle Hersek Deltası arasında konumlandırılan köprü aktif KAF zonuna yaklaşık 2 km mesafededir. Köprü geçkisi fayın ana deformasyon zonu dışındadır. Ana fay zonunun kuzeyinde kalan ikincil deformasyon zonunda Güney Kule ile Güney ankraj arasında yer alan ikincil fayların Holosen aktivitesi gözlenmemiştir. Denizde ve karada yapılan kapsamlı jeolojik, jeoteknik, jeofizik, batimetrik etütler ve ileri laboratuvar deney sonuçları dikkate alınarak İzmit Körfez Geçişi asma köprü ankraj ve kule yerleri belirlenmiş, temel tasarımı ve iyileştirme yöntemleri ortaya çıkarılmıştır.

Bu veriler ışığında, Kuzey kule karada projelendirilmiş olup temeli Devoniyen yaşlı kireçtaşlarından ibarettir. Kuzey Kule temeli ise deniz tabanındaki yaklaşık 5 m kalınlığındaki balçık zemin altında kalınlığı yaklaşık 20 m'yi bulan orta-sıkı kum seviyesi ile devam etmektedir. Bu tabaka altında ise katı kil ve sıkı – çok sıkı kum tabakası altında çok katı ve sert kil tabakası geçilmiştir. Kule keson temelleri çakma kazıklarla sert kil seviyesine kadar iyileştirilmiştir.

Güney Kule temeli, deniz tabanında yaklaşık 5 m kalınlığındaki yüzeysel kil seviyesi altında kalınlığı 25 m'yi bulan orta-sıkı kum, katı kil ve sıkı–kum seviyesi ve bu tabakayı takip eden çok sıkı kum-çakıl ve çok katı kil tabakasından oluşmuştur. Kule temeli kesonları altında iyileştirme amacıyla yapılan çakma kazıklar çok sıkı kum – çakıl tabakası içine sokulmuştur. Güney ankraj temeli, deniz tabanında yaklaşık 5 m ile 10 m arasında değişen kalınlıktaki sıvılaşabilir kum seviyesi ve altında ise kalınlığı yaklaşık 20 m'yi bulan sıkı-çok sıkı bir kum seviyesinden oluşmaktadır. Keman geometrisi ağırlık betonu şeklinde tasarımı yapılan ankraj temeli -20m kotuna kadar kazılarak sıkı-çok sıkı kum seviyesi üzerine yerleştirilmiştir.

Deniz uygulamaları için geliştirilen özel teknik ile 150-200 m derinlikteki zeminin özellikleri ve bu zeminlerin sismik parametreleri çok kısa sürede ve doğru olarak elde edilmiştir. Uygulanan projenin kara ve denizde yapılan çok disiplinli araştırmaların İzmit Köprüsü gibi kritik mühendislik yapılarının tasarım ve imalatındaki önemini ortaya koymuş olup ve ülkemiz açısından iyi bir örnektir.

5. KAYNAKLAR

Dolu, E. Gökaşan E., Meriç E., Ergin M., Görüm T., Tur H., Ecevitoğlu B., Avşar N., Görmüş M., Batuk F., Tok B., and Çetin O., 2007. Quaternary evolution of the Gulf of İzmit (NW Turkey): a sedimentary basin under control of the North Anatolian Fault Zone. Geo-Marine Letters, Springer, Vol 25, pp 355-381.

Fugro, 2010. Factual Data Report Izmit Bay Bridge Crossing, Gebze-İzmir Motorway Project, prepared for NOMAYG.

Fugro, 2010. Geological, Geophysical and Geotechnical Interpretations Izmit Bay Crossing, prepared for NOMAYG.

KGM, 2007. Karayolları Genel Müdürlüğü Türkiye detaylı yol haritası, Ankara.

Meric E., 1995. Stratigraphy and depositional features of the Quaternary sequence in the Gulf of Izmit. Izmit Korfezi Kuvaterner Istifi, Editor Engin Meric, pp 251-258.

Köprü Projelerinde Jeolojik Modellemenin Önemi

The Importance of Geological Modelingon Bridge Projects

S. Al[1,*], S. Acar[1], E. Akdaş[1], Ö. Baki[1]

[1] *TTS Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık LTD. ŞTİ, Kozyatağı, İstanbul*
*(*suhaal@ttsmuhendislik.com)*

ÖZ: Ülkemizde yapılan inşaatlarda yapının türü ne olursa olsun, yapı-zemin ilişkisinden çok üst yapısına önem gösterilmektedir. Bu çalışmada; köprü vb. yapıların altında bulunan jeolojik unsurların doğru belirlenebilmesi için yapılması gereken çalışmalar, bu çalışmalar sırasında yapılan insan kaynaklı ya da mekanik hatalar ve belirlenen jeolojik modelin üst yapı hesaplarına etkisi ve ortaya çıkardığı sonuçlar vurgulanmaya çalışılmıştır. Oluşturulan jeolojik model üst yapı analizlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu hususta jeolojik modelin doğruluğu üst yapı hesaplarını baştan sona etkilemektedir. Bu çalışmalardan elde edilen parametreler ise; temel tipi, donatı miktarı, kesit büyüklükleri gibi köprüyü oluşturan temel unsurları etkilemektedir. Yapılan çalışmalar altyapıyı belirlemek amacıyla yapılan çalışmaların maliyetin %0.1'i bile oluşturmazken, jeolojik modelin yanlış kurulmasına sebep olabilecek şekilde eksik yapılan çalışmaların maliyeti %20-25 oranında arttırdığını göstermektedir. Ayrıca hem güvenlik açısından riskli bir yapı inşa edilmiş olacak, hem de zaman açısından büyük kayıplar yaşanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Köprü, Jeolojik Modelleme, Üstyapı, Maliyet

ABSTRACT: *In buildings constructed in our country, no matter what type of the structures is, it is given more attention to the superstructure compared to the relation between structure and earth. In this study, it is aimed to determine the works that need to be done in order to find out accurate geological elements at the bottom of the structures such as bridges, the anthropogenic or mechanical errors during these works, the effect of the geological model on the upper structure calculations and the results concluded from all of these. The created geological model is the basis of the superstructure analysis. In this respect, the accuracy of the geological model affects the calculations of the superstructure entirely. The parameters obtained from the studies affect the basic elements forming the bridge such as the type of foundation, the amount of reinforcement and the section sizes. These studies have shown that although the studies, aiming to determine the infrastructure, do not even take %0.1 of the total cost, the incomplete studies that may cause incorrect geologic model establishment may increase the overall cost by %20-25. Besides, a hazardous structure in terms of safety will be constructed and also there will be huge losses in terms of time as well.*

Keywords: *Bridge, Geological Modeling, Superstructure, Cost*

1. GİRİŞ

Ülkemizde yapılan inşaatlarda yapının türü ne olursa olsun, yapı-zemin ilişkisinden çok üst yapıya önem verilmektedir.Alt yapı, diğer bir deyişle yapının oturacağı zeminin özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar hatalı ve/veya eksik yapıldığı takdirde, başta güvenlik olmak üzere, birçok sorun ile karşılaşılmaktadır.

Ülkemizde araştırma çalışmaları için ayrılan zaman ve bütçe genellikle kısıtlı tutulmakta ve bu sebeplerden dolayı keşif bedelleri hiçbir zaman doğru olarak belirlenememektedir. Bu yüzden ihale edilen herhangi bir proje zamanında bitirilememekte ve keşif bedelleri yapım bedellerinin çok altında kalmaktadır. Bu durum; hem maddi kayıplara, hem de zaman kayıplarına sebep olmaktadır. Eğer araştırma çalışmaları için yeterli olanaklar sağlanırsa, yapılacak olan projeler ve imalatlar önceden doğru olarak kestirilebilir, zaman kaybı ve maddi kayıplar yaşanmaz. Baraj, tünel, yol, köprü ve benzer mühendislik projelerinin maliyeti, projenin uygulanacağı alanın jeolojik özellikleriyle yakından ilgilidir. Proje sahasındaki kaya ve zeminin özelliklerini ortaya koymak için yapılacak çalışmaların

maliyeti, tüm proje maliyetinin % 0.1-2'si kadardır. Bu araştırmaların yapılmaması durumunda sonradan ortaya çıkacak problemlerin çözümlenmesi için sarf edilecek bütçe, bu oranın çok üzerinde olacak ve aynı zamanda projenin tamamlanması için belirlenen tarihi geciktirecektir. Bu çalışmada; köprü projeleri özelinde yapılması gereken araştırma çalışmaları, bu çalışmalarsırasında yapılan hatalar ve bu hataların köprü projelerine güvenlik ve maddi yönden etkileri örnekler verilerek tartışılmıştır.

2. KÖPRÜ PROJELERİNDE YAPILMASI GEREKEN ÇALIŞMALAR

Mühendisliğin en önemli kriterleri olan emniyet, estetik ve ekonominin tümü dikkate alındığı bir yapı projelendirilmek isteniyorsa, yapının üzerinde veya içinde inşa edildiği zeminin çok iyi tanımlanması gerekir. Eğer zemin-yapı ilişkilendirmesinde tanımlanamayan veya eksik-hatalı tanımlanan hususlar var ise,inşası planlanan yapı kusurlu olacaktır. Kusursuz bir yapının inşası için mutlaka yapı altında kalan zeminçok iyi tanımlamalı ve üst yapı hesaplarıbu tanımlamalara göre yapılmalıdır.

Köprü projelerinde; temel tipini ve derinliğini belirlemek, köprü ayak kazılarında şev stabilitesini sağlamak, köprü statik modellemesinde kullanılan yatay yer ivmelerini ve zemin parametrelerini belirlemek amacıyla, köprü ayaklarının oturacağı zeminin jeolojik ve jeomekanik özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Köprü projelerinde köprü ayaklarının oturduğu zeminin tam olarak doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için yapılması gereken mühendislik çalışmaları 4 aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar sırasıyla; ön araştırma çalışmaları, yüzey çalışmaları, yer altı çalışmaları ve laboratuvar çalışmalarıdır.

2.1. Ön Araştırma Çalışmaları

Ön araştırma kapsamında ilk aşamada proje sahası ve yakın çevresinde daha önceden yapılmış olan araştırmalar gözden geçirilmelidir. Ancak bu araştırmaların kendi başına projelerin hazırlanması açısından gerekli bilgileri sağlayabilecek kapsamda olmadıkları göz ardı edilmemelidir. Bu çalışmalar sadece sonraki aşamalarda yapılacak olan ayrıntılı çalışmalara yön verici özelliktedirler. Daha önce yapılmış olan çalışmalar sayesinde; arazinin engebe durumu, bitki örtüsü, iklim, ulaşım durumu, genel hidrojeolojik durum, depremsellik, jeolojik haritalar sayesinde bölgede bulunan birimlerin yayılımı ve varsa yapısal özellikleri gibi birçok bilgiye ulaşılabilmektedir. Ayrıca ön çalışmaların sonucunda belirlenecek yerlere bu çalışmaların doğruluğunu ve detaylandırılmasını sağlayacak araştırma sondajları veya çukurlarınınaçılması da planlanabilmektedir.

2.2. Yüzey Çalışmaları

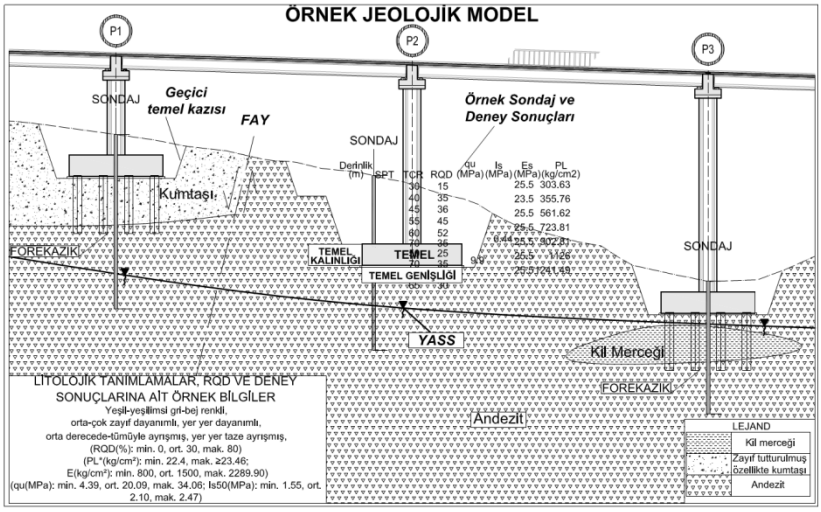
Ön araştırma çalışmaları tamamlandıktan sonra yüzey çalışmalarının yapılması için proje sahasında arazi çalışmaları yapılarak ön araştırma çalışmalarında elde edilen veriler detaylandırılır ve özele indirgenir. Bu çalışmalar sırasında proje güzergahınıntopoğrafik olarak tepelik ve çukur alanları, yüzey sularının durumu vb. özellikler ortaya konulmalıdır. Özellikle yüzeyde yapılan jeolojik çalışmaların daha kolay sürdürülebilmesi açısından proje sahasının bitki örtüsü büyük bir öneme sahiptir. Eğer tamamen bitki örtüsüyle kaplı sahalarda çalışmalar yapılıyorsa, yarma gibi alanlar olmadığı takdirde yüzey jeolojisi çalışmalarının sürdürülebilmesi çok güç olabilmektedir. İklim, bitki örtüsü, topoğrafik durum vb. özelliklerin tespit edilmesi sırasında birçok disiplin iş birliği yapmaktadır. Yüzey jeolojisi çalışmaları içerisinde proje sahasındakijeolojik birimlerin litolojik olarak tanımlanması gerekmektedir. Daha sonra proje güzergahının yapısal özellikleri (faylar, süreksizlik takımları, tabaka konumları vb.) ile yüzey ve yeraltısularının özellikleri de bu çalışmalar sırasında ortaya konulmalıdır. Yüzey araştırmalarının sonucunda ise, mühendislik jeolojisi amaçlı haritalar ve kesitler hazırlanmalıdır. Bu haritalar; jeolojik birimler ve bu birimlerin birbirleriyle olan sınır/dokanakları, proje sahasında gözlenen yapısal özellikler, birimlerin genel ayrışma dereceleri ve dayanımları ve yeraltı/yüzey suyu koşulları gibi bilgileri içermelidir. Elde edilen tüm veriler değerlendirildikten sonra bir sonraki aşama olan yer altı çalışmalarına geçilir.

2.3. Yeraltı Çalışmaları

Yüzey araştırmalarında ortaya konulan bilgiler yüzeydeki ayrışma ve toprak örtü kalınlıklarının yüksek olması vb. durumlarda yeraltındaki durumu yansıtmayabilirler. Bu bağlamda, projelerin uygulanabilirliği açısından ve karşılaşılabilecek sorunların önceden bilinmesi için proje sahasında bazı yer altı çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Örneğin; köprü projelerinde uygulanılacak temelin kotu ve temel tipi yeraltının jeolojik durumuna göre değişmektedir. Ayrıca, bu hususlara ek olarak hesap yapabilmek için belirlenen temel seviyesinden zeminin durumuna göre laboratuvar deneyleri için gereken kaya veya zemin örneklerinin alınması gerekmektedir. Yer altı hakkında bilgi edinebilmek için sondaj, araştırma çukurları ve jeofizik uygulamaları gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle yeraltında bulunan birimlerin birbirleriyle olan ilişkileri, kayaç cinsleri, kayaçların mineralojik ve petrografik özellikleri, tabaka kalınlıkları, süreksizliklerin mühendislik özellikleri, birimlerin ayrışma dereceleri ve dayanımları ile ilgili bilgiler elde edilebilmektedir. Ayrıca eğer tercih edilen yer altı çalışma yöntemi sondaj ise,alınankarotörneklerinde kaya kalite yüzdeleri belirlenir ve sondajlarda yeraltısuyu ile ilgili veri sağlanır. Bunların yanı sıra, sondajlar sırasında presiyometre, SPT vb. gibi arazi deneyleri yapılarak proje sahasında bulunan kayaçlar/zeminler hakkında jeomekanik parametreler tayin edilebilir.

2.4. Laboratuvar Çalışmaları

Yüzey ve yer altı çalışmaları sırasında elde edilen bilgiler yapı zemininin bütün özelliklerini yansıtmayabilir. Köprü projelerinde taşıma gücü, oturma ve şev stabilitesianalizleri ile statik hesaplamaların yapılabilmesi açısından zeminin mühendislik parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Laboratuvar deneyleriyapılarak birimlerin projede gereksinim duyulan indeks, dayanım ve deformabilite özellikleri tayin edilir. Yapılan tüm çalışmalardan sonra elde edilen bütün bilgiler birbirleriyle korele edilerek rapor ve jeolojik model hazırlanmış olur. Hazırlanmış olan jeolojik model üzerinde köprü ayaklarının yerleşimi, sondaj noktaları, laboratuvarda ve yerinde yapılan deneylerin sonuçları, yüzey çalışmalarından elde edilen bulgular, yüzey/yeraltısuyudurumu, ve litolojik tanımlamalar gibi bilgiler bulunmaktadır (Şekil 1).Hazırlanan rapor ve jeolojik model dikkate alınarak yapılacak köprü projeleri için kullanılacak temel tipi, üst yapı modellemelerinde kullanılacak jeomekanik parametreler ve yatay yer ivmeleri gibi önem taşıyan hususlarbelirlenmiş olmaktadır.



Şekil 1. Örnek jeolojik model

3. ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARINDA YAPILAN HATALAR VE EKSİKLİKLER

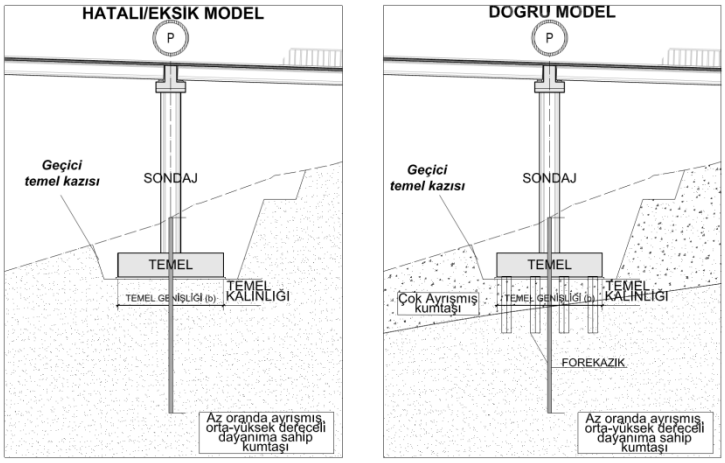
Doğru bir şekilde yapılan araştırma çalışmaları bir projeyi ne kadar nitelikli hale getiriyorsa, bu çalışmalarda yapılan eksiklikler ve hatalar da projenin hatalı, yüksek maliyetli ve emniyetsiz bir şekilde yapılmasına sebep olabilmektedir.

Araştırma çalışmaları sırasında birçok unsurdan dolayı elde edilen parametrelerde ve ortaya konulan jeolojik modellerde yanlışlıklar ve eksikler olabilmektedir. Araştırma çalışmalarında hatalar insan kaynaklı hatalar ve mekanik hatalar olarak ikiye ayrılabilir. Bu hatalara aşağıdaki alt bölümlerde ana hatlarıyla değinilmiştir.

3.1. Araştırma Çalışmalarında Ortaya Çıkan İnsan Kaynaklı Hatalar

Araştırma çalışmalarında ortaya çıkan hataların çoğu insan kaynaklı hatalar olup, araştırma çalışmalarının hemen her aşamasında meydana gelebilmektedir. Bu hatalar ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

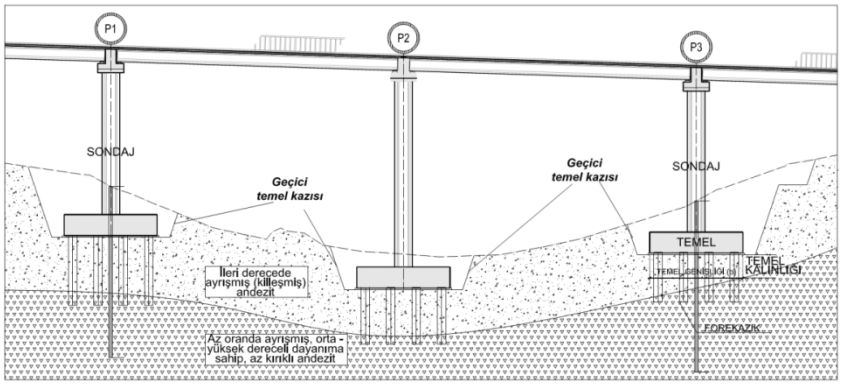
Yüzey araştırmaları veya sondajlar sırasında yapılan litolojik birimlerdeki tanımlama hataları: Arazi çalışması veya sondaj logu yapan mühendisin litolojik birimleri hatalı tanımlanması, analizlerde kullanılacak girdi parametrelerinin hatalı seçilmesine, deney sonuçlarının yanlış yorumlanmasına ve jeolojik modelin hatalı/eksikkurulmasına sebep olmaktadır (Şekil 2).



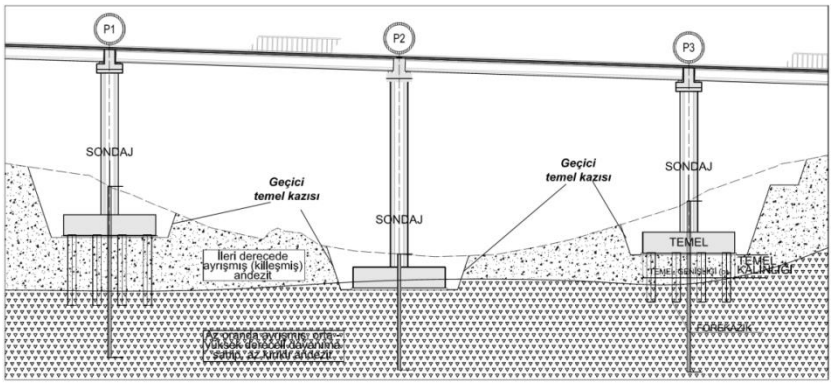
Şekil 2. Hatalı ve doğru litoloji tanımlaması ile oluşturulmuş jeolojik modeller

Sondaj yeri seçiminde bölgenin jeolojik yapısı ve inşası planlanan yapının öneminin dikkate alınmaması:Bu husus, özellikle köprü projelerinde çok dikkat edilmesi gereken bir konudur. Köprü projelerinde, köprünün her ayağı kendi içinde değerlendirileceğinden, ilgili şartnamelerde de belirtildiği üzere, her aksta veya ayak yerinde en az bir adet sondaj yapılmalıdır (Şekil 3 ve Şekil 4).

Sondaj sırasında yapılan arazi deneylerinin seçimiyle ilgili hatalar: Sondaj sırasında en çok karşılaşılan hatalar yerinde (arazide) yapılan deneylerin zemin türüne göre yanlış seçilmesidir. Örneğin çakıllı, bloklu kesimlerde SPT deneyinin yapılması. SPT verisi üzerinden yapılacak oturma, taşıma gücü vb. gibi hesaplamaların hatalı olmasına yol açacaktır. Bunun yanı sıra, çok kırıklı kayanın bulunduğu kesimlerde laboratuvar deneyleri yeterli nicelik ve nitelikte örnek alınamaması durumunda, bu kesimlerde presiyometre, dilatometre gibi kayanın yerindeki jeomaknik parametrelerini belirleyebilecek deneyler yapılması gerekmektedir. Bu tür ortamlar ve sorunlar zaman zaman sondör ve sondaj mühendisi tarafından gözden kaçırılabilmektedir.

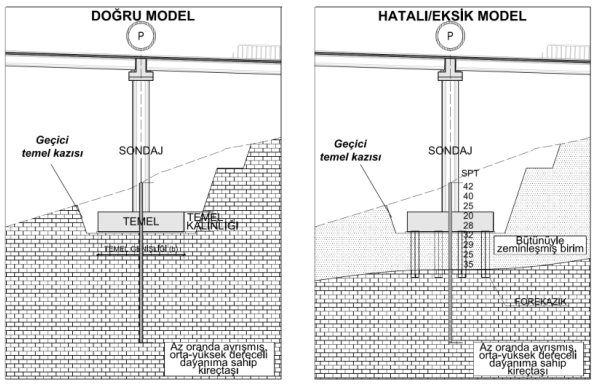


Şekil 3. Eksik sondaj ile kurulan hatalı jeolojik model



Şekil 4. Yeterli sondaj ile kurulan doğru jeolojik model

Şekil 5'de bu duruma ait bir örnek model verilmektedir. Arazide sondaj sırasında gerçekleşen mekanik kırıklar, matkaba aşırı yük yüklenmesi ve sondaj sıvısı seçiminin yanlış yapılması gibi etkiler nedeniyle zemin görünümü kazanan birim üzerinde SPT deneyleri yapılarak tamamen hatalı parametre seçimlerine ve hesaplamaların hatalı olmasına yol açmıştır.



Şekil 5. Sondajın hatalı yapılmasından doğan litolojik tanımlama ve deney hataları

Sondaj logunun hatalı hazırlanması: Sondaj mühendisinin hazırladığı logda yazan kaya değerlerinin (RQD, TCR, vb.) yanlış yazılması, litolojik birimlerin yanlış tanımlanması gibi durumlarla sık sık karşılaşılmaktadır. Bu hatalar yapılan hesaplamaları ve seçilen parametreleri doğrudan etkilemektedir.

3.2. Araştırma Çalışmalarında Ortaya Çıkan Mekanik Kaynaklı Hatalar

Araştırma çalışmalarında ortaya çıkan mekanik kaynaklı hatalar genellikle sondaj sırasında ve laboratuvar deneyleri sırasında ortaya çıkmaktadır. Aslında bu hatalar genellikle hatalı makine/cihaz seçiminden ve kalibrasyon eksikliğinden kaynaklanmaktadır.

Sondajgereçlerininhatalı seçimi: Bu durum, en çok karşılaşılan mekanik hataların başında gelmektedir. Zemine uygun karotiyer ve sondaj makinesi kullanılmazsa, örnek alımı oldukça güç olmaktadır. Ayrıca uygun ekipman seçilmediği taktirde, eğer ortam zemin ise,örnek alamama, kaya ise düşük karot verimine ve aşırı derecede mekanik kırıkların olmasına sebep olmaktadır. Bu hususlar, sondaj yapılan alanın hatalı bir şekilde yorumlanmasına sebep olmaktadır.

Deney aletlerinin kalibrasyonunun yapılmaması: Bu durum hem presiyometre, SPT gibi yerinde yapılan deneyler için, hemde laboratuvar deneyleri için geçerlidir. Deneycihazlarının bakımlarının yeterli ve kalibrasyonlarının düzenli olarak yapılmaması, bu deneylerden elde edilen parametrelerin hatalı olmasına sebep olmaktadır. Arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen parametreler doğrudan mühendislik hesaplamalarında kullanıldığından, yapılacak yanlışlar çok önemli hatalara sebebiyet vermektedirler.

4. JEOLOJİK MODEL VE ÜST YAPI İLİŞKİSİ

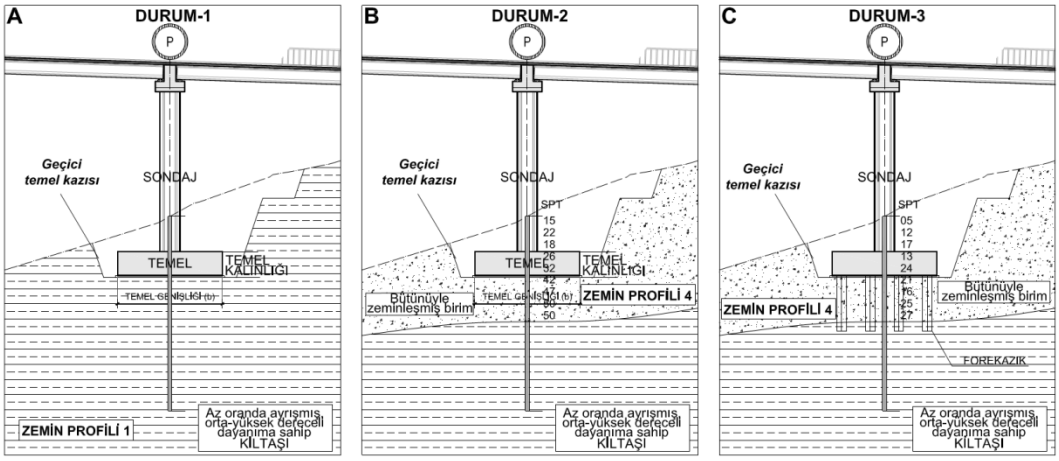
Jeolojik modelin doğru olarak oluşturulması, üst yapı tasarımını doğrudan etkilemektedir. Üst yapı tasarımı içerisinde bulunan temel alt kotlarına bağlı olarak kolon ve perde boyları, yapı zemininin durumuna göre seçilecek olan temel sistemi, yapı - zemin ilişkisinin tanımlanmasında kullanılan zemin yatak katsayısı, köprünün oturduğu yapı zemini ve buna bağlı olarak deprem davranışı belirlenmektedir. Bu hususların hepsi köprü projesinin almış olacağı nihai halini etkilemekle beraber projenin maliyet ve güvenlik parametrelerine de doğrudan etki etmektedir.Bu jeolojik durumlar köprü projeleri hazırlanırken girdi parametresi olarak kullanılarak değerlendirmeye alınmaktadır. Bu çalışmada sadece zemin profilinin oluşturduğu deprem davranışı ele alındığı zaman üst yapı üzerinde maliyet ve güvenlik açısından ne kadar etkili olduğu Bölüm 5'de karşılaştırmalı bir örnekle anlatılmıştır.

5. DEPREM DAVRANIŞININ KÖPRÜ PROJELERİNE ETKİSİ

Alt yapının jeolojik modelinin sadece temel sistemindedeğil, aynı zamanda üst yapıya gelecek olan deprem etkisinde de başat unsur olduğu görülmektedir. Bu çalışmada modellenecek olan aksın kolon boyu, zemin yatak katsayısı, üst yapı itkileri (ölü yük, hareketli yük, rüzgar yükü vb.) sabit tutularak zemin profiline göre seçilen deprem parametresinin köprü üzerinde maliyet ve güvenlik etkileri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

AASHTO StandardSpecificastionsforHighway Bridge (2002)'de köprünün yapı zemininin dört farklı grup içerisinde kaldığı belirtilmektedir. Bu zemin grupları içerisinde zemin profili 1 olarak adlandırılan yapı zemini her karakterde kayaları, zemin profili 2 olarak adlandırılan yapı zemini kiltaşı ve sert zeminleri, zemin profili 3 olarak adlandırılan yapı zemini orta sıkı killeri, zemin profili 4 olarak adlandırılan yapı zemini yumuşak killeri ve benzerlerini kapsamaktadır.

Bu bölümde, 3 adet jeolojik model hazırlanarak deprem etkisinin farklı zeminler üzerinde ne gibi etkiler yaptığı gösterilmiştir. Aksın temeli, Şekil 6a'da görüldüğü gibi, AASHTO standartlarına göre zemin profili 2 olarak adlandırılan kiltaşı içerisinde, Şekil 6b ve Şekil 6c'de ise zemin profili 4 olarak adlandırılan çok ayrışmış (zeminleşmiş)kiltaşı içerisinde kalmaktadır. Şekil 6b ve Şekil 6c'de zemin profili aynı olmasına rağmen, Şekil 6b'de gösterilen temel yüzeysel, Şekil 6c'deki temel ise kazıklı temel olarak seçilmiştir.



Şekil 6. Köprü aks hesaplarında kullanılacak olan jeolojik modeller

Tasarlanan köprünün birinci deprem bölgesinde yer alan 6 açıklıklı, kesit yüksekliği 180 cm olan ön germeli, ön çekimli kirişli olduğu varsayılmıştır. Açıklıkların 41.50 m olduğu düşünülerek ele alınan orta ayağın yüksekliği 32 m olarak tasarlanmıştır. Diğer ayaklarında uygulamada karşılaşılabilecek yükseklikler seçilerek kontrol modelleri oluşturulmuştur. Orta ayak temel kalınlığı 3 m seçilmiş, tüm durumlarda aynı kalınlık kullanılmıştır.

Ayrıca zemin profili 4 olarak seçilen durum 3'de Ø120'lik fore kazıklı derin temel, diğer durumlarda yüzeysel (sığ) temel olarak seçilmiştir. Böylelikle yanlış temel sistemi seçiminin etkiside incelenmiştir. Kullanılan malzemeler beton sınıfları kirişlerde C45, fore kazıklarda C25, diğer elemanlarda C30 olarak seçilmiştir.

Her durum için bütün değişkenler aynı tutulmuş yalnız jeolojik çalışmalardan dolayı oluşan deprem etkileri değiştirilerek jeolojik sonuçların etkisi irdelenmiştir. Üst yapı modellerinde sadece deprem spektrumları değiştirilerek farklı zemin ve kaya sınıflarında oluşacak deprem kuvvetleri bulunmuş ve aynı orta ayakta bu farklı yükler altında temel tasarımı yapılmıştır.

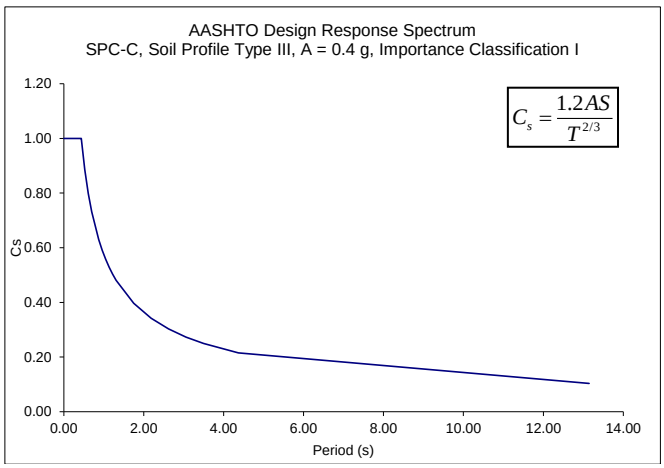
Bu senaryolardan durum 2'deyapılan bir uygulamanın projelendirilmesinde sadece mühendislik jeolojisi açısından yapılacak hatalar ve eksik çalışmalar sonucunda hem ekonomi hem de güvenlik açısından sorun oluşacağı görülmektedir. Eğer durum-2 yerine durum-1 senaryosu kullanılsaydı, deprem etkilerinin, Çizelge 1'den, %30 daha az hesaplandığı görülecektir. Böylelikle tasarlanan orta ayak temelinin deprem anında oldukça hasar alacağı görülmektedir.

Deprem etkisiyle köprü eksenine paralel yönde mesnet reaksiyonuna boyuna yönde deprem etkisi, dik yönde mesnet reaksiyonuna enine yönde deprem etkisi denir. Çizelge 1'de farklı durumlarda köprüye gelen deprem etkileri gösterilmektedir.

Çizelge1. Üst yapı deprem etkileri

Durum No.	Boyuna Yönde Deprem (kN)	Enine Yönde Deprem (kN)
Durum - 1	328.77	453.18
Durum - 2	482.09	500.99
Durum - 3	482.09	500.99

Deprem etkilerinin bu kadar farklı olmasının sebebi, her zemin sınıfında farklı salınımlardan oluşan deprem davranışıdır. Bu deprem davranışı sonlu elemanlar yöntemini kullanılan çeşitli hesaplama programlarına deprem spektrumları olarak tanıtılması sonucu modellenmektedir. AASHTO Standard Specificastions for Highway Bridge (2002)'de verilen 3.6.1 maddesine uygun olarak oluşturulan spektrumlardan tipik bir örnek durum 1 için Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tasarım spektrumu AASHTO,Standard Specificastions for Highway Bridge.

Durum 3, durum 2 yerine seçilirse %15 kadar daha fazla donatı kullanılması söz konusu olacaktır. Örnek kesitin farklı senaryolarda birim alanda gerekli donatı Çizelge 2'de verilmiştir. Böylelikle köprü maliyeti aynı oranda artmış olacaktır.

Çizelge 2. Gerekli temel donatı alanları

Durum	Birim metrede toplam donatı alanı
Durum 1	34600 mm²
Durum 2	44505 mm²
Durum 3	49870 mm²

6.SONUÇLAR

Bu çalışmada jeolojik modellemenin köprü projeleri üzerine etkisi, jeolojik modelleme için gerekli çalışmalar ve bununla ilgili yapılan hatalar değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre başlıca çıkarımlar aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

Köprü projelerinde yapı zeminin tam olarak doğru bir şekilde tanımlanabilmesi için yapılması gereken mühendislik çalışmaları 4 aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar; ön araştırma çalışmaları, yüzey çalışmaları, yer altı çalışmaları, laboratuvar çalışmalarıdır. Bu aşamalarda ortaya çıkan hatalar insan kaynaklı ve mekanik kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Bu çalışmada köprü tasarımlarında ele alınan etkilerden deprem kuvveti irdelenmiştir. Depremin kuvvetlerinin sadece deprem bölgeleri ile ilgili olmadığı, ayrıca zemin sınıfınında önem arz ettiği görülmüştür.

Üst yapı hesapları yapılırken seçilen zemin profillerinin tamamen jeolojik modelle ilişkili olması sebebiyle jeolojik çalışmaların doğruluğunun köprü güvenliği ve ekonomi açısından çok önemli olduğu görülmektedir. Hatalı veya eksik jeolojik çalışma bir köprünün sadece bir ayağında maliyet artışının %15 oranlarında olmasının yanı sıra güvenlik açısından %30 oranlarında daha az güvenli yapılacak köprü tasarımları gibi tehlikeli durumları da ortaya çıkmaktadır.

7. KAYNAKLAR

AASHTO, 2002. Standard Specificastions for Highway Bridge.17th Edition, Washington DC.
Tarhan, F., 2002. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayını, Trabzon.

Beton Kaplamalı Almata/Kazakistan Otoyolundaki Hidrojeolojik ve Jeoteknik Koşulların Değerlendirilmesi ve Oturma Sorunlarının Çözümü

Evaluation of the Hydrogeological and Geotechnical Conditions to Solve the Settlement Problems at the Concrete Highway Almaty/Kazakistan

M. Vardar[1,*]

[1] *İTÜ Maden Fakültesi, MJKM (EGRM), Müh. Jeolojisi ve Kaya Mekaniği Maslak 34469 İstanbul (*vardar@itu.edu.tr, mahirvardar@gmail.com)*

ÖZ: Doğuş-Gülsan İş Ortaklığı tarafından yapımı sürdürülmekte olan Almata-Horgos Beton Kaplamalı Otoyolu (Kazakistan) çalışmaları sırasında suya doygun-çok yumuşak ve çok gevşek nitelikli, bataklık özelliğindeki zemin koşullarıyla karşılaşılmıştır. Mevcut proje paftalarında dikkate alınarak belirtilmemiş olan bu konu yerinde incelenmiş ve olası çözümler için tipik kesitler oluşturulmuştur. Zaman ve para ekonomisinin yanı sıra, teknik yapılabilirliği ve kalıcı stabilite ile rijit kaplamanın oturma farklılıklarına karşı olan hassasiyetini dikkate alan öneriler getirilmiştir. Bu öneriler başta mühendislik jeolojisi, güzergah jeolojisi ve hidrojeoloji gibi çalışılan ortamın ve koşullarının yeterli, doğru ve güvenilir düzeyde bilinmesine ve geçilen temel kayacının (zeminin) jeomekanik davranışının gerçeğiyle benzeşen düzeyde modellenmesine dayandırılmıştır. Çalışmanın beton kaplama yollar için getirdiği en önemli yenilik, zemin ve dolgulardaki oturma sürecinin ve miktarlarının denetlenmesinden çok, komşu noktalar arasındaki yamulma farklarının önlenmesinin otoyol kaplamasının stabilitesinde belirleyici olduğunu öne çıkarmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Beton Kaplamalı Otoyol, Otoyollarda Oturma-Çökme, Oturmalardaki Kritik Yamulma Açısı, Kritik Eğrilik Yarıçapı, Oturmaların İzlenmesi

ABSTRACT: *During the construction of the Doğuş-Gülsan Joint Venture Almaty-Horgos (Kazakhstan) Motorway, water-saturated, extremely soft and loose, swampy ground conditions were encountered. Since a discussion of these geological issues is lacking in the existing project reports, for this study, the highway route was examined on-site and typical sections were created for possible solutions. Recommendations that take into account time and money economy, as well as technical feasibility and lasting stability of the rigid concrete coating based on its sensitivity to the differences in settlements were proposed. These recommendations are primarily based on engineering geology, route geology and hydrogeology findings that provide information on the adequateness, accuracy and reliability of the data on the setting and environmental conditions, as well as realistic simulations of the geomechanical behavior of the traversed soil ground. The major innovation of this study is the determination that the prevention of the differences in strain between the neighboring points on the rigid concrete plates are more predictive of the long term stability of the concrete pavement motorways than the control of the process and the amount of settlement in the ground and dam filling.*

Keywords: *Concrete Covered Highways, Motorway Settlement Problems, The Critical Strain of Settlement, Critical Radius of Curvature, Settlement Monitoring*

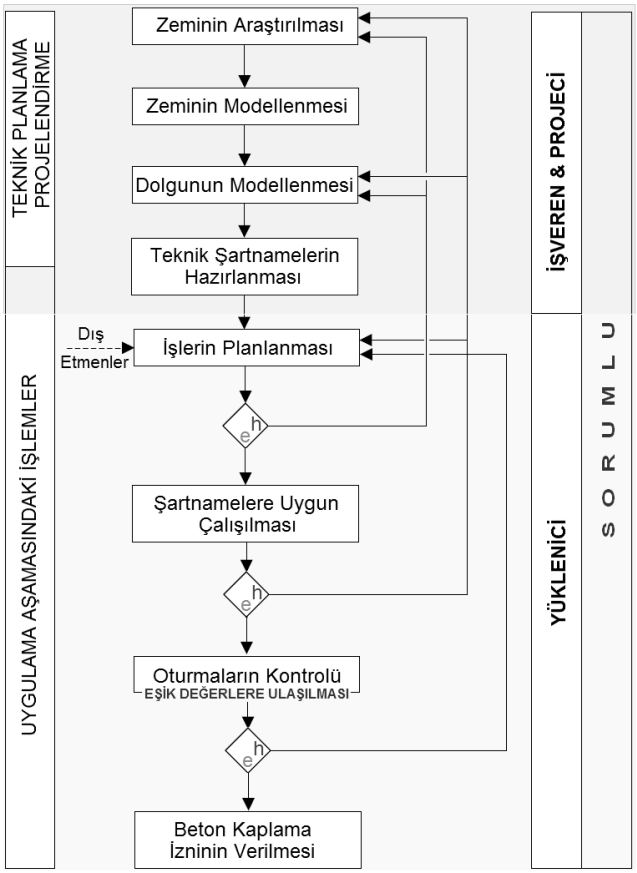
1. GİRİŞ

Doğuş-Gülsan tarafından yapımı sürdürülmekte olan Almata-Horgos/Kazakistan Beton Kaplamalı Otoyolu çalışmaları sırasında suya doygun-çok yumuşak ve çok gevşek nitelikli, bataklık özelliğindeki zemin koşullarıyla karşılaşılmıştır. Mevcut proje raporu ve paftalarında dikkate alınarak belirtilmemiş olan bu konu yerinde incelenmiş ve olası çözüm önerilerini oluşturmak üzere çalışma ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. Bu öneride zaman ve para ekonomisinin yanı sıra, teknik yapılabilirlik ve kalıcı rijit kaplamanın oturma farklılıklarına karşı olan hassasiyeti dikkate alınmıştır.
Otoyol projeleri ve uygulamalarının başarısı ve kalıcı niteliği, başta mühendislik jeolojisi, güzergah jeolojisi ve hidrojeoloji gibi çalışılan ortamın ve koşullarının yeterli, doğru ve güvenilir düzeyde

bilinmesine ve geçilen temel kayacının (zeminin) geomekanik davranışının gerçeğiyle benzeşen modellenmesine dayanmaktadır. Bu durum yol boyunca farklılaştıkça, benzeşen yerlerin sınırlarının konulması ve böylece tanımlanmış olan kesimlerin her biri için ayrı ayrı tip kesitlerin hazırlanmasını gerektirmektedir. Bu ortamsal ve davranışlara bağlı benzerlik bölgelerinin (homojen zonların) içinde ve üstünde de yine yükseklikleri, boyut, biçim ve türleri farklı olabilen dolgu, yarma, köprü, alt-üst geçit, menfez gibi mühendislik yapıları oluşturulmaktadır. Bu yapıların her birinin yapım yöntemi, malzemesi ve kalıcı durum ve davranışlarının da yine doğal ortamlara uygun ve oradaki koşullarla uyumlu olması gerekmektedir. Otoyol projeleri bu bakımdan en üst beklentileri karşılamaya ve sağlamaya yönelik özellikleri olan projelerdendir.

İçinde bulunulan durum, üstün nitelikli beton kaplamalı bir otoyolun kalıcı rijitlikte imalini gerektirmektedir. Bu da hem dolgunun ve hem de dolgu altındaki zeminin, tanımlanmış yüklenme koşullarında ani ve zamanla oluşabilecek oturmalar ve genel anlamda şekil değiştirmeler açısından anlaşılması, denetlenmesi ve katılaştırılması anlamına gelmektedir. Yapılacak çalışmalar, kullanılacak malzemeler, uygulanacak işlemler ve alınacak önlemler bu tek, değişmez hedefe yönelmek-yönlendirilmek zorundadır. Oturmaların en belirleyici etmenleri gerilme-deformasyon ilişkini kontrol eden "zemin profili" ile "su" ve daha ağırlıklı olarak da "zaman"dır.

Bu çalışma, yukarıda özetlenmiş olan temel ilkelere göre uluslararası kabul gören anlayışla hazırlanmıştır. Bu bakış Şekil 1'de bir akış diyagramı halinde, proje aşamalarını ve sorumluluk alanlarını da gösteren biçimde özetlenmiştir.



Şekil 1. Otoyol projelerinde teknik yeterlilik ve toplam kalite sağlanması

Bu akış şeması incelendiğinde; başarılı bir sonuç için ortak anlayışa dayalı, uyumlu ve verimli bir iş ve çalışma ortamının bulunmasının gerektiği görülmektedir. Sürekli sorgulama ve denetlemeyle yürütülen geri beslemeli tutum ve davranışlarla, EN ISO 9001:2000 tarafından istenen "Kalite yönetim

sistemi"ne uygun sonuçlara varılabilmektedir. Bu ise hem projenin kurgulanmasında ve teknik şartnamelerin oluşturulmasında, hem de sözleşmelerin içerik ve kapsamlarında "Toplam kalite" anlayışına yer verilmiş olmasına bağlıdır. Prensipte otoyollar için öngörülen işletme ömrü 60 yıldır. Bu sürede kalite ve konfor kaybı oluşmamalıdır.

Bunun için uyulması gereken iki ana husus aşağıdaki gibidir.

a) Dolgu ve zemin bileşenindeki göreceli oturmalar doğrusal ve açısal birim deformasyonlar bakımından toplam kalite norm ve standartlarının ifade ettiği eşik değerlerin altına düşmeden, hiçbir rijit kaplamalı otoyol beklenen ve istenen kalıcı kalitede imal ve inşa edilemez.

b) Ayrıca bu eşik değerlere yapay-çevre (tekno-enviroment) koşullarında nasıl ve ne zamanda ulaşıldığı da kanıtlanmak zorundadır. Bu maksatla her homojen bölge için ilk ikisi daha sık (50-100 m aralıklarla), diğerleri 250'şer metrede bir olmak üzere, çok sayıda programlanmış ölçme ve izleme kesitlerine ihtiyaç vardır.

2. EMNİYET VE KONFOR İÇİN GEÇERLİ NORM VE STANDARTLAR

Güzergahtaki zemin ve dolgunun yapım çalışmaları sırasında birlikte oluşturdukları zamana bağlı deformasyonlar sönümlenmeden beton kaplamanın imalatına başlanmaması gerekir. Bu konuda birbirinden farklı olmakla birlikte, teknik açıdan yeterli görülen eşik değerler Çizelge 1'de derlenmiştir. Bu değerleri, yol üstyapı plağının imalat sonrasında, zaman içinde yapabileceği (izin verilebilecek) en büyük deformasyonlar şeklinde anlamak gerekir. Başka bir anlatımla; bu eşik değerler zemin+dolgu yapısında ölçülen deplasmanların teknik açıdan yeterli düzeyde sönümlenmesi için kabul edilebilecek oturma miktarlarıdır.

Çizelge 1. NCB (Bjerrum (1963), Rimant (1968),VNIMI (1958), DIN EN 1992 (Eurocode 2), RIL 836 (1999/2002)'ya göre donatısız beton plak temellerinde izin verilebilen oturma miktarları

	Almanya DIN EN 1992 (Eurocode 2)	İngiltere	Polonya	Ukrayna Donetz	Kazakistan Karaganda
Çökme Δs (mm)	< 20	< 5	< 25	<20	< 40
Birim oturma ε (mm/m)	< 1	< 0,5	< 1,5	2	4
Yamulma $\tan \beta_{max}$	1:500	1:2000	1:400	1:250	1:167
Yamulma Açısı β_{max} (^{o})	0,12	0,03	0,14	0,23	0,34
γ (mm/m)	2	0,5	2,5	4	6
Eğrilik Yarıçapı ρz (km)	-	-	> 20	20	3

3. GÜZERGAHIN MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ VE JEOMEKANİK DEĞERLENDİRMESİ

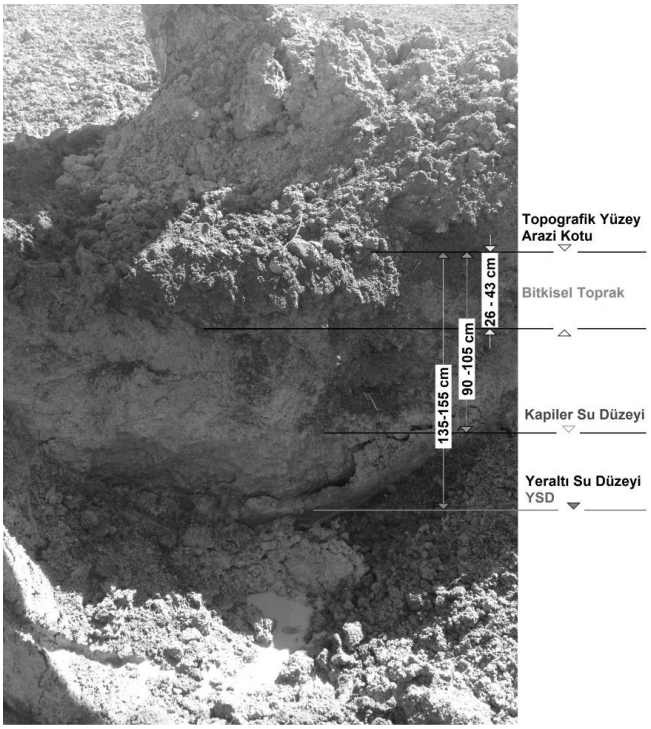
Arazi koşullarını ve jeolojik-hidrojeolojik durumu görmek ve değerlendirmek için yol boyunca incelemelerde bulunulmuştur. Otoyol, güneyindeki Altay Sıradağları ile kuzeyindeki Kapşagay Gölü arasında kalan ovanın içinden geçmektedir. Altay Sıradağları'ndan gelen sular ve daneli malzeme bu kesimde Talger, Esik ve Turgen Irmakları ile Kapşagay Gölü havzasına taşınmaktadır. Yamaçlardan sızan veya akışa geçen bu sular yeraltını beslemekte ve dökülen, sürüklenen ve yüzdürülen malzeme boyutlanarak ovayı doldurmaktadır. Sonuçta dağ eteklerinden göle doğru yamaç molozu ve bloktan oluşan malzeme birikimleri, önce çakıl ve kum, eğimin azaldığı yerlerde silt ve kil, düzlüklerde de kil ve organik malzeme içeren alüvyonlara dönüşmektedir. Güneyden kuzeye gelindikçe, iriden inceye doğru değişen bu birikme, artan akarsu debilerine, yatakların yer değiştirmelerine ve taşkınlara bağlı olarak da düşeyde birbirine geçişli katmanlar, çapraz ve merceksi yapılar oluşturmaktadır. Özetlenecek olursa; tüm güzergah boyunca farklı malzeme dizilimlerinin bulunması bölge jeolojisinin gereğidir. Boyutlanmalarının yanı sıra yerine göre, kalınlık, sıkılık ve kıvamları değişen bu zeminlerin fizikomekanık parametreleri ve mekanik davranışları ile hidrojeolojik özellikleri de farklılaşmaktadır. Bu farklılıkları belirlemek üzere yol boyu yeniden haritalanmış, sondajlardan örnekler alınmış,

laboratuarda doğal su içeriği, likit limit, plastik limit, plastik indeks, Proktor deneyleri yapılmış, organik malzeme içeriği belirlenmiş, yeraltısuyu seviyesi ölçülmüş ve %20 ve %150 arasındaki değerlerde tanımlanan CBR_d tane boyu 22 mm'den küçük zeminlerde dinamik CBR testleri ile davranış benzerliği olan kesimler ayırtlanmıştır. Buna göre problemli görülen 77 km'lik güzergâhın yaklaşık 27 km'sinin uygun (% 37,5) ve 45 km'sinin (%62,5) de sorunlu olabileceği anlaşılmıştır.

Km 30+300'de sıyırma kazıları yapılarak dolgu kotuna inilmeye çalışılmıştır. Ancak verimli çalışabilecek kazıcılar zemine battıkları için buraya sokulamamış ve çok güç şartlar altında daha hafif kepçeli kazıcılarla zemin koşulları tanınmaya çalışılmıştır. Bu kesimde sıyırma kazısının 55 cm kadar altında yeraltısuyu ile karşılaşılmıştır (Şekil 2).

Şekil 2. Km 30+300'deki sıyırma kazıları ve 55 cm kadar derinde bulunan yeraltısuyu

Aynı bölgenin daha iyi nitelikli olduğu düşünülen başka bir noktasında açtırılan 2,5 m derinliğindeki deneme çukurunun suya doygun alt kısmı hemen çökmüştür. Buradaki zemin profilinde 26 – 43 cm kalınlığındaki bitkisel toprak altında killerin ve siltli killerin bulunduğu görülmüştür. Yeraltısuyu 135-155 cm kadar derinde olup, kapilarite nedeniyle yaklaşık 35 cm kadar yükselmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Açılan deneme çukurunda karşılaşılan zemin profili ve suya doygun siltli killer

Güzergah üzerindeki bataklık kesimde müşavir tarafından Turgen malzemesi ile yaptırılan deneme dolgularında silindirle sıkıştırmanın başarılamadığı görülmüştür (Şekil 4). Burada da yeraltısuyu çok

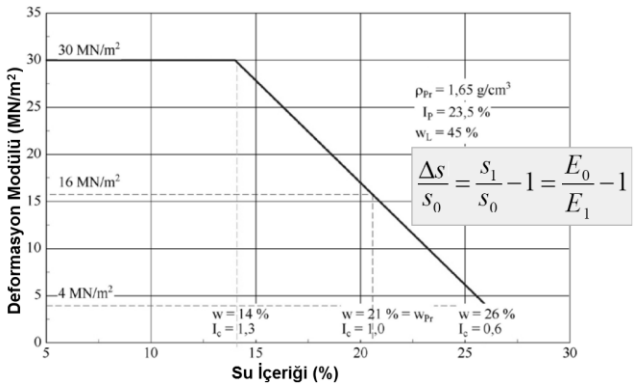
yüksekte olup, zemin çok büyük oranda kil ağırlıklıdır. Çizelge 2'de zeminin oturma potansiyelinin kil içeriğine ve plastisite indeksine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. İncelemiş bulunduğumuz zeminlerin olası kil içerikleri % 60'ın, beklenen plastisite indeksleri de % 35'in üzerinde olduğundan, geçilecek olan bu kesimlerde çok yüksek oturma potansiyelinin bulunduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4. Bataklık arazi üzerinde yapılan sıyırma kazıları ve deneme amacıyla hazırlanan dolgu

Çizelge 2. Temel zeminindeki oturmaların kil içeriğine ve plastisite indeksine bağlı olarak değişimi

Kil İçeriği <0,0002 mm (%)	Plastisite indeksi Ip=wL-wP (%)	Oturma Potansiyeli
> 60	> 35	çok yüksek
> 50	> 25	yüksek
< 30	< 30	orta
< 20	< 12	az

Killi zeminlerin su içeriğine bağlı olarak kıvam değiştirmeleri ve sonuçta deformasyon Modüllerinin azalması da oturmaları arttırmaktadır. Şekil 5'de daha düşük plastisite indeksine ve kil oranına sahip bir zemin örneği için farklı su içeriklerinde deformasyon modüllerinde oluşabilen değişim gösterilmiştir. Buna göre böyle bir ortamda 3 m yüksekliğindeki bir dolgunun 4 m kalınlığındaki zeminde oluşturacağı düşey deplasmanların 40-50 cm'ye ulaşacağı anlaşılmıştır.



Şekil 5. Su içeriğine bağlı olarak deformasyon modülünün değişimi

Diğer bir konu yeraltı suyundaki hareketler ve su seviyesindeki değişimlerdir. İnce daneli malzemenin yıkanması ve taşınmasına bağlı malzeme kayıpları, dolgu gövdesi ve temel altı zemini için ciddi bir tehdittir. Diğer olumsuz etki ise, stabilite kaybına ve malzeme yayılmasına neden olan boşluk suyu basınçlarının oluşmasıdır. Prensip olarak, gövde ve dolgu temelinin bundan etkilenmeyecek şekilde

tasarımlandırılmış olması gerekir. Bu konuda dolguda ve karışık zeminlerdeki olası su hareketlerinin hesabında kullanılmış olan permeabilite değerleri Çizelge 3 ve 4'de verilmiştir.

Çizelge 3. Elekarası (eş boyutlu) zeminin beklenen su geçirimlikleri

Zemin Cinsi		Boyut (mm)	Permeabilite (m/s)
Çakıl	kaba	20-63	5×10^{-1}
	orta	6,3-20	10^{-1}
	ince	2,0-6,3	5×10^{-2}
Kum	kaba	0,63-2,0	10^{-2}
	orta	0,20-0,63	5×10^{-3}
	ince	0,063-0,20	10^{-3}
	siltli	0,04-0,063	10^{-4}
Kumlu silt / Silt		0,02-0,04 / 2×10^{-3}-0,02	5×10^{-5} / 10^{-6}
Kil		$< 10^{-3}$	10^{-7}

Çizelge 4. Farklı boyutta daneler içeren karışık zeminlerin beklenen su geçirimlikleri

Zemin Cinsi		Dane Boyutu (mm)	Permeabilite (m/s)	(m/gün)
Çakıl	Kaba (iri)	>10	$1,5 \times 10^{-3}$	>125
	orta	5-10	$1,1\text{-}5,8 \times 10^{-3}$	75-125
	ince	2-5	$4\text{-}4,7 \times 10^{-4}$	60-75
Kum	kaba	0,5-2	$3\text{-}4,6 \times 10^{-4}$	40-60
	orta	0,25-0,5	$4\text{-}5,8 \times 10^{-4}$	25-40
	orta, killi	0,25-0,50	$5,9 \times 10^{-5}$-$2,2 \times 10^{-4}$	15-25
	ince	0,05-0,25	$1,1\text{-}1,8 \times 10^{-4}$	5-15
	siltli	0,01-0,05	$1,8\text{-}5,8 \times 10^{-5}$	1,5-5
	killi	0,001-0,05	$5,8 \times 10^{-5}$-$1,1 \times 10^{-6}$	0,5-1
	Silt	0,01	$5,8 \times 10^{-6}$	0,5

Drenaj amacıyla tabanda yeterli kalınlıktaki bir filtre dolgusunun, dolgu yan eteklerinde yüzey geometrisi ve istimlak koşulları elverişliyse açıktaki hendeklerin, değilse etek altlarında gömülü drenaj hendeklerinin imali gerekli görülmüştür. Killi ve siltli zeminlerde suyun bileşimi, viskozitesi, filtre malzemesi ile doğal ortamın sıkışma dereceleri ve inhomojenliği hesaplarda çok yüksek bir güvenlik sayısı ile çalışılmasını gerektirmiştir. Süzücü ortamın geçirimliliği bu nedenle süzülen ortamın geçirimliliğinden en az 100 kat daha fazla olacak şekilde seçilmiştir. Yüzeyden açılan drenaj hendeklerinin veya süzülme zonu tabanında kalacak şekilde üzerleri filtre malzemesi ile örtülmüş olan hendeklerin geçirebilecekleri debi, kullanılan hendek dolgusunun permeabilitesine, hendeğin eğimine ve kesit alanına bağlı olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Farklı boyutlardaki filtre malzemesi ile doldurulan hendeklerin drenaj debileri için gereken kesit alanları (m^2)

Debi (m^3/s)	Çakıl (mm)			Kaba kum (mm)
	Kaba (20-63)	Orta (6,3-20)	İnce (2,0-6,3)	(0,63-2,0)
0,1	25	50	100	200
0,2	50	100	200	400
0,4	100	200	400	800
0,5	125	250	500	1000
1	250	500	1000	2000
2	500	1000	2000	4000
5	1250	2500	5000	10000

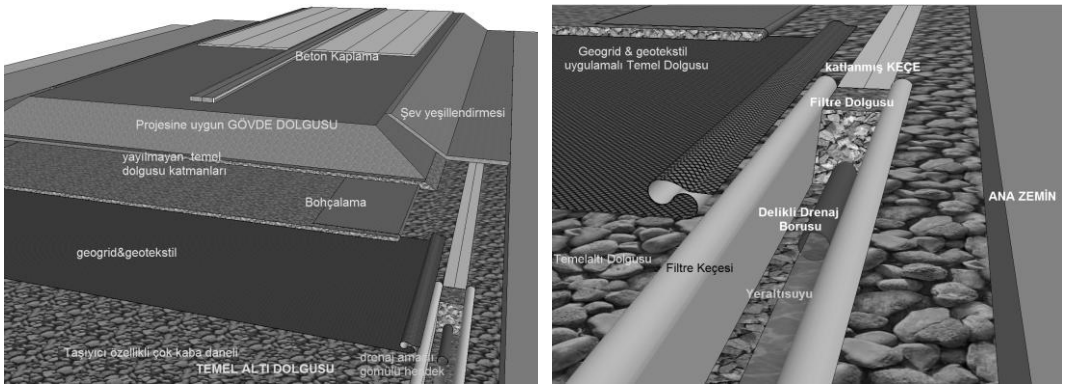
4. SONUÇLAR

4.1. Jeoteknik Çıkarımlar ve Dolgu İmalatı Önerisi

Güzergahın açıklanan mühendislik jeolojisi, jeomekanik ve hidrojeolojik özellikleri,

a) temel dolgusu altında yeraltısuyu hareketlerini denetleyen ve
b) taşıyıcı özelliği olan çok kaba daneli bir katmanı,
c) etek altlarında drenaj amaçlı gömülü hendekleri,
d) bunların topladığı suyun düşük kotlara deşarjını
e) gövdenin tabanında yayılmayan bir temel dolgusunun yapılmasını
f) bu amaçla tek kat/gerektiğinde birkaç kat olmak üzere jeogrid ve jeotekstil birleşimli bohçaların kullanılmasını,
g) oturmaların denetlenmesini
h) eşik oturma ve güvenli yamulma açısı değerlerine ulaşıldığının kanıtlanmasından sonra üst beton kaplama işlerinin yapılmasını gerektirmiştir.

Katmanlı ve jeogrid ve jeotekstil uygulamalı dolgu tip kesiti ile drenaj önlemlerini gösteren açıklayıcı ayrıntı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Katmanlı ve jeogrid ve jeotekstil uygulamalı dolgu tip kesiti ile dolgu etekleri altına yerleştirilen gömülü drenaj hendeklerinin imalat ayrıntısı

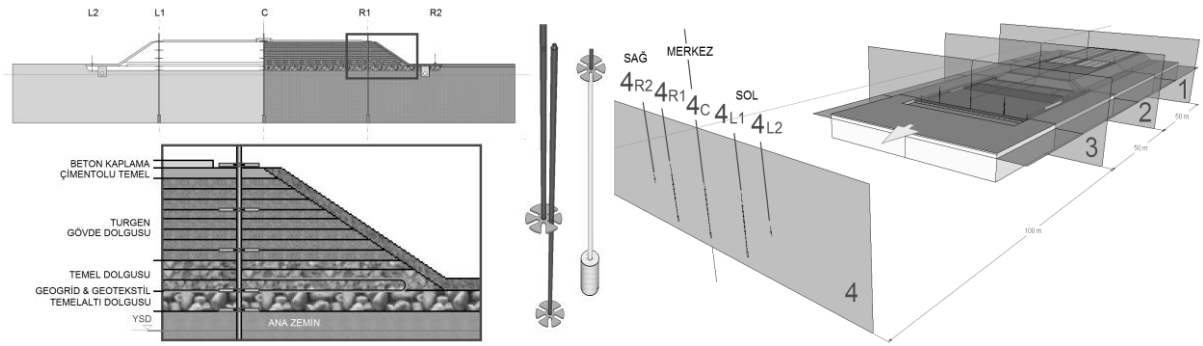
4.2. Ölçme ve izleme Programı

İncelenen otoyol kesiminde değişken zemin ve yeraltısuyu koşullarıyla karşılaşılmıştır. Bu nedenle temel zemininin taşıma gücü ve deformasyon (konsolidasyon-oturma) özellikleri sonucu dolguların yayılma ve gömülmesine bağlı hacimsel değişmelerin oluşacağı anlaşılmıştır. Dolguda ve zemin içinde yapım aşamasında oluşan bu göreceli oturmaların doğrusal ve açısal değişimleri norm ve standartlarının ifade ettiği eşik değerlerin altına düşmeden, rijit kaplamalı otoyol başarıyla inşa edilemeyeceğinden, yapım süreci boyunca deplasmanların bir "yönlendirme ve kontrol ölçümleri programı" ile yerinde izlenmesi gerekli görülmüştür. Bu amaçla öngörülen ölçüm kesiti, programı ve aletleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu maksatla her homojen bölge için ilk üçü 50 m aralıklarla, dördüncüsü 100 m sonra ve diğerleri 250' şer metrede bir olmak üzere çok sayıda programlanmış ölçme ve izleme kesitleri önerilmiştir.

4.3. Projelendirme Kusurlarından Çıkarılacak Ders

Bu projede dikkati çeken en belirgin eksiklik, yol güzergahının belirlenmesinde jeolojik ortamın ve koşulların yeterince önemsenmemiş olduğudur. Arazinin mühendislik jeolojisi modeli kurulmaksızın, yalnızca sınırlı sayıdaki zemin mekaniği parametreleri kullanılarak projelendirmeye gidilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

Ortamın nitelik ve özelliklerinin teknik sorun çıkarmayacak düzeyde benzerlik göstereceği, gerektiğinde menfez, alt geçit ve köprülerde kazıklı temellerin yeterli olabileceği düşünülmüştür.



Şekil 7. Yönlendirme ve kontrol ölçümleri kesiti ve önerilen ölçüm düzeneği

Uygulamada karşılaşılmakta olan sorunlar; otoyol çizgisinin yeraltısuyu düzeyinin çok yüksekte olduğu ve killi-siltli malzemenin yoğunlaştığı Kapşagay Gölü'nün güneyinden geçirilmiş olmasından kaynaklanmıştır. Arazi çalışmalarımız sırasında, mevsimsel ve kalıcı göllenmelerin ve bataklıkların oluştuğu bu güzergâhın 3-5 km kuzeyinde orta-sıkı kum ve çakılların ağırlıklı olduğu ve yer altı suyu düzeyinin de 10-15 m kadar derinlere düştüğü, sorunsuz yeni güzergâh seçeneklerinin bulunduğu görülmüştür. Bu konu ilgililere iletilmiş ve doğru bulunmuşsa da, projenin ihalesi yapılmış olduğundan ve çıkarabileceği idari ve yasal sorunlar nedeniyle gündeme alınmamış, mevcut proje güzergâhının aynen korunması istenmiştir.

Zaman ve maliyet artışı yanında ileride bakım, tutum ve işletme açısından da zorluklar ve oturma riskleri taşıyan bu durumdan alınacak en önemli ders, mühendislik jeolojisi modelinin olmadığı yerde hiçbir güvenilir geoteknik yapının oluşturulamayacağıdır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Doğuş-Gülsan İş Ortaklığı'nın isteği ve destekleriyle yürütülmüştür. Başta Sn. Meko Akova olmak üzere, tüm emeği geçen ve desteğini esirgemeyenlere en içten teşekkürlerimi sunarım.

6. KAYNAKLAR

Bjerrum, L., 1963. Allowable settlement of structures. Proc., European Conf. on Soil Mech. and Found. Engr., Weisbaden, Germany.

DIN EN, 1992. Design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings. EN 1992-1-1, Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.

RIL 836, 1999/2002. Deutsche bahn AG. Richtlinie für Erdbauwerke.

Rimant, A., 1968. Abbau von schachtsicherheitspfeilern. Freib. Forsch.H. A 448.

WNIMI-Institut, 1958. Die bewegungen der gebirgskörper und der tagesoberflaeche in den kohlengebieten der sowjetunion. moskau. Ugletek.

Bir Spor Tesisinin İnşaat Alanının Farklı Jeofizik Yöntemlerle İncelenmesi

Investigation of Construction Site of a Sport Facility by Different Geophysical Methods

M. Kirici[1], H. Karslı[2,*], R. Güney[2], Ç. C. Yılmaz[1]

[1] Zimer Müh. Müş. Hiz. İnş. Tic. Ltd. Şti, Trabzon
[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon
([*] hkarsli@ktu.edu.tr)

ÖZ: Bu çalışmada, Erzurum-Kiremitlik tepe'de bir spor tesisi inşa sahasının zemin yapısının detaylı incelenmesi ve jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi için 6 farklı jeofizik yöntem kullanılmıştır. Bu kapsamda; yer radarı, sismik kırılma, sismik yansıma, aktif (MASW) ve pasif (ReMi) kaynaklı yüzey dalgası analizi, düşey elektrik sondajı ve mikrotremör yöntemleri kendi uygulama ilkelerine göre kullanılmış ve ölçümlerden elde edilen veriler hassas bir şekilde değerlendirilmiştir. Zeminin yapısı ve dinamik parametreleri sismik yöntemlerden, su içeriği elektrik, sığ litolojik değişimleri yer radarından ve hakim salınım periyotları mikrotremör ölçümlerinden elde edilmiştir. Çalışma alanının jeofizik kesitleri yanal ve düşey yönde elde edilmiş ve bunlar yapısal ve litolojik açıdan yorumlanmıştır. Buna göre, zeminin pekişmemiş ve düşük dayanımlı olduğu, nemlenmiş kil merceklerini içerdiği, moloz ve yoğun kil, silt ve kum içerikli volkanik kayaçlardan oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeofizik Yöntemler, Spor Tesisi, Hakim Salınım Periyodu

ABSTRACT: *In this study, six geophysical engineering methods were employed to investigate in detail and determinate the geotechnical characterizations of soil profile in area of sport facilities placed in Erzurum city-Kimetliktepe. Within this scope, ground penetration radar, seismic refraction, reflection, active and pasive source surface wave analysis, vertical electrical soundings and microtremor methods were applied according to their application principles and the data from surveys were analyzed with precision. The sturcture and dynamic parametres from seismic, water content from electrical, shallow lithological variatons from ground radar and dominant oscillation period from microtremor were obtained for the soils of the study area. The geophysical sections and maps of the study area were obtained in horizonthal and vertical direction and they were interpreted in terms of structure and lithological cases. According to this, it is identified that the soil of the study area is consist of moist clayey, fractured and clastic volcanic rocks including debris and heavy clayey, silty and sand lens.*

Keywords: *Geophysical Engineering, Sport complex, Dominant Vibration Period*

1. GİRİŞ

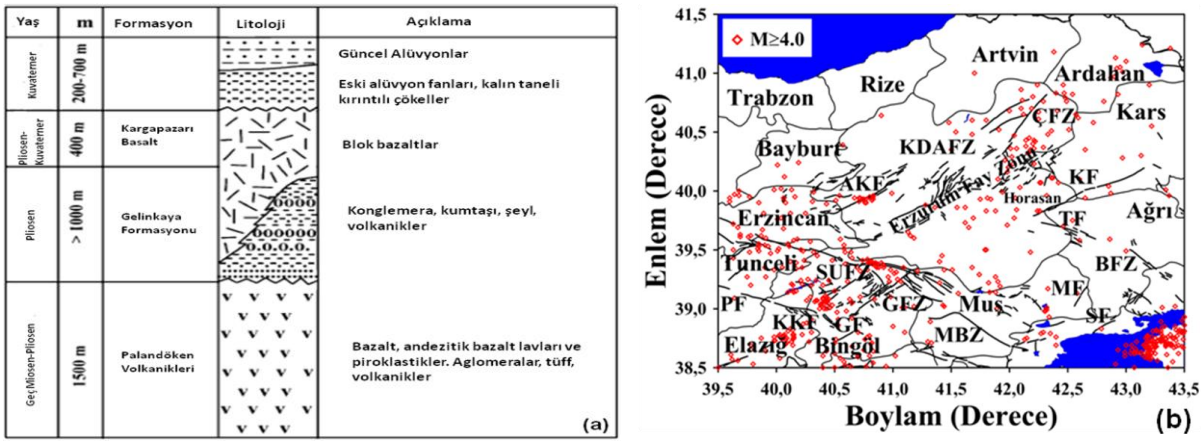
Jeofizik mühendisliği; yer kürenin içinin jeolojik yapısının 2- ve 3-boyutlu ayrıntılı şekilde araştırılmasını sağlayan ve yer ile ilgili birçok mühendislik problemine kısa zaman, ucuz maliyetle, hasarsız ve çevreye zararsız olarak çözüm üreten yöntem ve uygulama alanlarına sahiptir. Jeofizik yöntemler, herhangi bir mühendislik yapısına yönelik zemin araştırmaları için öngörülen geleneksel sondaj sayısını ve maliyetini azaltmada son derece katkı sağlayıcıdırlar (Abidin vd., 2011). Son yıllarda, yakın yüzey (<30 m ve 100 m) yer incelemelerinde, zeminin sıkılık-yumuşaklık profilinin belirlenmesi, dinamik yükler altında olası zemin sıvılaşması, büyütmesi kestiriminin yapılması, zeminin dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması, yer altında kırık-çatlak-boşluk-dolgu gibi süreksiz ve zayıf ortamların bulunması, temel kaya topoğrafyasının, yeraltısuyu seviyesinin haritalanması ve olası heyelan alanlarının belirlenmesi gibi çok geniş yelpazeye sahip olan yakın yüzey jeo-mühendislik problemlerinin çözümünde, son yıllarda yaygın olarak kullanılan jeofizik yöntemlerinden bazıları sismik, elektrik özdirenç, gravite, manyetik, elektromanyetik, radyometri, yüzey dalgası, mikrotremör ve yer radarı yöntemleri olarak sıralanabilir.

Bu yöntemlerin ilkeleri ayrıntılı olarak Reynolds (1997), Telford vd. (1990), Sharma (1997) ve Kearey vd. (2002) tarafından yazılmış kitaplarda bulunabilir. Sığ mühendislik zeminin yapısı, litolojisi ve dinamik elastik davranışlarının derinlik ve uzaklık boyutunda 1, 2 ve 3 boyutlu olarak belirlenebilmesi için birkaç jeofizik yöntemin aynı problemin çözümüne yönelik olarak kullanılması tercih edilmektedir. Böylece bir yöntemle belirlenemeyen bir zemin özelliği diğerleri ile açıklanabilmektedir.

Bu çalışmada, Erzurum-Kiremitlik tepe'de projelendirilen bir spor tesisi inşa sahasındaki zeminin yapısını 1- 2- ve 3-boyutlu detaylı olarak ortaya çıkarma ve jeoteknik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla 6 farklı jeofizik yöntem kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, sahanın sığ jeolojik yapısını detayları ile açıklamak için yer radarı, sismik yansıma, kırılma, çok kanallı yüzey dalgası analizi, elektrik özdirenç ve mikrotremör yöntemleri kullanılmıştır. Her bir yöntemden elde edilen bulgulardan, sahanın zemin yapısı ve elasto-dinamik özellikleri açıklanmaya çalışılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ VE SİSMOTEKTONİĞİ

Çalışma alanı, Türkiye'nin kuzey-doğusunda yer alan Erzurum il merkezine çok yakındaki (~10 km) Palandöken Belediyesi Kiremitliktepe mevkii sınırları içerisinde, Erzurum-Bingöl karayolunun (Refik Saydam Caddesi) doğusunda yer alır. Çalışma alanında; Pliyosen yaşlı Gelinkaya Formasyonu (Şekil 1a), Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve eski alüvyon birimleri gözlenmektedir (Timur vd., 1994). Bu birimler, yer yer yapay dolgu ve bitkisel toprak ile örtülüdür. Gelinkaya Formasyonu gevşek tutturulmuş çakıltaşı, kumtaşı ve tümüyle ayrışmış tüfit birimlerinden oluşmaktadır (Yılmaz ve Uysal, 1988). Erzurum ve civarı doğa olaylarına (heyelan, deprem, çığ düşmesi vd.) en çok maruz kalan illerden biridir. Bölge özellikle deprem açısından oldukça aktif olup, ilin hemen tamamı Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına (URL-1, 2015) göre 2. derece deprem bölgesi içinde yer alır (Şekil 1b). Bölgede günümüze kadar pek çok yıkıcı deprem meydana gelmiş, önemli hasarlar ve can kayıpları ile sonuçlanmıştır. Erzurum Havzası'ndaki en önemli aktif fay zonu Erzurum Fay Zonu (EFZ)'dur. Bu fay; Geç Miyosen yaşlı, 400 km uzunluğunda 10-25 km genişliğinde olup, DKD-BGB sol yönlü doğrultu atımlı fay özelliğindedir (Yarbaşı ve Bayraktutan, 2001). Bu fay zonu içerisinde birçok ters bileşenli faylar da bulunmaktadır. Erzurum havzası genel olarak, Doğu Anadolu sıkışma zonu içinde, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ile Ağrı Dağı faylarını birleştiren (Erzincan-Erivan arası) Erzurum Fay Zonunda (EFZ) gelişmiştir. Havza, Miyosen-Kuvaterner yaşlı volkanik temelli, andezitik-bazaltik lav akışlı dağ arası bir çöküntü havza alanlarından biridir (Yarbaşı ve Kalkan, 2009). Özellikle çalışma alanının bulunduğu Kiremitlik Tepeleri'nin kuzey sınırını oluşturan Telsizler Fayı ve buna paralel Yenişehir Fayı sol yanal atımlı ters fay niteliklidir. Ayrıca bu tepeler KKB doğrultulu sağ yanal doğrultu atımlı normal faylarla birbirlerinden ayrılmışlardır (Barka ve Bayraktutan, 1985).



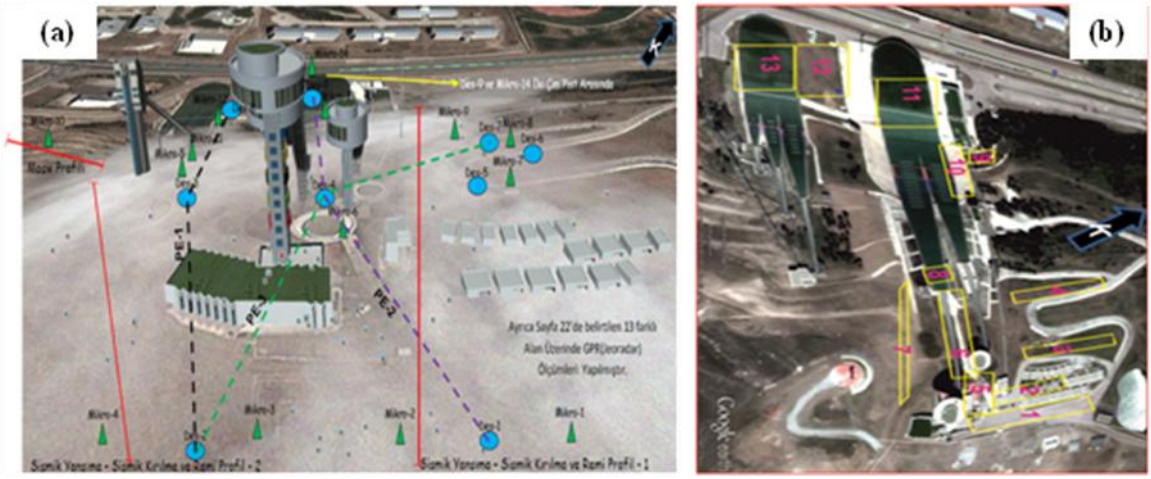
Şekil 1. (a) Çalışma alanının basitleştirilmiş düşey stratigrafik kesiti (Yarbaşı ve Kalkan, 2009'dan değiştirilerek) ve (b) Erzurum ili ve çevresinin sismotektonik haritası.

3. JEOFİZİK YÖNTEMLER VE UYGULAMALARI

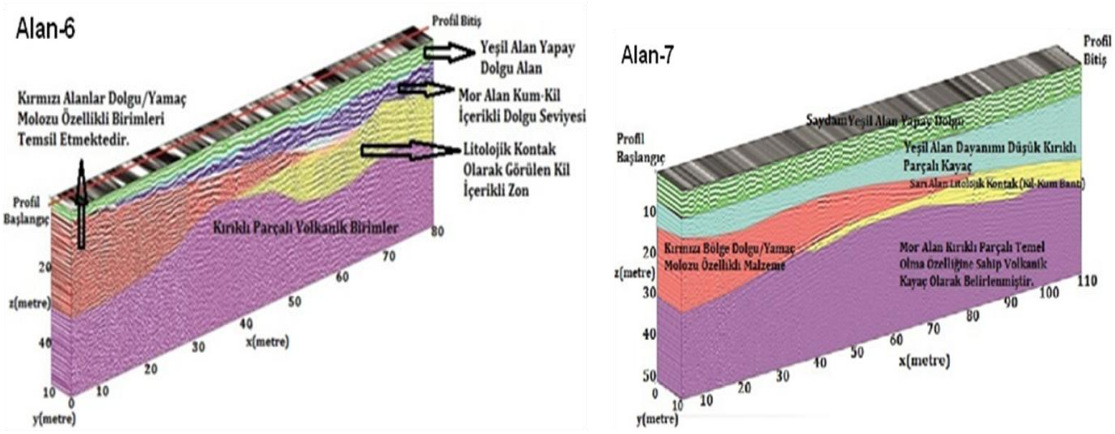
Çalışmada; yer radarı (GPR), sismik (kırılma, yansıma, MASW ve ReMi) ve düşey elektrik sondajı ve mikrotremör yöntemleri kullanılarak noktasal, alansal ve profiller boyunca veri toplanmıştır. Çalışma alanındaki üst yapıların konumları ve arazinin topoğrafik şartları göz önüne alınarak, ulaşımın olanaklı olduğu alanlarda gerekli ve yeterli sayıda ölçüm alınmıştır. Çalışma alanındaki ölçüm yerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Uygulanan her bir yöntemin kuramsal esasları ve uygulama sonuçları aşağıda ana hatlarıyla verilmiştir.

3.1. Yer Radarı Uygulaması

Yer radarı yönteminin esası elektromanyetik dalganın yer içindeki yayılımı kuramına dayanır. Yüzeyden bir verici ile yere gönderilen elektromanyetik sinyalin yer içindeki herhangi bir nesneden yansımaları, saçılmaları ve kırılmaları yüzeyde konumlanmış bir alıcıda nanosaniye mertebesinde (10^{-9}saniye) kaydedilir. Yöntem, son yıllarda sığ yer altı (≤50m) incelemelerinin yüksek ayrımlılıkta ve güvenilirlikte yapılabilmesi için çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Busby vd., 2004). Bu çalışmada; 13 farklı alanda toplam 12756 m yer radarı ölçümü yapılarak yaklaşık 15016 m^2'lik bir alan taranmıştır. Bu alt ölçüm alanları, çalışma alanının genelini açıklayacak şekilde ve özelde Şekil 2' de görülen tesis alanını yeterli düzeyde örnekleyecek şekilde seçilmiştir. Ölçüm alımında sığ, orta ve derin seviyeleri görüntüleyebilmek için 25 (korumasız), 100 ve 300 MHz (korumalı) merkez frekanslı antenler kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) Ölçüm profil ve noktalarının yerleri, (b) yer radarıyla ile taranan alanlar.



Şekil 3. Çalışma alanında 6 ve 7 no.lu ölçüm alanlarından elde edilen 3B'lu yer radarı kesitleri

Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, dolgu ve killi+siltli birimlerin temel olmaya uygun alttaki volkanik birimler üzerinde kalın bir örtü oluşturduğu anlaşılmıştır. Alan 6 ve 7'den elde edilen 3-B'lu yer radarı kesitlerinin yorumlanmış görüntüleri Şekil 5'de sunulmuştur. Alan 6 ve 7'de ortalama 25-30 m'ler arasına kadar, düşük dayanımlı dolgu+kil ve siltli birimlerin yer aldığı açıkça görüntülenmiştir. Özellikle her iki kesitte sarı renkle gösterilen ve mercek şekilli killi birim olarak değerlendirilen ara birim, yüzey suları, üst yapı yükleri ve aşırı eğim etkisinden dolayı duraylığını kaybedebilecek karakterdedir.

3.2. Sismik Yöntemlerin Uygulanması

Sismik yöntemlerin esası elastik dalgaların yer içinde kırılma ve yansıma ilkelerine bağlıdır. Yüzeyde suni bir kaynak vasıtasıyla oluşturulan deformasyondan (gerilme ve yamulma) dolayı oluşan boyuna (P-dalgaları) ve enine (S-dalgaları) dalgalar yer içinde elastik empedans (yoğunluk değişimi ihmal edilirse sadece hız değişimine bağlı akustik empedans) değişimi olan yüzeylerde yansır, kırılır ve tekrar yüzeye dönerek alıcılarda zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Kaydedilen bu varışlar amaca göre analiz edilerek yer içine ait boyuna (P) ve enine (S) dalgası hızları ve bu hızlara bağlı olarak bir çok elastik parametre hesaplanarak yer içinin jeoteknik değerlendirmesi yapılır.

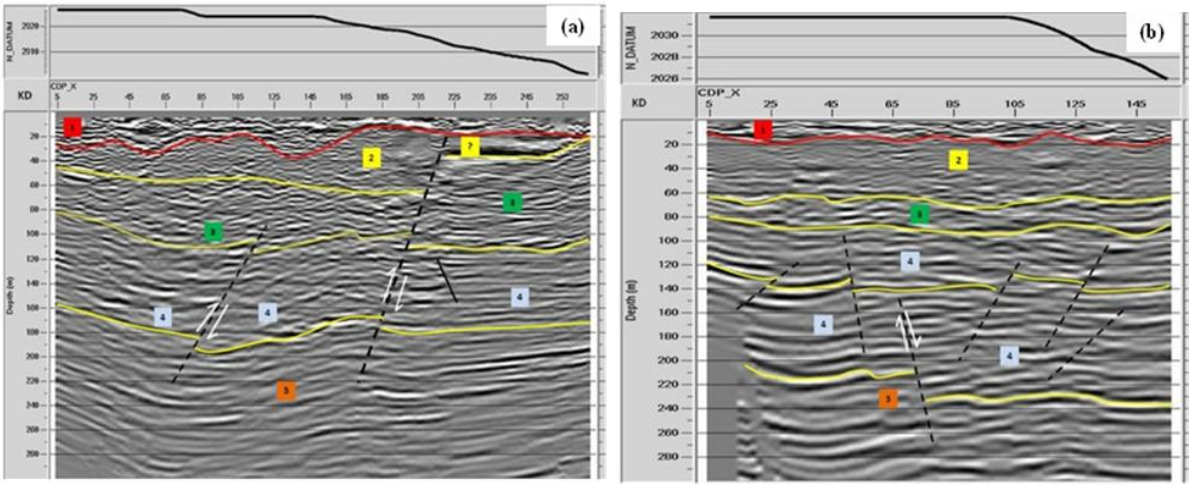
Çalışma alanında birbirine yaklaşık paralel konumda, 60 m uzaklıkta ve KD-GB yönlü iki profilde sismik yansıma verisi toplanmıştır. Veri toplama parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Sismik yansıma verilerinin yorumlanabilmesi için uygulanan veri işlem adımları; veri okuma, geometri tanımlama, ayıklama/silme, statik düzeltme, bant geçişli süzgeç (15-90 Hz), ortak orta nokta sıralama, hız analizi normal kayma zamanı düzeltmesi, yığma ve zaman/derinlik göçü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her iki profil için elde edilen yorumlanmış sismik kesitler çalışma sahasına ait yer altı yapısını derinlik boyutunda mümkün olan geniş bir aralıkta (~200 m derinliğe kadar) açıklamaktadır (Şekil 4). Yer radarı çalışmasıyla en fazla 50 m derinliğe kadar detaylı görüntülenen yer altı jeolojik yapı, sismik yansıma çalışmasıyla daha derinlere kadar görüntülenebilmiştir. Sismik kesitlerde yanal yönde yansıma devamlılıklarının kesilmelerinin nedeni açık olarak, faylanma etkisi olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, sahanın içinde bulunduğu genel tektonik göz önüne alındığında bu faylar ters fay olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, sahanın derinlere doğru oldukça kırıklı bir jeolojik yapıya sahip olduğu da sismik kesitlerden görülmektedir. Diğer yandan, her iki profil için ortalama 20-30 m derinlikte başlayan 2 no.lu birim, blok ve sıkı bir birim yansıma karakteri gösterdiğinden, sahada planlanan mühendislik yapıları için temel olma özelliğindedir. Ayrıca sismik yansıma sonuçları ile yer radarı sonuçları birbirini desteklemektedirler.

Sismik kırılma yöntemi sismik kayıtlardaki doğrudan ve kritik kırılarak alıcılara ulaşan ilk varışların analizini içerir. İlk varışlardan yer altı yapılarına ait hız ve kalınlık bilgileri elde edilerek, zemine ait sökülebilirlik, elasto-dinamik parametreler (elastik modül, makaslama modülü, bulk modülü, zemin yatak katsayısı, Poisson oranı, dalga hızlarının oranı (Vp/Vs), yoğunluk vd.) ve zeminin emniyetli taşıma gücü dinamik olarak hesaplanabilir. Böylece zemine ait zemin grubu ve yerel zemin sınıfı belirlenmiş olur. Bu kapsamda, sismik yansıma için toplanan verilerden doğrudan ve kritik kırılmalara ait ilk varışlar okunmuş ve P-dalgasına ait hızlar, V_p, hesaplanmıştır. Bununla birlikte, aynı verilerin yüzey dalgası bilgilerinden S-dalgalarına ait hız bilgileri, Vs, hesaplanmıştır. Bu hız bilgileri kullanılarak ilgili zemin dinamik parametreleri hesaplanmıştır (Çizelge 2). Elde edilen değerler incelendiğinde, özellikle ilk iki zemin seviyesinin (~20m derinliğe kadar) genel itibariyle zayıf dayanım karakterli bir zemine sahip olduğunu işaret etmektedir.

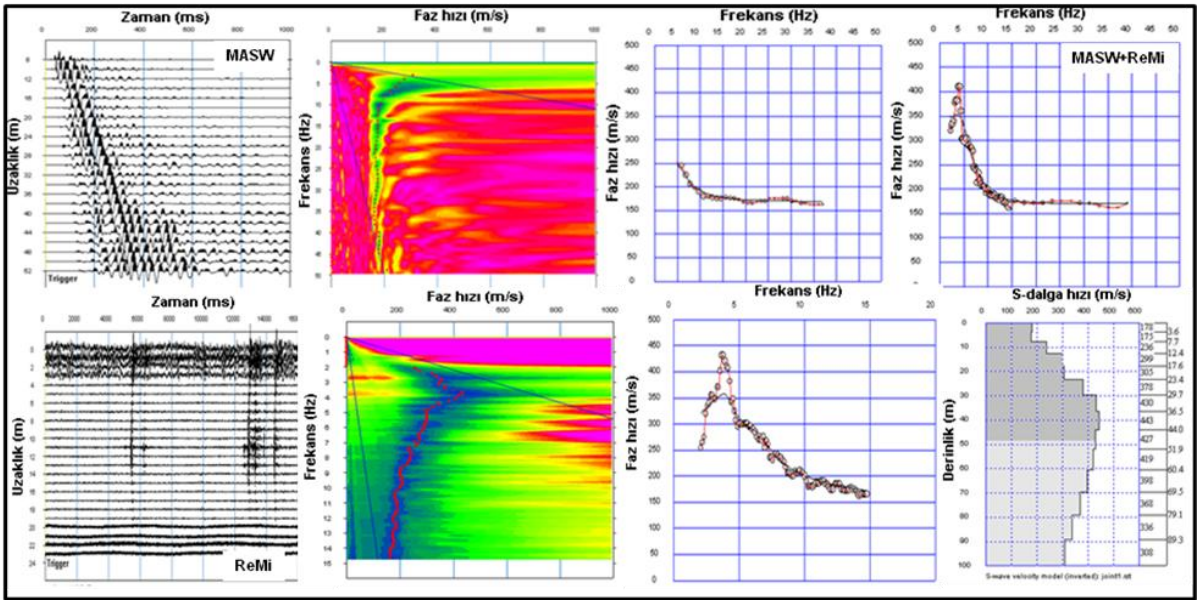
Son yıllarda zeminlerin S-dalgası hızının daha güvenilir ve daha büyük derinliklere kadar tayin edilebilmesi için aktif (MASW) ve pasif (ReMi) kaynaklı çok kanallı yüzey dalgası yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. MASW yöntemi ile ilk 30 m'de ve ReMi yöntemi ile ilk 100 m'ye kadar S-dalgası hızı derinliğin fonksiyonu olarak yüksek doğruluk ve güvenilirlikle hesaplanabilmektedir. Elde edilen sonuç, bir çeşit S-dalgası hız sondajı olarak değerlendirilebilir. Özellikle derinlikle hız azalması durumunda (kör tabaka durumu; jeolojik olarak sağlam birimlerin altında zayıf birimlerin yer alması durumu) klasik sismik kırılma yöntemine göre çok daha yararlı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Çizelge 1. Araziden veri toplama parametreleri

	Profil-1	Profil-2
Kayıt Sistemi	24 Kanallı (PASI)	24 Kanallı (PASI)
Kaynak	Balyoz (10kg) – R=30cm çaplı sert plastik plaka	Balyoz (10kg) – R=30cm çaplı sert plastik plaka
Alıcılar	40 Hz	40 Hz
Kanal Sayısı	24	24
Atış Aralığı	20 m	12 m
Alıcı Aralığı	4 m	4 m
Yakın alıcı (ofset)	10 m	10 m
Atış Sayısı /Serim	5	5
Serim sayısı	9	5
Toplam Atış Sayısı	45	25
Örnekleme Zamanı	1.0 ms (0.001s)	1.0 ms (0.001s)
Kayıt Uzunluğu	2048 ms	2048 ms



Şekil 4. (a) Profil-1 ve (b) Profil-2 için elde edilen yorumlanmış yansıma kesitleri.



Şekil 5. MASW ve ReMi verileri, dispersiyon analizleri ve S-dalga hızı yapısı.

Bu kapsamda sahaya ait genel bilgi edinebilmek için sahanın güney-batı kısmında yaklaşık doğu-batı doğrultusunda aynı profilde MASW ve ReMi ölçümleri alınmış ve değerlendirilmiştir. Buna göre, her

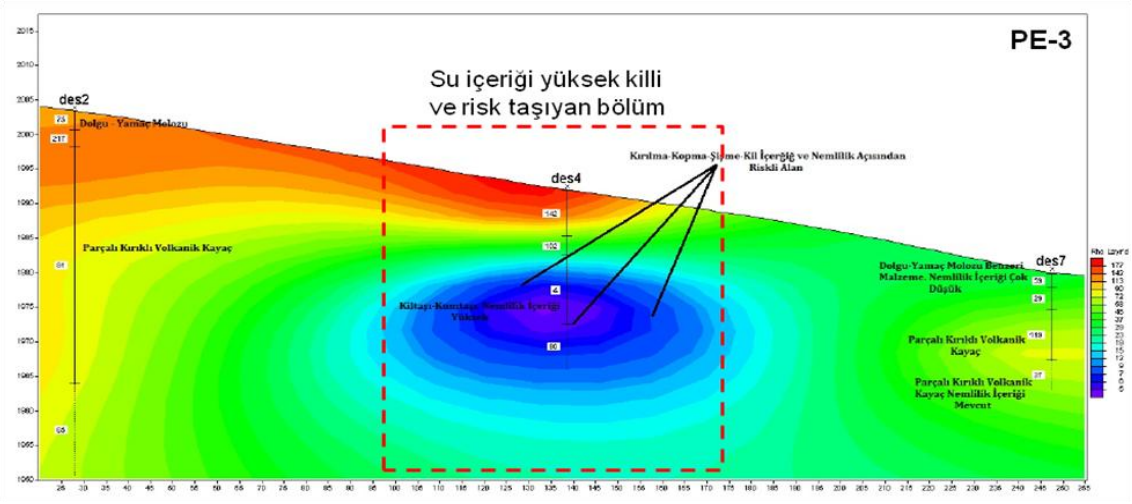
iki yöntemden elde edilen veriler ayrı ayrı ve bileşik ters çözüm tekniği ile değerlendirilmiştir (Şekil 5). Bu değerlendirmelere göre, genel olarak sahada özellikle 40 m derinliğe kadar artan ve bu derinliğin altında da azalan bir hız yapısı görüntülenmiştir. Bu durum sismik yansıma verisinin yorumuyla çok uyumlu görülmektedir. Bu belirleme, üsteki birimlerin altında ezilmiş ve kırıklı jeolojik birimlerin varlığına dikkat çekmektedir.

Çizelge 2. Sismik verilerinden elde edilen jeomekanik parametreler.

	Tbk No.	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (gr/cm^3)	Qe (kg/cm^2)	G (kg/cm^2)	E (kg/cm^2)	K (kg/cm^2)	σ	Ks (T/m^3)	To (s)
Hat-1	1	390	190	1.38	1.28	497	1337	1432	0.34	4260	0.41
	2	670	340	1.58	2.72	1823	4837	4649	0.33	16054	
	3	1030	570	1.76	5.54	5706	14599	11024	0.28	52836	
Hat-2	1	360	170	1.35	1.08	390	1059	1230	0.36	3270	0.44
	2	570	290	1.51	2.23	1274	3377	3223	0.33	11236	
	3	980	540	1.73	5.16	5058	12968	9914	0.28	46732	

3.3. Düşey Elektrik Sondajı Uygulaması

Elektrik özdirenç yöntemleri yere verilen akımın yer içinde yayılırken yer içi malzemelerinin elektrik akımına karşı direnç özelliklerine göre oluşan potansiyel farkın değişiminin ve dolayısıyla görünür özdirencin ölçülmesi esası üzerine geliştirilen yöntemlerdir. Özellikle yeraltısuyu, nemlilik, tuzluluk, boşluk ve ayrışma derecelerinin belirlenmesinde çok etkin ve yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu kapsamda 9 adet Düşey Elektrik Sondajı (DES) ölçümü, özellikle su içeriği durumunu açıklayacak şekilde yapılmıştır. DES ölçüm verileri birleştirilerek 2-B'lu DES yer elektrik kesitleri elde edilmiş ve Şekil 2'de PE-2 ile gösterilen profil boyunca elde edilen DES kesiti Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu kesit incelendiğinde, sahadaki düşük (kil, ayrışma ve su içeriği yüksek) ve yüksek özdirençli (daha kuru ve sağlam birimler) alanlar ve çalışma alanında yüzey birimlerini oluşturan dolgu ve ayrışmış malzemenin altında düşük özdirençli birimler görülmektedir. Bu durum, yer radarı kesitlerinde de açıkça görüntülenen kil ve nemli silt+kum içeriğinin fazla olmasıyla doğrudan ilişkilidir.

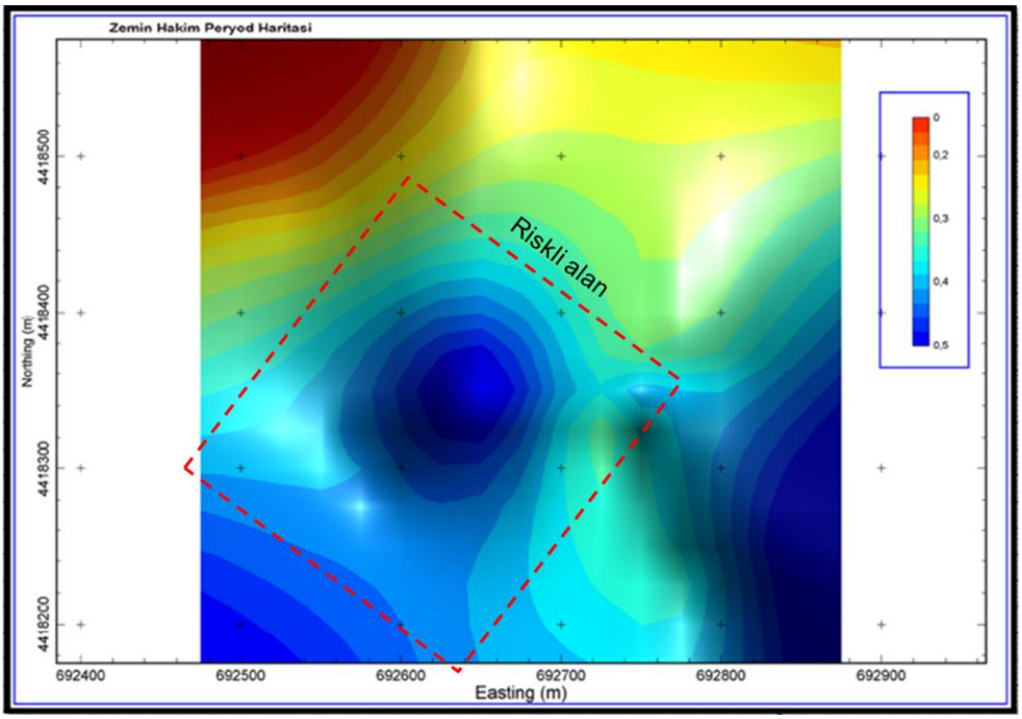


Şekil 6. PE-3 no.lu profile ait 2-B'lu DES kesiti (DES noktaları arasındaki uzaklık 30 m'dir.)

3.4 Mikrotremör Ölçümleri

Mikrotremör ölçüm yöntemi, doğal ya da yapay kökenli periyotları 0.05-2 saniye ve genlikleri 0.01-1.0 mikron arasında değişen titreşimciklerin belirli bir süre kaydedilip spektral içeriklerinin değerlendirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Kayıtlar üç bileşen olarak yapılır ve bu üç bileşenin spektral içerikleri birlikte değerlendirilerek zemine ait hakim titreşim (veya salınım) periyotu ve zeminin kuvvetleri büyütme değerleri belirlenir.

Sahanın zemin zayıflığına göre bu değerler birkaç kat artabilir. Bu kapsamda çalışma alanını kapsayacak şekilde 14 noktada, 2 Hz üç bileşen kayıtçı kullanılarak 50 ms örnekleme zaman aralıklı 15'er dakikalık mikrotremör kayıtları alınmış ve Nakamura (1989) tarafından önerilen yatay/düşey oranı tekniğiyle değerlendirilerek çalışma alanına ait hakim salınım periyot (T_0, T_A ve T_B) dağılımları haritalanmış (Şekil 7) ve yaklaşık büyütme değerleri belirlenmiştir. Zemin hakim salınım periyotu 0.18-0.55 saniye arasında değişmekte olup, zayıf karakterli zemini işaret etmektedir. Buna karşın büyütme değer aralığı 1.5-3.0 arasında değişmektedir.



Şekil 7. Çalışma alanına ait T_0 dağılım haritası.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Erzurum-Kiremitliktepe Kayakla Atlama Tesislerinin bulunduğu alanın yer yapısının değerlendirilmesi amacıyla 6 farklı jeofizik yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen verilerden hazırlanan kesitler ve haritalar sahanın jeolojik verileriyle birlikte yorumlanarak, üst yapı mühendislik projeleri için hedef derinlik olan 30 m'ye kadar, zeminin pekişmemiş ve düşük dayanımlı olduğu, nemlenmiş kil merceklerini içerdiği, moloz ve yoğun kil, silt ve kum içerikli volkanik kayaçlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Yer radarı ile yüzeyden itibaren ilk 50m'lik derinlik içinde yer alan jeolojik birimlerin konumları ayrıntılı olarak belirlenebilmiş, ancak daha derin jeoloji sismik yansıma yöntemi ile görüntülenebilmiştir. Elektrik özdirenç ölçümleri ile su içeriği yüksek birimlerin konumlandığı alanlar açıkça sınırlandırılmıştır. Bir profilde alınan yüzey dalgası ölçümleri ile zemine ait kayma dalgası hız-derinlik profili elde edilmiş ve ilişkili olarak jeoteknik parametreler hesaplanmıştır. Mikrotremör ölçümleri ile zeminin hakim salınım periyotları hesaplanmış ve bu değerlerin dağılımı haritalanmıştır. Yer radarı, elektrik özdirenç ve mikrotremör ölçüm sonuçlarının çalışma alanında tehlikeli olabilecek alanı açıkça belirlemedeki uyumu dikkat çekicidir. Özellikle atlama kuleleri ve kayak pistlerinin olduğu eğimli yamaçta, derinlikleri yer yer değişmekle birlikte, yüzeyden itibaren 2-20 m aralıklarda nemli kil merceklerinin, aşırı kırıntılı ayrışmış kayaçların ve daha derinlere doğru daha az kırıklı volkanik kayaçların olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm jeofizik yöntemlerden elde edilen sonuçlarına göre, yüzeyden itibaren 20-30 m arasındaki derinliklerde yer yer değişkenlik gösteren derinliklere kadar iyi pekişmemiş ve düşük dayanımlı dolgu malzemesi, moloz ve yoğun kil,

silt ve kum içerikli malzemeler yer aldığı yer radarı ve elektrik ölçümleri açıkça belirlenmiştir. Tüm bu nicel ve nitel değerlendirmelere göre, sahada yapılacak üst yapı çalışmalarının projelendirmesinde, hesaplanan elastodinamik parametrelerin dikkate alınması ve zemin duraylılığının (şev ve taşıma kapasitesi açısından) sağlanması için hedef derinliğin en az 25 m olarak düşünülmesi, oluşabilecek heyelan ve oturma gibi tehlikelerinin önlenmesi açısından son derece önemlidir.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışmada kullanılan veriler yüklenici firma Koltek İnş. Ltd. Şirketi adına Zimer Müh. Müş. Hiz. İnş. Ltd. Şti. tarafından toplanmış olup, aynı zamanda Mustafa Kirici'nin yüksek lisans tez çalışmasının bir bölümünü oluşturmaktadır. Yazarlar, verilerin kullanımına ve yayınlanmasına izin verdikleri için şirket yetkililerine, ölçülerin alınması sırasında yardımcı olan tüm kişilere ve Şekil 1'deki sismotektonik haritayı hazırlayan Doç. Dr. Serkan Öztürk'e teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Abidin, M.H.Z., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D.C., Baharuddin, M.F.T., 2011. Application of geophysical methods in civil engineering. Malaysian Technical Universities International Conference on Engineering and Technology (MUiCET 2011), Malaysia.

Barka, A., Bayraktutan, M.S., 1985. Erzurum baseni çevresini etkileyen aktif faylar. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özetleri Kitapçığı, s.11.

Busby, J.P, Cuss, R.J, Raines, M.G., Beamish, D., 2004. Application of ground penetrating radar to geological investigations. Internal Report IR/04/21, British Geological Survey.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. 3rd edition, Blackwell, Oxford.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. Quarternary Report Railway, Tech. Res. Institute, 30, 25-33.

Sharma, P.V., 1997, Environmental and Engineering Geophysics, Cambridge Univ. Press, New York.

Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley and Sons, Chichester.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherif, R.E., Keys, D.A., 1990. Applied Geophysics. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Timur, E., İmik, M., Kocaman, H., 1994. Erzurum-Çat arasının jeolojisi. MTA Rapor No. 9730, Ankara.

Yarbaşı, N., Bayraktutan, M.S., 2001. Dadaşköy-Şükrüpaşa (Erzurum) yerleşim alanı zemininin jeoteknik özellikleri. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2, 60-69.

Yarbaşı, N., Kalkan, E., 2009. Geotechnical mapping for alluvial fan deposits controlled by active faults: a case study in Erzurum, NE Turkey. Environmental Geology, 58, 701-714.

Yılmaz, A., Uysal, Ş., 1988. 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları. Erzurum – F32 Paftası, MTA Yayınları, Ankara.

URL 1, 2015. http://www.deprem.gov.tr/sarbis/depbolge/erzurum.gif.

Mühendislik Uygulamalarında Hidrojeoloji

Ankara-Çankırı-Çorum Bölgesinde Yeraltı Barajları Konusunda Güncel Gelişmeler

Recent Developments on Groundwater Dams in the Ankara-Çankırı-Çorum Region

A. Apaydın[1,*], S. Demirci Aktaş[1], S. Kaya[1]

[1] *DSİ 5. Bölge Müdürlüğü Eskişehir yolu 8. Km 06520 Ankara Tel: 0312 219 77 00 /4216*
(**aapaydin@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Yarıkurak iklime sahip Ankara-Çankırı-Çorum bölgesinde yağış alanı 20-25 km^2'den 200-300 km^2'ye kadar değişen havzalarda alüvyon dolgulu vadilerin daraldığı kesitler yeraltı barajı için çoğunlukla uygundur. Yeterli yayılım alanı ve beslenme şartları gibi olumlu hidrojeolojik özelliklere sahip olmak koşuluyla, 20-100 m genişlikte, 10-30 m kalınlıkta bir alüvyon yeraltı barajı için yeterlidir. Alüvyon kaldırılmadan bulamaç duvarı (İng. slurry trench/slurry wall) yöntemi sayesinde daha geniş ve kalın alüvyonlar da yeraltı barajı için uygun olabilmektedir. Ankara, Kırıkkale ve Çorum'da 2003-2013 yılları arasında DSİ tarafından 2 adet, Köy Hizmetleri ve Özel İdare tarafından 3 adet, ASKİ tarafından 1 adet yeraltı barajı inşa edilmiştir. DSİ tarafından Ankara, Çankırı ve Çorum'da yeni yeraltı barajları yapımına yönelik ön inceleme, planlama ve proje çalışmaları devam etmektedir. Bu projeler sulama ve içme suyu amaçlıdır. Yer seçiminden inşasına kadar hidrojeolojik-jeoteknik koşulların belirleyici olduğu yeraltı barajı projelerinin, yağışların 300-500 mm arasında olduğu çalışma bölgesinde kuraklıkla mücadelede önemli bir seçenek olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı Barajı, Alüvyon, Kuraklık, Ankara-Çankırı-Çorum Bölgesi

ABSTRACT: *Narrow sections of alluvial aquifers ranging in size from 20-25 km^2 to 200-300 km^2 in the semi-arid Ankara-Çankırı-Çorum region are generally considered to be suitable for groundwater dam constructions. A 20-100 m wide valley filled with 10-30 m thick alluvium would provide sufficient groundwater storage if the hydrogeology setting such as the extent of the alluvium and recharge conditions are favorable. Larger and thicker alluvium deposits would be preferable by using the slurry wall method without removing alluvium. Between 2003 and 2013, a total of six groundwater dams have been built in Ankara, Çorum and Kırıkkale provinces by different authorities. Two of the dams have been constructed by State Hydraulic Works (DSİ), while the other three by the Rural Affairs and Provincial Special Administration, and one by Ankara Water and Sewage Management (ASKİ). Exploratory studies by DSİ are still ongoing to identify the potential sites suitable for construction of new groundwater dams in the Ankara-Çankırı-Çorum region to secure more water for irrigation and drinking purposes. It is suggested that the groundwater dam projects which are almost entirely dependent on hydrogeological-geotechnical conditions provide a significant alternative in combatting drought in the study area where the average annual precipitation ranges between 300 and 500 mm.*

Keywords: *Groundwater Dam, Alluvium, Drought, Ankara-Çankırı-Çorum Region*

1. GİRİŞ

Yeraltı barajları kendine özgü bilimsel-teknik bilgi ve deneyim gerektiren ve Türkiye'de henüz az bilinen su depolama yöntemdir. Yeraltı barajı aynı zamanda bir yeraltısuyu yapay besleme yöntemi olarak da kabul edilir. Yeraltı barajlarının suya ihtiyaç duyulan her yerde şartların uygun olması halinde inşa edilmesi mümkündür, ancak dünyada yeraltı barajları çoğunlukla kurak-yarı kurak iklime sahip bölgelerde inşa edilmektedir (Nilsson 1988, Apaydın vd. 2009, Apaydın 2014). Yeraltı barajlarının yapımı için temel ilke jeolojik-hidrojeolojik şartların uygun olmasıdır. Çünkü barajın gövdesi ve su alma yapısı gibi tesisler yeraltında olup, suyun depolandığı rezervuar gözenekli jeolojik formasyondur. Bunun yanı sıra su ihtiyacı ile teknik ve sosyal koşullar da belirleyicidir. Türkiye yüzölçümünün yarısında yıllık ortalama yağışın 500 mm'nin altında olduğu ve suya olan ihtiyacın gittikçe arttığı bilinmektedir. Son yıllarda yaşanan kuraklıklardan en fazla etkilenen Orta Anadolu

bölgesi için yeraltı barajları birçok yönden kuraklığa karşı yerüstü depolamalarına alternatif bir çözüm olabilir. Özellikle yeraltısuyu seviyesinin kuyulardan çekimler nedeniyle düştüğü veya doğal koşullar nedeniyle düşümün birkaç yıl boyunca sürdüğü durumlarda yeraltı barajı gibi yapay besleme teknikleri ile potansiyeli arttırma ve daha güvenli su elde etme imkanları araştırılarak yeni projeler geliştirilebilmektedir (Apaydin, 2009, 2014; Apaydın vd. 2009).

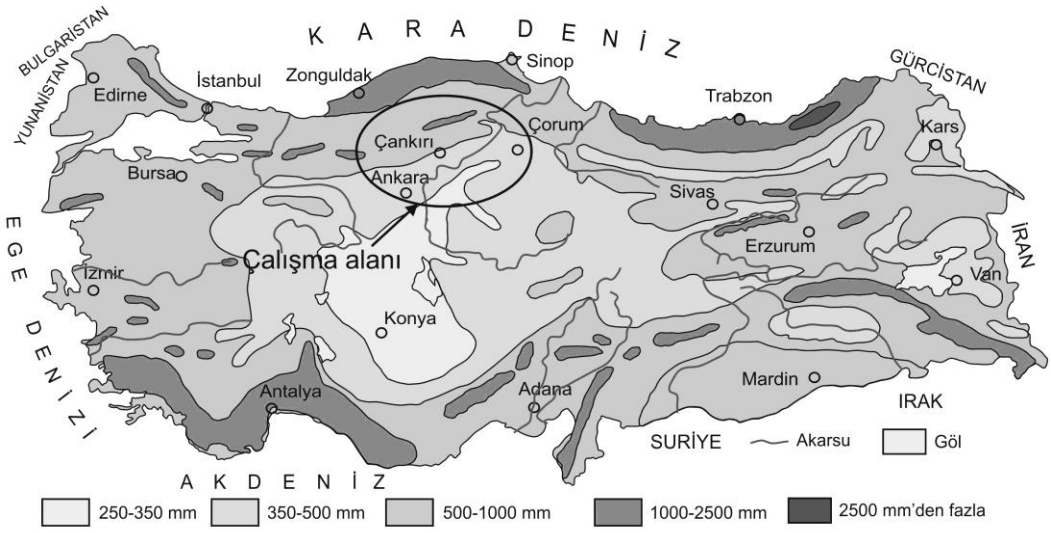
Orta Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'nin birçok bölgesinde ana akarsuların yan kolları boyunca görece dar vadilerde sığ alüvyonlar çökelmiştir. Bu alt havzalarda vadiler boyunca uzanan alüvyon çökellerin daraldığı kesitler yeraltı barajı inşası için uygun ortamlar olabilmektedir. Orta Anadolu'nun özellikle Çankırı ve Çorum bölgesinde genellikle yeraltı ve yerüstü su kalitesi yukarı havza kesimlerine doğru gidildikçe iyileşmektedir. Ancak havzaların aşağı kesimlerinde evaporitik formasyonların yaygınlaşması ve ova düzlüklerinde drenaj sorunları nedeniyle tuzlanma şeklinde kalite bozulmaları gözlenmektedir. Bu nedenle bu tür alt havzalarda, yukarı havza kesimlerindeki tatlı suların aşağı kesimlere ulaşmadan başka bir ifadeyle kalitesi bozulmadan yeraltı barajlarında depolanması suların kullanılabilirliğinin sağlanması için uygun çözümlerden biri olabilir.

2. BÖLGENİN GENEL ÖZELLİKLERİ

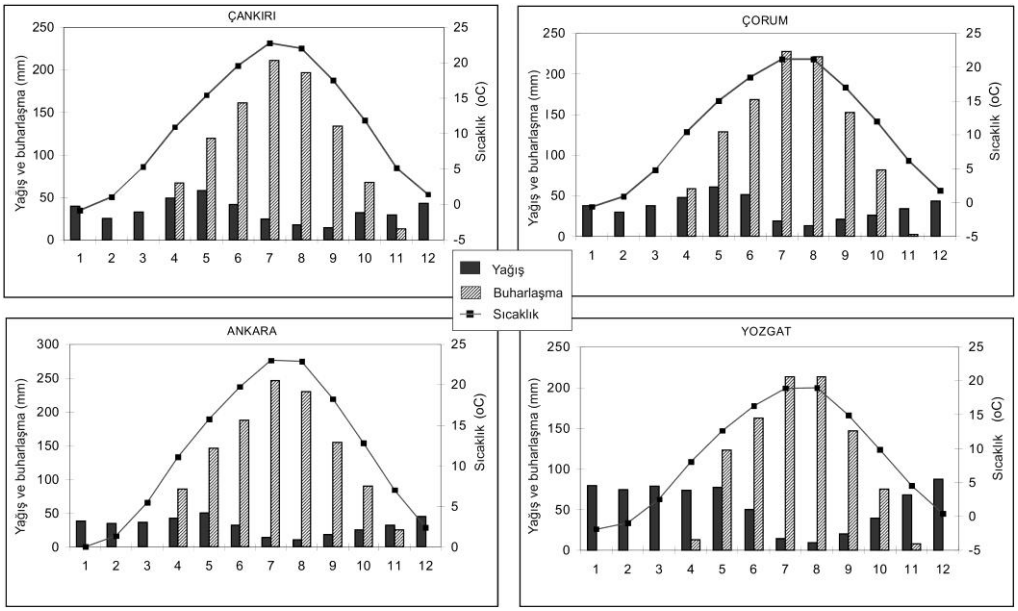
2.1. Hidro-meteorolojik ve İklimsel Koşullar

Türkiye'de Karadeniz Bölgesinin kıyı şeridi ile Akdeniz Bölgesinin batısı ve Torosların yüksek kesimleri dışında ülkenin büyük bir bölümünde yıllık yağış miktarı literatürde yarı-kurak iklimin üst sınırı olarak kabul edilen 700 mm'nin altındadır (Şekil 1). Yarı-kurak bölgelerde yağışlar genellikle Aralık-Mayıs döneminde gerçekleşmekte, tarımsal faaliyetin olduğu yaz ayları kurak geçmektedir. Bu bölgelerde yıllık ortalama sıcaklık 8-13 ^{o}C olup yaz mevsiminde 20 ^{o}C'nin üzerine çıkmaktadır. Potansiyel buharlaşma miktarı 1000-2000 mm arasındadır (Şekil 2).

Dünyanın birçok bölgesinde olduğu gibi, yeraltı ve yerüstü baraj inşaatları Türkiye'nin özellikle yaz aylarında su ihtiyacının arttığı yarı kurak bölgeleri için önemlidir. Yılın her mevsimi içme-kullanma ve sanayi suyuna olan ihtiyaca ilave olarak birçok yerde Nisan-Ekim ayları arasında tarımsal sulama suyu ihtiyacı olmaktadır. Seracılığın yaygınlaşmaya başladığı bazı bölgelerde bu ihtiyaç yılın daha uzun bir döneminde ortaya çıkmaktadır. Türkiye'nin yarıkurak bölgelerinde yerel ve nispeten küçük ihtiyaçların karşılanmasında yerüstü barajları ile birlikte yeraltı barajı seçeneğinin de dikkate alınması gerekir. Yaz aylarında suya en fazla ihtiyaç duyulan ve kuraklığın çoğunlukla en şiddetli yaşandığı bölgelerden biri olan Orta Anadolu bölgesi yeraltı barajı yapımı için morfolojik ve hidrojeolojik, yönden uygun özellikler sunar.. Özellikle Ankara'nın kuzey ve batı bölgesi ile Çankırı ve Çorum illerinde Sakarya, Kızılırmak, Delice, Yeşilırmak, Acıçay gibi ana akarsulara yüksek kotlardan inen daha küçük akarsu alüvyonlarında yeraltı barajı için uygun yerler bulunabilmektedir.



Şekil 1. Türkiye'de yağışın dağılımı ve çalışma alanının konumu (Yağış haritası, D&R 2004'den revize)



Şekil 2. Çalışma alanındaki bazı meteoroloji istasyonlarında kaydedilen yağış, sıcaklık ve buharlaşmanın yıl içindeki değişimleri

2.2. Morfolojik, Jeolojik ve Hidrojeolojik Koşullar

Türkiye'nin yarıkurak Orta Anadolu bölgesi, görece düşük kota sahip ovalar ve Kızılırmak, Yeşilırmak, Sakarya, Delice gibi büyük akarsular boyunca uzanan geniş vadilerle karakteristiktir. Geniş vadiler boyunca uzanan alüvyonlar kazı maliyetinin yüksek oluşu ve yeraltısuyu seviyesinin yükselmesiyle tuzlanma ve bataklık oluşması gibi nedenlerle yeraltı barajı yapımı için pek uygun değildir. Ancak ana akarsuların yan kolları boyunca daha dar vadilerde ve sığ alüvyonlar çökelmiştir. İncelenen bölge genel olarak göz önüne alındığında, yağış alanı 20-25 km^2'den 200-300 km^2'ye kadar değişen alt havzalarda vadiler boyunca uzanan ve alüvyon dolgulu vadilerin daraldığı kesitler yeraltı barajı için uygun olabilmektedir. Yeraltı barajı yapımı için uygun denebilecek alüvyonun boyutları, gövdenin inşa edileceği kesitin genişliği veya yeraltısuyu potansiyeli gibi önemli parametrelere ilişkin

alt veya üst sınır belirlemek doğru olmamakla birlikte bugünkü şartlarda 20-100 m genişliğinde ve 10-30 m kalınlığındaki bir vadi alüvyonu yeterli yayılım alanına ve beslenme şartlarına sahip olması halinde bu yapılar için uygun olabilmektedir. Daha geniş ve kalın alüvyon dolgulu vadilerde yeraltı barajları, alüvyon kazılmadan ekonomik ve teknik yönden uygun olan bulamaç duvarı (slurry Wall) tekniği ile inşa edilebilmektedirler. Doğal olarak akiferin kesit genişliği ve kalınlığı arttıkça maliyet artmakla birlikte elde edilecek su miktarı da artmaktadır.

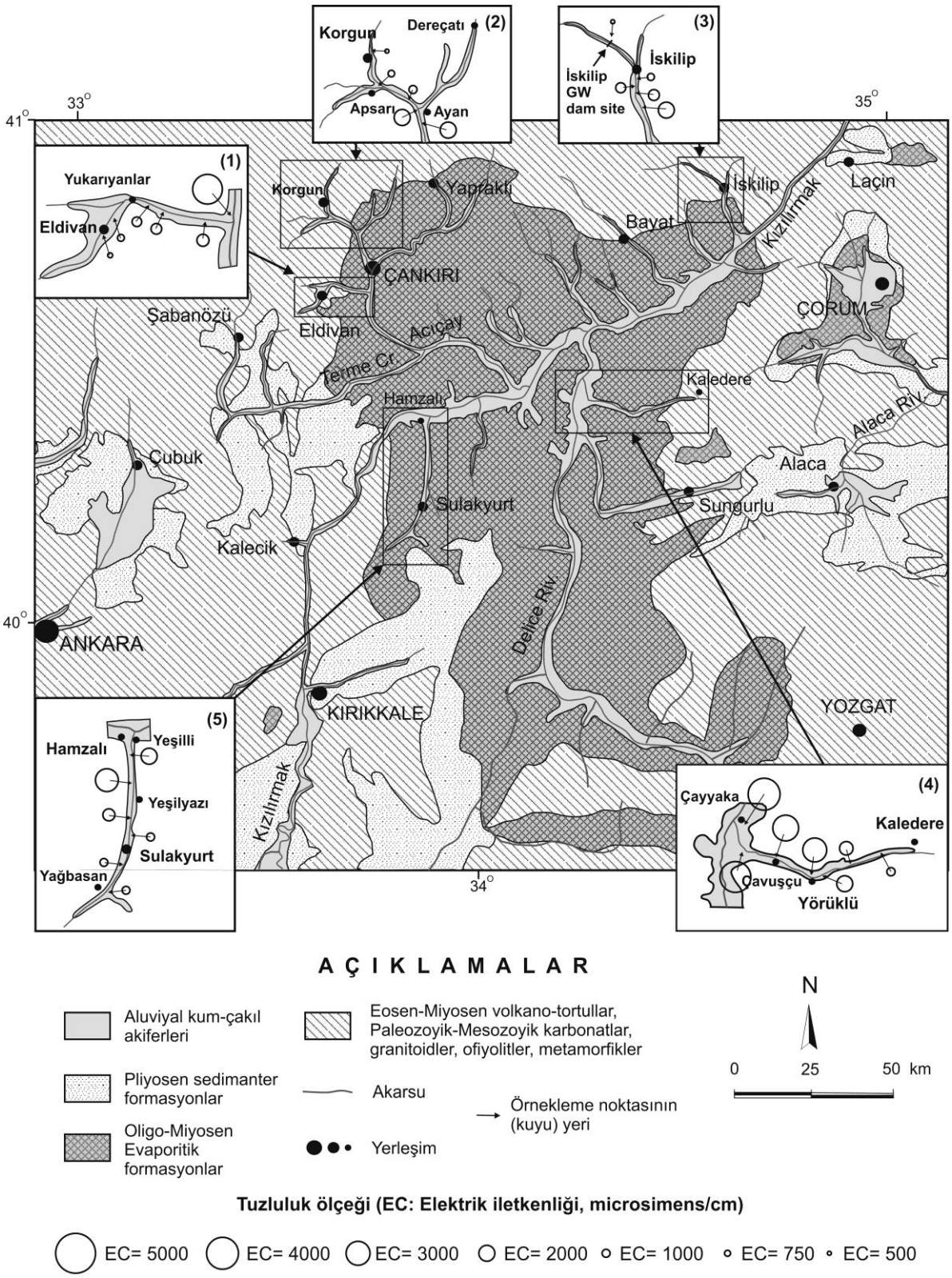
İncelenen bölgede alt havzaların önemli bir bölümünde yukarı kesimler metamorfik, kristalin veya volkanik kökenli formasyonlar ile kaplıdır. Bu formasyonlarda açılan kuyulardan veya boşalan kaynaklardan elde edilen sular genellikle yumuşak olup, içme ve sulama amacı için uygun kalitededir. Havzaların aşağı kesimlerinde yaygın olan Oligo-Miyosen-Pliyosen yaşlı jipsli ve tuzlu formasyonlar ise tuzlu su içerdikleri gibi, havza içinde bulunan alüvyon akiferlerdeki yeraltısularının kalitesinin bozulmasına da neden olmaktadırlar. Bu tür havzalarda alüvyon akiferlerde membadan mansaba doğru yeraltısuyu kalitesinin bozulduğu gözlenmektedir (Şekil 3). Yapılan çalışmalarda (Çelik ve Yıldırım 2006; Apaydın ve Demirci Aktaş, 2012) aşağı kesimlerdeki yeraltı sularındaki elektriksel iletkenliğin yüksek olduğu (çoğunlukla 2000 µS/cm'den fazla) ve Na, Cl ve SO_4 iyonlarının baskın hale geldiği görülmüştür. Örneğin; Tatlıçay havzası (Çankırı) ve Derinçay havzasının (Çorum) yukarı kesimlerde yeraltı sularının sertliği 18-35 ^{o}F iken aşağı bölgelerde 100 ^{o}F'ni aşmaktadır (Apaydın 1996; Apaydın and Demirci Aktaş, 2012). Ayrıca, tarımsal faaliyetler ile sanayi faaliyetleri nedeniyle insan kaynaklı kirlilik bu alt havzalarda membadan mansaba doğru artış göstermektedir. Aşağı kesimlerdeki bazı yerleşim birimleri çoğu kez çevrelerinde tatlı su bulamayıp, yukarı havzalardaki tatlı sulara ihtiyaç duymaktadırlar. Ancak, akiferlerin ve beslenme alanlarının havza yukarılarına doğru küçülmesi nedeniyle yeraltısuyu potansiyeli de azalmaktadır.

2.3. Yerleşim Birimleri ve Tarıma Elverişli Arazilerin Dağılımı

Orta Anadolu bölgesinde alt havzalarda vadiler boyunca uzanan alüviyal alanlar ve onlara komşu düzlükler en verimli tarım arazileridir. Bu havzalarda genellikle mansaba doğru gidildikçe tarım arazileri genişlemekte ve buna bağlı olarak tarımsal su ihtiyacı artmaktadır. Öte yandan çevresine göre daha büyük yerleşim birimleri (köy ve beldeler ana akarsulara doğru uzanan yan vadilerin mansap bölümlerindedir. Bu nedenle yerleşim birimlerinin veya geniş tarım alanlarının memba tarafına inşa edilecek yeraltı barajlarından bu kesimlere cazibe ile su sağlanması mümkün olabilecektir.

2.4. Yeraltısuyu Seviyesinin Düzensizliği

Türkiye'nin birçok bölgesinde aşırı çekim olmayan bölgelerde bile yağışların mevsimsel ve yıllık ölçekte fazla değişim göstermesine bağlı olarak yeraltı suyu seviyeleri düzensizdir. Özellikle mevsimlik yağışların etkisinde olan sığ akiferlerde bu durum daha belirgindir. Bu tür akiferlerde yağışlar kısa süre içinde akifere süzülür ve yeraltısuyu seviyesinde yükselme gerçekleşir. Ancak kısa süreli kuraklıklar bile yeraltısuyu seviyesinde hızlı ve belirgin düşüşlere neden olur (Apaydin 2010). Yeraltısuyu seviyesindeki bu değişimler kuyu verimlerine etki ettiğinden sürdürülebilir ve güvenli bir yeraltısuyu işletmesi için bir risk oluşturmaktadır.



Şekil 3. Orta Anadolu bölgesinde bazı alt havzalarda alüvyonlarda mansaba doğru gidildikçe yeraltısuyu tuzluluğunun artışı (Apaydın 2014)

3. İNCELEME ALANINDA GÜNCEL YERALTI BARAJI ÇALIŞMALARI

3.1. Mevcut Tesisler

Çalışma alanında 2000'li yıllarda inşa edilen yeraltı barajlarından (Şekil 4, Çizelge 1) ilki DSİ 5. Bölge Müdürlüğü ile Köy Hizmetleri Kırıkkale İl Müdürlüğü tarafından Yahşihan ilçesine cazibe ile içme suyu sağlamak amacıyla 2003 yılında inşa edilen yeraltı barajıdır. Granitler üzerindeki alüvyonda inşa edilen yeraltı barajında gövde, beton üzerinde kil çekirdekli toprak dolgu şeklinde oluşturulmuştur. 2004-2012 yılları arasında inşa edilen diğer yeraltı barajları Malıboğazı (Ankara, 2004), Aşağı Olunlu (Kırıkkale, 2006), Bahşılı (Kırıkkale, 2010), İskilip (Çorum, 2011), Elmadağ-Kargalı (Ankara, 2012) yeraltı barajlarıdır. Bunlardan sulama amaçlı olan Malıboğazı yeraltı barajı ile içmesuyu amaçlı olan İskilip yeraltı barajı DSİ tarafından, içmesuyu amaçlı olan Aşağı Olunlu ve Bahşılı yeraltı barajı Kırıkkale İl Özel İdaresi tarafından inşa edilmiştir. ASKİ tarafından inşa edilen Kargalı yeraltı barajı ise Türkiye'de hem yeraltı, hem de yerüstü depolaması olan ilk tesistir.

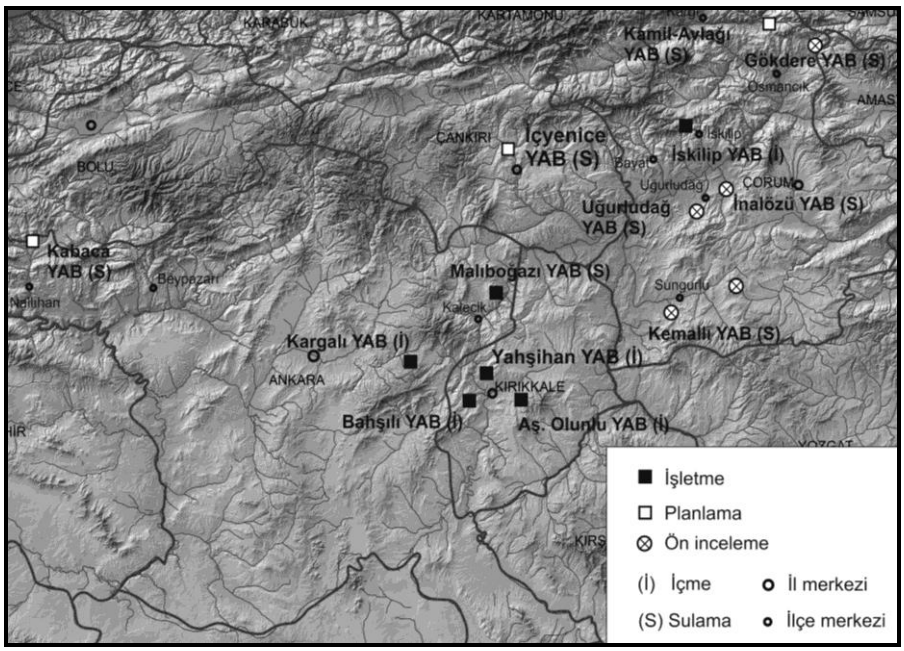
Malıboğazı yeraltı barajı Gökçeören, Alibeyli ve Tilkiköy'e ait arazilere cazibe ile takviye su sağlamaktadır. İskilip yeraltı barajı Çorum'a bağlı İskilip ilçesine ortalama 1 milyon m^3/yıl cazibeli içme suyu sağlamaktadır. Aşağı Olunlu yeraltı barajı 5 köye, Bahşılı yeraltı barajı Kırıkkale'ye bağlı Bahşılı ilçesine içmesuyu sağlamaktadır. Elmadağ-Kargalı barajı ise Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi (ASKİ) tarafından Elmadağ ilçesine içmesuyu sağlamaktadır.

Çizelge 1. Çalışma alanında 2000'li yıllarda inşa edilen yeraltı barajlarına ait bilgiler (Apaydın vd. 2005; Apaydin, 2009; Apaydın 2014)

Özellik	Yahşihan	Malıboğazı	Aşağı Olunlu	Bahşılı	Iskilip
İnşa yılı	2003	2004	2006	2009	2010
Amacı	İçme	Sulama	İçme	İçme	İçme
Gövde tipi	Beton+homojen	Homojen	Beton	Homojen	Homojen
Kret uzunluğu	20 m	50 m	69 m	50 m	50 m
Maksimum Kazı derinliği	34 m	26 m	15 m	15 m	14 m
Gövde yüksekliği	2+12 m	20.60 m	13 m	15 m	13 m
Yağış alanı	13 km^2	80 km^2	10 km^2	8.5 km^2	48 km^2
Su alma yeri (tabandan yükseklik)	12 m	12 m	2 m	10	1 m
Ana kaya	Granit	Kil	Çamurtaşı	Granit	Ofiyolit
Akifer	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl
Maks. Akifer kalınlığı	32 m	34 m	15 m	20 m	15 m
Rezervuar uzunluğu	-	500 m	-	500 m	-
Rezervuar genişliği	20-50 m	60-70 m	20-60 m	30-60 m	15-60 m
Depolama katsayısı	0.15 (tahmini)	0.20	-	-	0.20
Su alma şekli	Cazibe	Cazibe	Cazibe	Cazibe	Cazibe
Verim, L/s (min-maks)	10-50	20-60	-	10 (ort.)	20-50

3.2. Yeni Araştırılan Yerler

Ankara-Çankırı-Çorum bölgesinde planlama çalışmaları devam eden 3, planlama çalışmalarına başlanamayan 1, ön inceleme aşamasında ise 3 adet yeraltı barajı projesi bulunmaktadır (Şekil 4, Çizelge 2). Bu projelerden İçyenice (Çankırı), Kamil (Osmancık-Çorum) ve Kabaca (Nallıhan-Ankara) yeraltı barajlarında planlama çalışmaları devam etmektedir. Gökdere (Osmancık-Çorum) ve İnalözü (Çorum) yeraltı barajlarında ön inceleme çalışmaları tamamlanmıştır. Diğerlerinde ise ön inceleme çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 4. Çalışma alanında mevcut ve araştırmaları devam eden yeraltı barajlarının dağılımı

Çizelge 2. Çalışma alanında araştırmaları devam eden yeraltı barajlarına ait bilgiler

Özellik	İç Yenice	Kamil	Kabaca	Gökdere	İnalözü
Amacı	Sulama	Sulama	Sulama	İçme	Sulama
Gövde tipi (muhtemel)	Dolgu-Plastik beton	Plastik beton	Dolgu	Dolgu	Plastik beton
Kret uzunluğu	180 m	300 m	110 m	30 m	120 m
Maks. kazı derinliği	38 m	50-60 m (?)	38 m (?)	26 m (?)	35 m (m)
Gövde yüksekliği	35-40 m	50-60 m	20-40 m	25 m	35 m
Yağış alanı	410 km^2	58 km^2	46 km^2	40 km^2	-
Ana kaya	Ofiyolit	Şist	Kumtaşı	Şist	Kumtaşı-kiltaşı
Akifer	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl	Kum-çakıl
Maks. Akifer kalınlığı	36	50 (?)	36 (?)	23 (?)	32 (?)
Akifer alanı	18 km^2	7.5 km^2	2 km^2	1.5 km^2	-
Verim, L/s (min-maks)	30-60	-	-	-	-

3.3. Yeni Projelerin Hidrojeolojik-Jeoteknik Değerlendirmesi

Projelerin tamamı vadi alüvyonlarında olup, bütün projelerde suyun cazibe yoluyla elde edilmesi planlanmaktadır. Kamil ve İçyenice'de çalışılan alüvyon kalın (sırasıyla 52 m ve 36 m) ve geniş (sırasıyla 300 m ve 180 m) olması nedeniyle kazı maliyeti yönünden en uygun seçenek bulamaç duvarı yöntemidir. Planlama çalışmaları son aşamaya gelen İçyenice yeraltı baraj yerinde alüvyonun genişliği 180 m kalınlığı en fazla 36 m'dir. Su alma yapısı gövde üzerinde (talveg kotunda), 10 m altta ve 20 m altta olmak üzere üç seçenek matematik modelle (MODFLOW) çalışılmış ve su alma kotu derinleştikçe hidrolik eğime bağlı olarak elde edilecek su miktarının artmasına karşın kazı miktarının çok arttığı (su alma yapısı 20 m derinde olduğunda yaklaşık 200 000 m^3) görülmüştür. Ayrıca, su alma yapısının derinde olması halinde, topoğrafik eğimin az olması nedeniyle suyun cazibe ile yerüstüne çıkarılması baraj yerine göre yaklaşık 500 m mansapta mümkün olacağından baraja yakın olan bir kısım arazinin cazibe ile sulanamaması söz konusudur. Bu durumda geçirimsizlik perdesinin bulamaç duvarı olarak inşa edilip, suyun gövde üzerinden taşırma yoluyla elde edilmesi en

uygun seçenek olarak görünmektedir. Kamil yeraltı barajında ise geniş (300 m) ve kalın (52 m) olan alüvyonda dolgu gövde inşa edilmesi için ilk belirlemelere göre kazı miktarı en az 1 milyon m^3, gövde dolgusu ise 0.7-0.8 milyon m^3 olmaktadır. Bu miktarlardaki kazının ve dolgunun yüksek maliyet gerektirmesi nedeniyle ancak bulamaç duvarı yönteminin uygun olabileceği sonucu çıkmaktadır. Eksen yerinde alüvyonun boyutları henüz sondajlarla test edilmemiş ve pompalama testleriyle alüvyonun hidrolik özellikleri belirlenmemiş olmakla birlikte İnalözü yeraltı baraj yerinde yapılan elektrik rezistivite ölçümlerine göre alüvyonun kalın (en fazla 35 m) ve geniş (120 m) olması nedeniyle yapılabilirlik yönünden bulamaç duvarı yönteminin uygun olduğu düşünülmektedir. Diğer yeraltı baraj yerlerinde (Gökdere ve Kabaca) jeofizik rezistivite etütlerine göre alüvyon boyutları nispeten daha küçük olduğundan, hidrojeolojik koşulların da uygun olması halinde dolgu gövdenin (büyük olasılıkla homojen toprak dolgu) uygulanabileceği tahmin edilmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ankara-Çankırı-Çorum bölgesinde su kalitesinin daha yüksek olduğu yukarı havzalarda morfolojik, hidrojeolojik şartların uygun olması halinde içme ve sulama suyu ihtiyaçlarının karşılanmasında yeraltı barajlarından faydalanılması mümkündür. Ancak potansiyele yönelik hesaplamaların yetersiz olması veya yanlış yapılması, su kalitesi ile ilgili örnekleme, analiz ve değerlendirmelerin eksik veya yanlışlığı, araştırma sondajlarında özellikle akifer-ana kaya sınırının doğru belirlenmemesi, uygulamada gövdenin geçirimsiz formasyona oturtulmaması veya gövdenin istenen standartlarda inşa edilememesi, topoğrafik ve hidrojeolojik yapıya göre en uygun projenin seçilmemesi gibi nedenlerle başarısız sonuç alma riski bulunmaktadır. En önemlisi, yer seçimini yapmadan ve yapılabilirliğe karar vermeden önce topoğrafik ve hidrojeolojik koşullar ile malzeme imkanları, su ihtiyacı ve piyasa koşulları birlikte değerlendirilerek çok yönlü fizibilite analizleri yapılmalıdır. Yeraltı barajları yerüstü barajlarına göre olumsuz çevresel etkiler yönüyle daha masum olsa da mansap bölgesine etkileri araştırılarak su hakları ve doğanın su ihtiyaçları mutlaka dikkate alınmalıdır.

6. KAYNAKLAR

Apaydın, A, 1996. Derinçay Havzasının Hidrojeolojik Etüt Raporu, DSİ 5. Bölge Müdürlüğü, 82 s.

Apaydın A, Demirci Aktaş, S, Ekinci, O, 2005. Su kaynaklarının değerlendirilmesinde farklı bir yaklaşım: Yeraltı barajları, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler kitabı, 153-165, 21-24 Eylül 2005, Gümüldür-İzmir.

Apaydın, A, Demirci Aktaş, S, Kaya, S, 2009. Yeraltında su depolama: Yeraltı barajları, Mavi Gezegen, Popüler Yerbilim Dergisi, TMMOB Jeoloji Müh. Odası yayını, Sayı 14, 44-53.

Apaydin, A, 2009. Malibogazi groundwater dam: An alternative model for semi-arid regions of Turkey to store and save groundwater. Environmental Earth Sciences 59 (2), 339-345.

Apaydin A (2010). Response of Groundwater to Climate Variations: Fluctuations of Groundwater Level and Well Yields in the Halacli Aquifer (Cankiri-Turkey). Environmental Monitoring and Assessment, 165:653–663.

Apaydın A & Demirci Aktas S (2012). Assessment of Groundwater Quality of the Tatlicay Aquifer and Relation to the Adjacent Evaporitic Formations (Cankiri, Turkey), Environmental Monitoring and Assessment, 184:2337–2357.

Apaydın, A, 2014. Yer Seçiminden İşletmeye Yeraltı Barajları Kitabı, DSİ Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı Basım ve Foto Film İşletme Müdürlüğü, ISBN: 978-605-64763-0-3

Celik, M, & Yıldırım, T, 2006. Hydrochemical evaluation of groundwater quality in the Çavuscayı basin, Sungurlu-Corum, Turkey. Environmental Geology,50, 323–330.

D&R, 2004. Dünya ve Türkiye Coğrafya Atlası, D:B:R, Doğan Burda Rizzoli Dergi Yayıncılık ve Pazarlama AŞ, Hürriyet Medya Towers, Güneşli-İstanbul.

Nilsson, A, 1988. Groundwater dams for small-scale water supply, Intermediate Technology Publications Ltd. London, pp. 69.

Ankara İçmesuyu 2. Merhale Projesi Gerede Sistemi Boya İzleme Deneyi

Dye Tracer Test for Ankara Drinking Water 2nd Part Project Gerede System

U. Akdeniz[1], L. G. Köksal[1,*], M. Ş. Doğdu[1]

[1] *T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Devlet Mahallesi, İnönü Bulvarı No: 16 06100 Çankaya-Ankara (*lutfukoksal@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Ankara içmesuyu 2. Merhale Projesi Gerede Sistemi ile Gerede Çayı üzerinde yapımı tasarlanan Işıklı regülatöründe toplanan suyun, toplam uzunluğu 31,592 metre olan Işıklı tüneli vasıtasıyla cazibeli olarak Çamlıdere Barajına iletilmesi projelendirilmiş olup inşası devam etmektedir. Tünelin açılması sırasında kireçtaşı birimi geçilmeye başlandıktan sonra tünele yüksek miktarda su geldiği görülmüştür. Tünele gelen yüksek miktardaki su, tünelin açılmasına önemli ölçüde engel olmuştur. Tünele fazla su gelmesi ile yakın zamanda, tünele yaklaşık 3 km mesafede, Markuşa Deresi üzerinde bir göçük tespit edildiği ve derenin suyunun bu göçük alanındaki suyutana girerek kaybolduğu gözlenmiştir. Tünele gelen bu fazla suyun Markuşa Deresinden suyutana girerek kaybolan su olabileceği düşünülmüştür. Yapılan bu boya izleme deneyi çalışmasının amacı, Markuşa Deresi üzerindeki göçük alanında yer alan suyutan ile tünel arasında bir hidrolik ilişkinin olup olmadığını ortaya koymaktır. Boya izleme deneyi sonucunda, göçük alanından suyutana verilen boyanın tünele geldiği tespit edilmiş, tünel ve göçük arasında bir hidrolik ilişkinin olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Işıklı Tüneli, Boya İzleme Deneyi, Göçük, Suyutan, Kireçtaşı

ABSTRACT: *Ankara Drinking water 2nd Part Project Gerede System has been designed to transfer the water accumulated in Işıklı Regulator, which has been planned to be built on Gerede stream, to Çamlıdere Dam as gravity flow through Işıklı Tunnel whose total length is 31592 m. The tunnel is currently under construction. It has been observed that excessive amount of water has ingressed into the tunnel while the excavation was progressing within the limestone unit. This excessive water has prevented the drilling of the tunnel significantly. Within the timeframe of ingress of excessive water into the tunnel, a subsidence, which is 3 km away from the tunnel and very close to Markuşa Creek, has been observed and the water of Markuşa creek has been flowing into the sinkhole at the subsidence. It was thought that the excessive water ingressed into the tunnel might be recharged from Markuşa Creek that flows into the sinkhole. The main objective of this dye tracer test is to determine if there exists a hydraulic connection between the tunnel and the sinkhole at the subsidence, which is very close to Markuşa Creek. The result of this dye tracer test has shown that the dye injected into the sinkhole at the subsidence has flowed to the tunnel and a hydraulic connection between the tunnel and the sinkhole at the subsidence has been proved.*

Keywords: *Işıklı Tunnel, Dye Tracer Test, Subsidence, Sinkhole, Limestone*

1. GİRİŞ

Ankara içmesuyu 2. Merhale Projesi Gerede Sistemi ile Gerede Çayı üzerinde yapımı tasarlanan Işıklı regülatöründe toplanan suyun, toplam uzunluğu 31592 metre olan Işıklı tüneli vasıtasıyla cazibeli olarak Çamlıdere Barajına iletilmesi projelendirilmiş olup inşası devam etmektedir. İnceleme alanı, Bolu-Gerede ilçesi ve Ankara-Çamlıdere ilçesi sınırları içerisinde kalmaktadır. Söz konusu tünelin açılması sırasında kireçtaşı birimi geçilmeye başladıktan sonra tünele yüksek miktarda su (yaklaşık 300-350 l/s) geldiği görülmüştür.

Tünele gelen yüksek miktardaki, tünelin açılmasına önemli ölçüde engel olmuştur. Tünele fazla su gelmesi ile yakın zamanda, Salur köyüne yaklaşık 500-700 m mesafedeki ve tünele yaklaşık 3 km mesafedeki Markuşa Deresi üzerinde bir göçük tespit edildiği ve derenin suyunun bu göçük alanındaki suyutana girerek kaybolduğu görülmüştür. Tünele gelen yüksek miktardaki suyun Markuşa

Deresinden göçük içine girerek kaybolan su olabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple, alanda bir adet boya izleme deneyi yapılmasına karar verilmiştir. Yapılan boya izleme deneyi çalışmasının amacı, Markuşa Deresi üzerindeki göçük alanında yer alan suyutan ile tünel arasında bir hidrolik ilişkinin olup olmadığını ortaya koymaktır.

2. İNCELEME ALANININ TANITILMASI

İnceleme Alanının Tanıtılması kısmında verilen tüm bilgiler Özaslan, (2008)'den alınmıştır.

2.1 Genel Bilgiler

Bu proje ile Gerede Çayı üzerinde yapımı tasarlanan Işıklı regülatöründe toplanan suyun, toplam uzunluğu 31,592 metre olan Işıklı tüneli vasıtasıyla cazibeli olarak Çamlıdere Barajına iletilmesi öngörülmektedir. İnceleme alanı Bolu ili Gerede ilçesi ve Ankara ili Çamlıdere ilçesi sınırları içerisinde kalmaktadır. Proje ile ilgili bazı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Proje Özellikleri:
Tünelin amacı: Su isalesi
Tünel uzunluğu: 31,592 metre
Kesit tipi: Dairesel
Kazı çapı: 5.30 metre
Tünel iç çapı: 4.50 metre
Hidrolik eğim: % 0.11

2.2 İnceleme Alanının Jeolojisi

Boya izleme deneyi yapılan alan, yakın çevresi ve tünel güzergahında bulunan jeolojik formasyonlar aşağıda belirtilmiştir;

(Özaslan, 2008) tarafından bu jeolojik birimlerden Soğukçam ve Markuşa formasyonları "neojen öncesi birimler" olarak, Uludere, Ilıcadere ve Bakacaktepe formasyonları ise "neojen ve sonrası birimler" olarak belirtilmiştir.

Soğukçam Formasyonu (JKs): Çalışma alanında, kalın tabakalı-masif, beyaz, sarı renkli, çörtlü, kumlu kireçtaşı birimlerden oluşan Jura-alt kretase yaşlı Soğukçam Formasyonu (JKs) bulunmaktadır. Bu formasyonu temsil eden kireçtaşı sert, beyaz renkli, yarı kristalize ve yer yer oolitik olup faylı dokanaklar civarında çok parçalanmış ve breşiktir.

Markuşa Formasyonu (Tem): Yeşilimtırak-kahverengi, kalın-orta tabakalı kiltaşı-kumtaşı ardalanmasından oluşan eosen yaşlı Markuşa formasyonu yer yer kireçtaşı, andezit ve kuvars olan konglomera seviyeleri ile yeşil renkli tüflü seviyeler ve tüf matriksli ince konglomera seviyeleri barındırır.

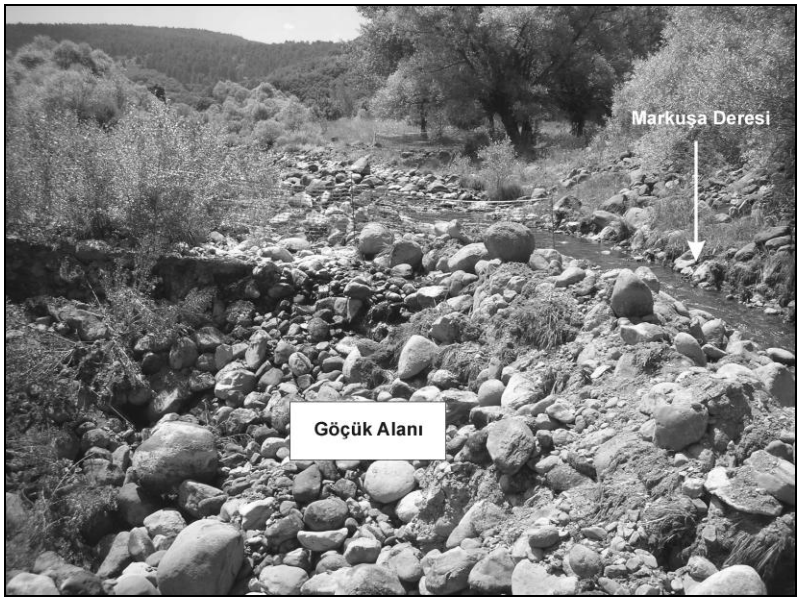
Uludere Volkanitleri (Tmu): İnceleme alanının kuzeyinde genelde aglomera, volkanik breş, ve akıntı (ignimbirit) çökelleri ile bazalt seviyelerinden oluşan piroklastik ürünler Uludere Volkanitlerini oluşturmaktadır. İnceleme alanının güneyinde ise bu formasyon akıntı (ignimbirit), aglomera ve döküntü çökelleri tarafından temsil edilir. (Özaslan, 2008) Bölgede gözlenen bütün piroklastik ürünler, Türkecan vd. (1991) tarafından Uludere Volkanitleri olarak adlandırılmıştır. (Özaslan, 2008; Türkecan, 1991)

Ilıcadere Volkaniti (Tmı): Tüf ve aglomeranın oluşturduğu volkanoklastikler ile temsil edilen Ilıcadere Volkaniti yer yer bazalt, andezit ve volkanik konglomera / breş seviyeleri de içerir. Ilıcadere volkaniti genelde sarı, grimsi beyaz ve lav seviyeleri yakınlarında kırmzımsı renktedir. (Özaslan, 2008) Varol Muratçay, (2006) tarafından yapılan yaş tayini analizleri sonucunda birimin yaşı alt-miyosen olarak

belirlenmiştir. (Özaslan, 2008; Varol Muratçay, 2006) Bakacaktepe Volkaniti (Tmb): Bakacaktepe Volkanit birimi yataya yakın konumdaki kalın bazalt/andezit lavı, yer yer de bazalt piroklastik ardalanmasından oluşmaktadır. Bu ardalanmalar Ilıcadere volkanitlerinin piroklastik seviyelerinin üzerinde yer almaktadır.

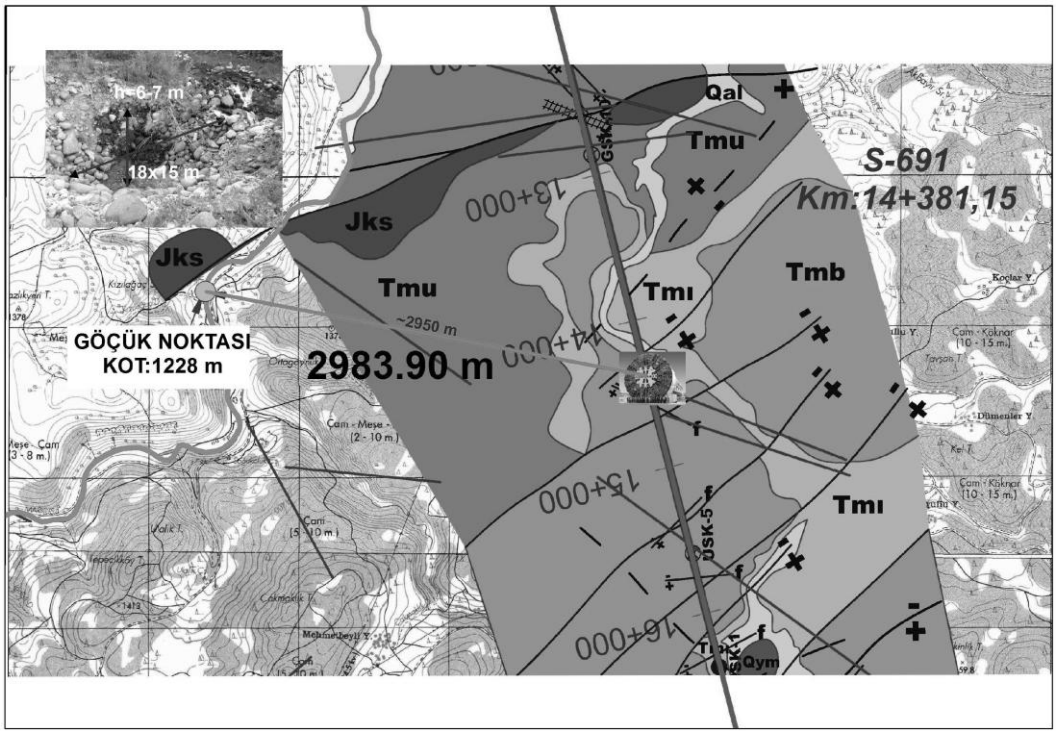
3. BOYA İZLEME DENEYİ

Boya izleme deneyi öncesinde Gerede Tüneli'ne gidilerek ön etüt çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, Salur Köyünün yaklaşık 500-700 m güneyinde meydana gelen göçük alanı incelenmiştir. Bu göçük alanının içine Markuşa deresi suyunun girerek kaybolduğu gözlenmiştir. Bu sebeple bu göçük alanında (Şekil 1 ve 2) oluşan su yutana boya verilerek boya izleme deneyi yapılması planlanmıştır.



Şekil 1. Markuşa Deresi yanında oluşmuş göçük

Boya izleme deneyi yapılan alan, tünel güzergahı ve yakın çevresindeki jeolojik birimler'i gösteren harita Şekil 2' de verilmiştir. Bu haritada tünel güzergahı, TDM'in (tünel delme makinası) tüneldeki yeri, boya verilen göçük noktası, tünel güzergahı ve çevresindeki jeolojik birimler bulunmaktadır.



Şekil 2. Boya izleme deneyi yapılan alan, tünel güzergahı ve yakın çevresindeki jeolojik birimler

Boya izleme deneyi yapılan alan, tünel güzergahı ve yakın çevresindeki jeolojik birimler'i gösteren harita, DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı 2. Mühendislik Jeolojisi Şube Müdürlüğü çalışanı Jeoloji Mühendisi Burak GÖNENCAN tarafından hazırlanmıştır.

Bu deneyde, kendi kendine örnekleme yaparak boya değerlerini hafızasına kaydedebilen iki adet C3 fluorometre cihazının kullanılmasına karar verilmiştir. (Şekil 2) Bu cihazlardan bir tanesi Tünelin TDM kafasının 15 m gerisine (suyun Tünel içine fazlaca geldiği noktalardan biri) diğeri ise Tüneldeki suların bir kısmının pompayla boşaltıldığı, dışarıdaki havuza takılmıştır. Ayrıca, eşel (tünelden çıkan tüm suların toplandığı yer) ve Çamlıdere çıkış (Çamlıdere şantiyesi tünel çıkışı) noktaları da örnekleme noktası olarak belirlenmiş olup bu noktalardan numune toplanarak örnekleme yapılmıştır.

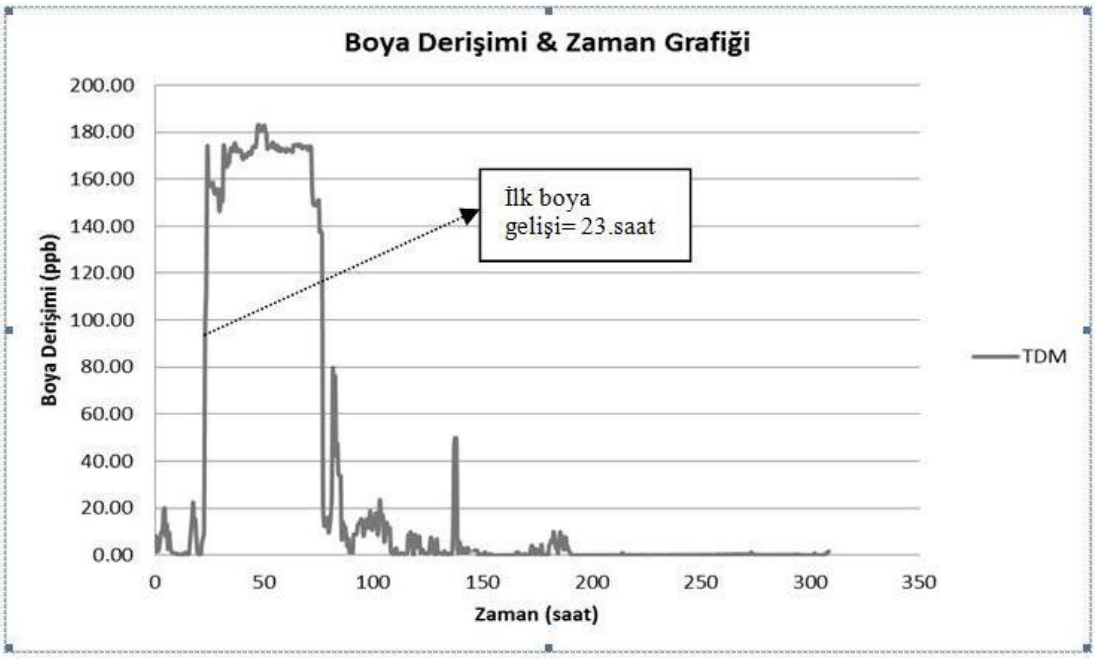
Boya İzleme Deneyi gerçekleştirilmeden önce örnek toplanan Eşel ve Çamlıdere Çıkış örnekleme noktalarından şahit numuneler alınmıştır. Deney öncesi alınan bu şahit numunelerde izleyici boyaya rastlanmamıştır. Havuz ve TDM noktasına yerleştirilen cihazlar boya verme işleminden önce örneklemeye başladığından bu noktalarda şahit numune değerleri bulunmaktadır. Kaydedilen değerlere göre, TDM noktasında şahit değer 10.04 ppb, havuzdaki şahit değer ise 3.77 ppb olarak ölçülmüştür.

11.07.2014 tarihinde Salur Köyü'nün yakınındaki çökme alanında oluşan su yutana boya verilerek boya izleme deneyi başlatılmıştır. Bir defada 4 kg uranin boya, 1 m^3 su ile varilde karıştırılarak hortum vasıtasıyla su yutana verilmek suretiyle toplamda 12 kg uranin boya verilmiştir. Boya verme işlemi saat 14:00'da başlamış ve saat 19:00'da sona ermiştir. Boya verme işlemi tamamlanmasından sonra örnekleme programına geçilmiştir. Örnekleme TDM, havuz ve Eşelde 14 gün, (bu noktalarda boya erken tespit edildiği için örnekleme erken sonlandırılmıştır) Çamlıdere Çıkış noktasında ise 41 gün boyunca devam etmiştir.

4. BOYA İZLEME DENEYİ SONUÇLARI

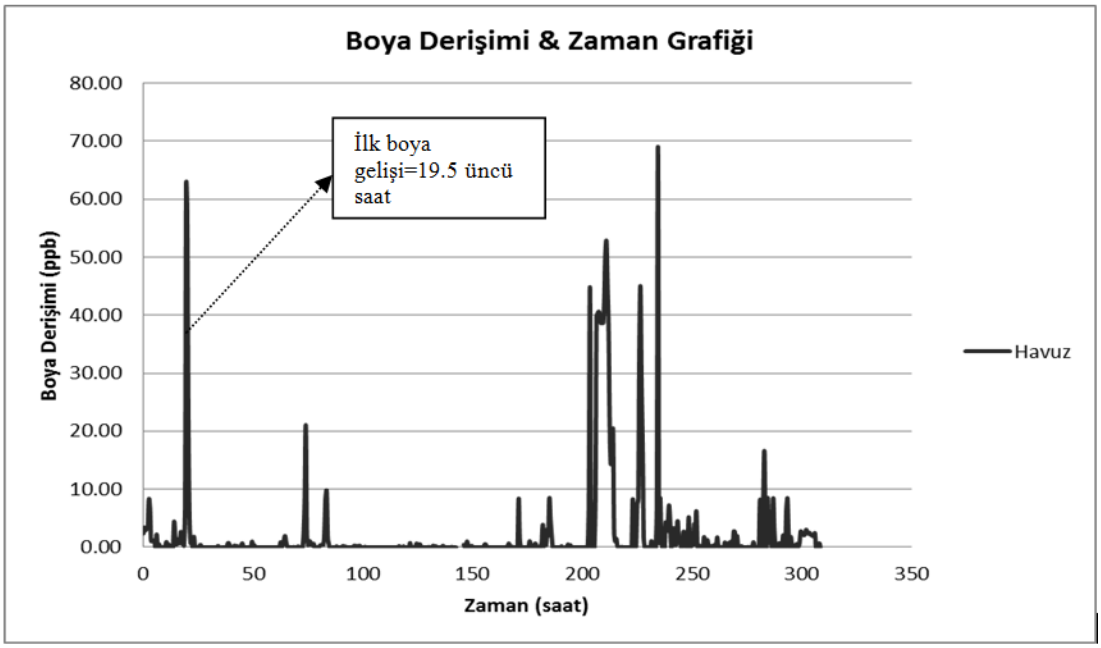
Yapılan boya izleme deneyi sonucunda, TDM'da (tünel içindeki tünel delme makinası), Tüneldeki suların pompayla boşaltıldığı dışarıdaki havuzda ve tünelden çıkan tüm suların toplandığı Eşelde boya gelişi tespit edilmiştir.

Tünelin, TDM'in bulunduğu yerde kaydedilen ilk değerler, 4.saatte 18.89 ppb ve 17.saatte 15.36 ppb olarak kaydedilmiş ve boya derişimi değerlerinin kısa sürede azaldığı görülmektedir. Bu noktadaki şahit numune değeri 10.04 ppb olduğundan, bu değerler bariz şekilde bir boya gelişini göstermemektedir. Boya değerindeki bu tip küçük artışlar/sıçramalar boya gelişi olabileceği gibi çevredeki başka maddelerden de (yosun, çevrede kullanılan başka kimyasal maddeler) kaynaklanabilmektedir. Bununla birlikte, TDM noktasına yüksek derişimde boya 23.saatte 94.86 ppb olarak gelmeye başlamıştır. Gelen bu boya derişimi, 47.5 inci saatte 183 ppb olarak en yüksek değerine ulaşmıştır. Ayrıca, 23. saatte yüksek derişimde gelmeye başlayan bu boya gelişi 53.5 saat boyunca yüksek derişimde gelmeye devam etmiştir. Daha sonra boya derişimi TDM noktasında azalmaya başlamıştır. TDM noktasında, deney sonuna kadar zaman zaman boya derişiminde artışlar kaydedilmiş ve 190. saatten sonra boya derişimi hemen hemen sıfırlanmıştır. Özetle, Markuşa Deresi yanındaki çökme alanından verilen boyanın tünele yüksek derişimde geldiği (183 ppb) tespit edilmiştir. TDM noktasında kaydedilen boya derişiminin zamana karşı çizilen grafiği Şekil 3'de verilmiştir.



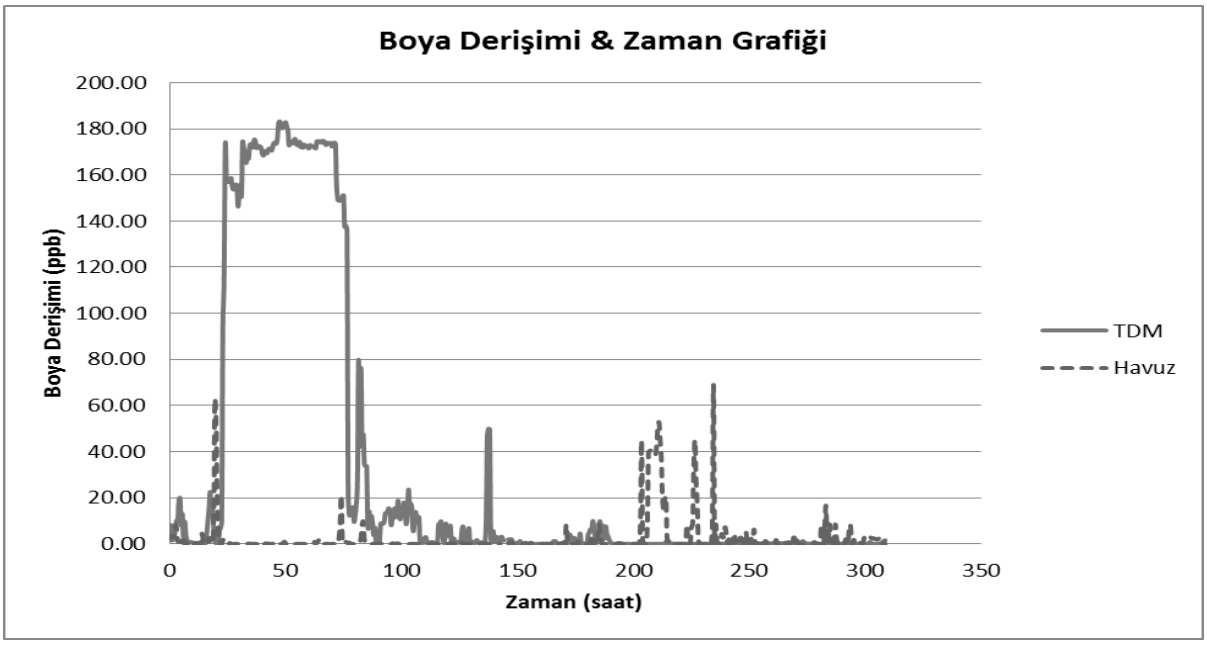
Şekil 3. TDM noktasında kaydedilen boya derişimi ve zaman grafiği

Tüneldeki suların pompayla boşaltıldığı, dışarıdaki havuz yerleştirilen fluorometre cihazında da boya gelişi kaydedilmiştir. Boya verildikten sonra havuzda kaydedilen değerlerde 2.5 inci saatte çok küçük bir artış olsa da (8.30 ppb), havuzdaki şahit numune değeri 3.77 ppb olduğundan bu değer bariz bir şekilde boya gelişi olduğunu göstermemektedir. Bu sebeple, havuza ilk boya gelişinin 19.5 inci saatte olduğu (62.28 ppb) ve bu boyanın 1.5 saat sonra hemen hemen sıfırlandığı görülmektedir. Ayrıca, deneyin sonlarına doğru havuzdaki boya derişimi değerinde zaman zaman artışlar olduğu görülmekte olup havuzda kaydedilen en yüksek boya derişimi 69.01 ppb'dir. Havuzda kaydedilen boya derişiminin zamana karşı çizilen grafiği Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Havuzda kaydedilen boya derişimi ve zaman grafiği

TDM ve Havuz noktasında kaydedilen boya derişimi - zaman grafiği beraber incelendiğinde, (Şekil 5) havuza (havuza ilk boya gelişi 19.5 inci saatte olmuştur) TDM noktasından (TDM'e ilk boya gelişi 23.saatte olmuştur) 3.5 saat daha önce boya geldiği görülmektedir. Havuza gelen su, pompalar vasıtasıyla tünelden geldiği için, havuza 19.5 inci saatte boya gelmesi, 19.5 inci saatten önce tünele boya geldiğini işaret etmektedir. Bu da, tünelin C3 fluorometre cihazının yerleştirildiği yerden farklı bir yere/yerlere daha boya geldiğini de göstermektedir. Ayrıca, havuzda yüksek derişim ölçüldüğü zaman aralığında (203. ve 214. saat aralığı) TDM de hemen hemen sıfır boya derişimi kaydedildiği görülmektedir. Bu da, havuza tünelin başka noktalarından (C3 fluorometre cihazının konulduğu yerden farklı bir yerden) boya geldiğini işaret etmektedir.



Şekil 5. TDM ve havuzda kaydedilen boya derişimi ve zaman grafiklerinin birlikte gösterimi

Havuzda ve TDM noktalarına ilk boya gelişi sırasıyla 19.5 inci saatte ve 23. saatte olup TBM ile göçük noktası arası uzaklık 2983.90 m'dir. Bu zaman ve uzaklık değerleri kullanıldığında, havuza gelen boyaya göre, maksimum (gerçek) yeraltısuyu hızı V= 2983.90/19.5 = 153 m/saat veya V=3672 m/gün olarak hesaplanmıştır. TDM noktasına gelen boyaya göre ise, maksimum (gerçek) yeraltısuyu hızı ise V= 2983.90/23= 129.73 m/saat veya V= 3113.63 m/gün olarak hesaplanmıştır.

Eşel noktasında kaydedilen en yüksek boya şiddeti değeri 18.saate 12.69 ppb olarak ölçülmüştür. Eşel noktasına tüneldeki ve havuzdaki sular gelmektedir. Eşelde ölçülen bu değer düşük bir değer olup buraya havuzdaki veya tüneldeki boyanın seyrelerek gelmesi beklenen bir durumdur.

Çamlıdere çıkış (Çamlıdere şantiyesi tünel çıkışı) noktasından toplanan numunelerde boya tespit edilmemiştir.

Yapılan boya izleme deneyi sonucunda, Markuşa Deresi üzerindeki göçük alanında yer alan suyutan ile tünel arasında bir hidrolik ilişkinin olduğu ortaya konmuştur.

5. KAYNAKLAR

Özaslan, H., 2008. Ankara su temin projesi gerede sistemi 2. aşama ışıklı tüneli kesin proje jeoteknik raporu. Cilt – I, Yüksel Proje - Su İş Proje Ortak Girişimi.

Türkecan, A., Hepşen, N., Papak, İ., Akbaş, B., Dinçel, A., Karataş, S., Özgür, İ., Akay, E., Bedi, Y., Sevin, M., Mutlu, G., Sevin, D., Ünay, E., Saraç, G., 1991. Seben-Gerede (Bolu)-Güdül-Beypazarı(Ankara) ve Çerkeş-Orta-Kurşunlu (Çankırı) Yörelerinin (Köroğlu Dağları) jeolojisi ve volkanik kayaçların petrolojisi. MTA, Raporu No: 9193, 118 s.

Varol M.E., 2006. Çamlıdere (Ankara Kuzeybatısı) yöresi volkanik kayaçlarının petrolojisi ve jeokimyası. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Akköprü Barajı Göl Alanında İnşa Edilen Geçirimsizlik Yapılarının Sızdırmazlığının Test Edilmesi+

Testing of Water Tightness of Impervious Structures Constructed at Akköprü Dam Reservoir

U. Akdeniz[1], M. Ş. Doğdu[1,*], L. G. Köksal[1], N. Pelen[1], N. K. Güner[1]

*T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı Devlet Mahallesi, İnönü Bulvarı No:16 06100 Çankaya-Ankara (*mufitd@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Akköprü Barajı: Dalaman Çayı (Muğla) üzerinde, kil çekirdek kaya dolgu tipinde inşa edilen bir barajdır. Baraj yerinde temel kayayı Kretase yaşlı peridoditler oluşturmaktadır. Baraj göl alanında ise; Paleozoik yaşlı Cehennem deresi kireçtaşı, Kretase yaşlı peridotit-serpantinit, Paleosen yaşlı Aktaş kireçtaşı, Gökseki filişi, Kuvaterner yaşlı teras ve alüvyon birimleri yer almaktadır. Baraj inşası devam ederken gölalanı içinde kalan, karstik özelliğe sahip Aktaş kireçtaşının maksimum su seviyesi altında kalan ~300000 m^2'lik kısmı göl alanından olabilecek su kaçaklarını önlemek için betonla kaplanmıştır. Beton kaplamanın sınırının bittiği, su altında kalacak olan kısıma kesişen kazık sistemiyle 810 m uzunluğunda geçirimsiz perde inşa edilmiştir. Bu perde beton kaplamanın altındaki yatay yönlü geçirimsizliği sağlamak amacıyla yapılmıştır. Sunulan bu çalışmada: barajda su tutulmadan önce perdenin geçirimsizliğinin yeraltısuyu izleme teknikleri ile test edilmesi ve barajda su tutulduktan sonra ise kaplama bölgesinin geçirimsizliğinin takibi için kaplamanın mansabında baraj gölü maksimum su kotu üzerindeki yeraltısuyu gözlem kuyularıyla geçirimsizlik yapılarının etkinliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akköprü Barajı, Geçirimsizlik Perdesi, İzleme Deneyi

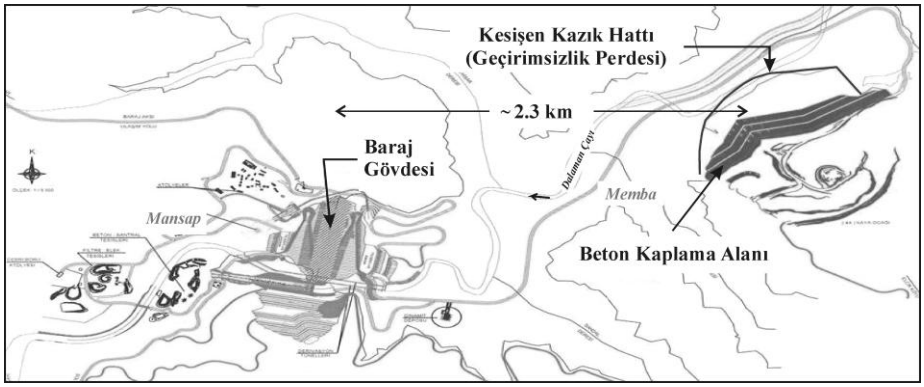
ABSTRACT: *Akköprü Dam, is an earth and rock fill type dam constructed on Dalaman River (Muğla) The bad rock at the dam site is composed of Cretaceous aged peridotites. Paleozoic aged Cehennemderesi limestone, Cretaceous aged peridotites-serpentines, Paleocene aged Aktaş limestone, Gökseki flysch, Quaternary aged terrace and alluvium units are exposed at the dam reservoir area. During dam construction, an area of ~300000 m^2 of the karstic Aktaş limestone extending below the maximum reservoir water level was covered with concrete lining to prevent water leakage from the reservoir. A grouting curtain was built, along 801 m of the edge of the concrete lining by overlapping piles system. This grouting curtain was built provide a horizontal water tightness under the concrete lining. In this study: curtain water tightness was tested by groundwater tracing techniques. After impoundment, effectiveness of concrete lining area and also overlapping piles system was evaluated by groundwater observation wells drilled at maximum reservoir water level of dam.*

Keywords: *Akköprü Dam, Grouting Curtain, Tracer Test*

1. GİRİŞ

Akköprü Barajı: Batı Akdeniz Havzasında yer alan ve Aşağı Dalaman Projesi kapsamında Dalaman Çayı (Muğla) üzerinde, kil çekirdek kaya dolgu tipinde inşa edilen bir barajdır. Baraj gövde yüksekliği temelden itibaren 162.5 m olup, baraj göl alanı 8.76 km^2 ve aktif depolama hacmi 384.5 hm^3'tür.

Baraj inşası devam ederken göl alanı içinde kalan, karstik ve geçirimli özelliğe sahip Aktaş kireçtaşının maksimum su seviyesi (200 m) altında kalan ~300000 m^2'lik kısmı beton ile kaplanmıştır. Beton kaplama göl alanından meydana gelecek olan su kaçaklarını önleyerek geçirimsizliği sağlayacaktır. Beton kaplamanın sınırının bittiği su altında kalacak olan kısıma; 45 cm çaplı, 10 cm bindirmeli, derinliği 10-40 m arasında değişen, ~2375 adet kesişen kazıkla 810 m uzunluğundaki geçirimsiz perde inşa edilmiştir (Şekil 1). Bu perde, beton kaplamanın altındaki yatay yönlü geçirimsizliği sağlamak amacıyla yapılmıştır.



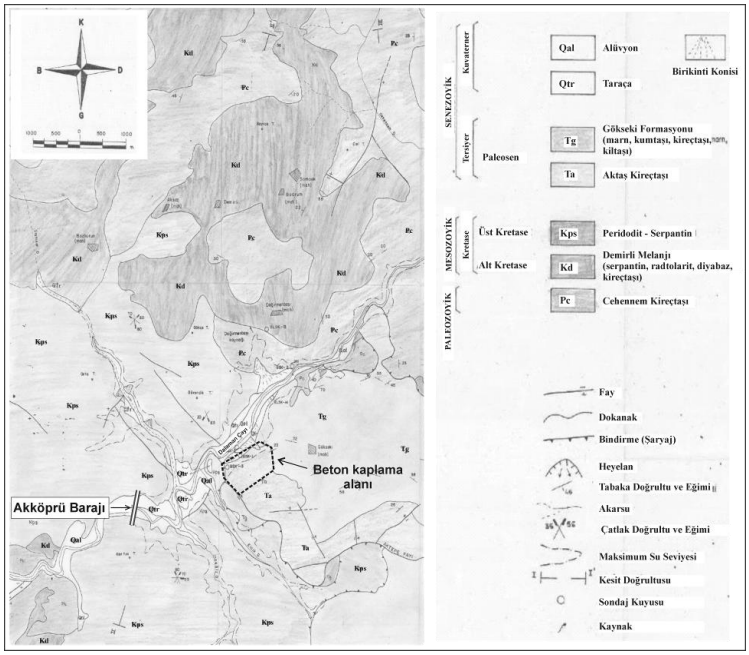
Şekil 1. Barajın, membadaki kaplama alanının ve kesişen kazık hattının yeri.

2. AMAÇ

Sunulan çalışma: kesişen kazık uygulamasıyla yapılan ~810 m uzunluğundaki perdenin geçirimsizliğinin yeraltısuyu (YAS) izleme teknikleri ile testi ve test sonuçlarının tartışılmasını kapsamaktadır. Çalışmanın diğer bir amacı barajda su tutulduktan sonra kaplamanın mansabında baraj gölü maksimum su kotu üzerinde olacak şekilde açılan YAS gözlem kuyularından yeraltısuyu seviye (YASS) ölçümünün yanısıra eş zamanlı ölçülen baraj göl su kotu değerlerinin karşılaştırılarak kaplama bölgesinin (perde+boton kaplamanın) geçirimsizliğinin irdelenmesidir. Kuyulardaki YASS ölçümünün yanı sıra kaplama alanının ~17 km güneyinde bulunan kaynakların debisi de takip edilmiştir.

3. BARAJ YERİ VE BARAJ GÖL ALANININ GENEL JEOLOJİSİ

Baraj yeri ve göl alanında da Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı beyaz gri renkli, masif yapılı, yer yer erime boşluklu, çatlaklı Cehennem kireçtaşı; Mesozoyik (Kretase) yaşlı yeşil, kırmızı, boz, alacalı renkli, çok ayrışmalı serpantin, radyolarit, diyabaz ve kireçtaşı karmaşığından oluşan Demirli melanjı; siyahımsı, koyu yeşil, kızıl kahve renkli, çok çatlaklı ve kırıklı peridodit-serpantinden oluşan Marmaris ofiyoliti; Senozoyik (Tersiyer-Paleosen) yaşlı beyazımsı-gri renkli, masif yapılı, yer yer plaketli ve bitümlü seviyeler içeren karstik Aktaş kireçtaşı; kirli yeşil-gri renkli, düzenli tabakalanmalı kiltaşı-marn-kireçtaşı ardalanmalı Gökseki filişi; Senozoyik (Kuvaterner) yaşlı kireçtaşı-peridodit-serpantin-çört kökenli silt, kum, çakıl ve bloklarının yer yer karbonat çimentolu olduğu teras birimi ve kil, silt, kum ve çakıldan oluşan alüvyon birimleri yer almaktadır (Şekil 2).



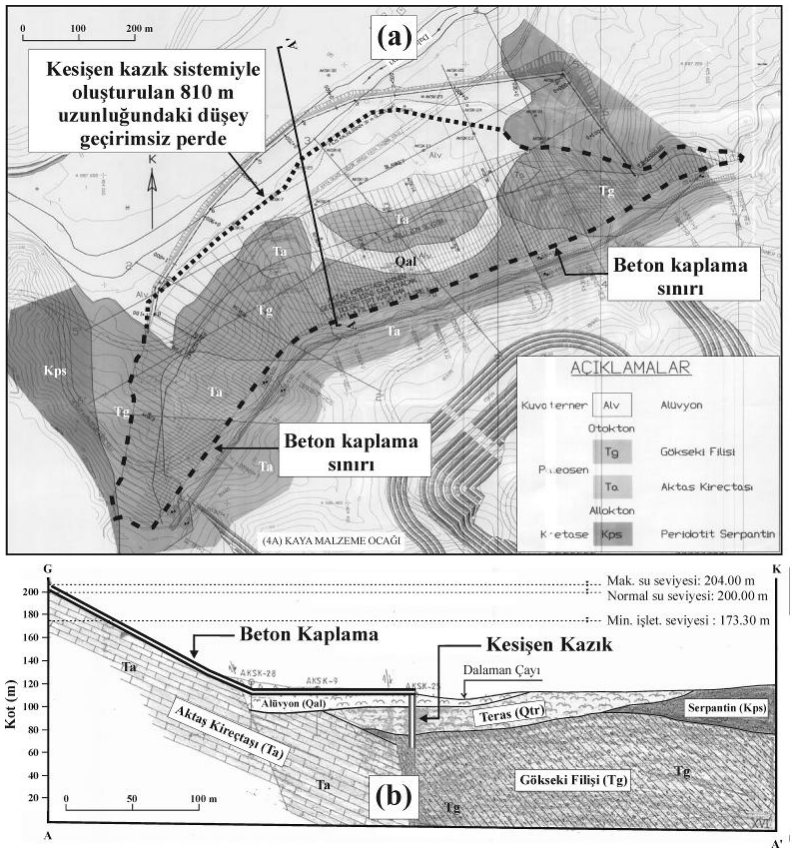
Şekil 2. Akköprü Barajı ve çevresinin jeoloji haritası (Şekercioğlu, 1998).

4. KAPLAMA ALANINDA YAPILAN İMALATLAR

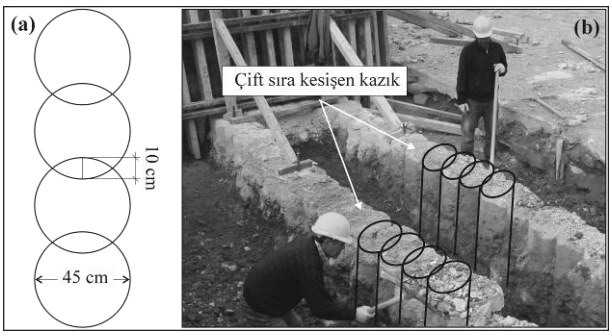
Karstik ve geçirimli özellikli nedeniyle rezervuar alanındaki Aktaş kireçtaşı biriminin maksimum su seviyesi (204 m) altında kalan kısmının betonla kaplanması (Şekil 3a ve 3b), aynı bölgede yer alan teras biriminin düşey geçirimsiz perde ile Gökseki filişine bağlanması kesişen kazık ile projelendirilerek mansaba olabilecek su kaçaklarının önlenmesi öngörülmüştür (bk. Şekil 3b). Beton kaplamanın sınırının bittiği su altında kalacak olan kısıma; 45 cm çaplı, 10 cm bindirmeli, derinliği 10-40 m arasında değişen, ~2375 adet kesişen kazıkla (Şekil 4) 810 m uzunluğundaki geçirimsiz perde inşa edilmiştir (bk. Şekil 3a). Kesişen kazıklar filiş derinliğinin 20 m olduğu yerlerde filişe 2 m, derinliğin 20 m'den fazla olduğu ve filişe 3 m girecek şekilde uygulanmıştır (nispeten filişin bozunmuş olduğu bazı yerlerde filişe 7 m girildiği de olmuştur). Bu perde ise beton kaplamanın altındaki yatay yönlü geçirimsizliği sağlamak amacıyla yapılmıştır.

5. SU TUTULMADAN ÖNCE GEÇİRİMSİZLİK PERDESİNİN TEST EDİLMESİ

Beton kaplamanın sınırının bittiği yerde kesişen kazık uygulamasıyla yapılan perdenin geçirimsizliği YAS izleme teknikleri ile test edilmiştir. 810 m uzunluğundaki perde gerek tuz gerekse boya izleme deneyleri ile kısım kısım test edilmiştir. Kesişen kazıkların inşasının peyderpey bitirilmesini takiben geçirimsizlik perdesi boyunca değişik metrajlarda olmak üzere toplam 5 adet tuz ve/veya boya izleme deneyleri yapılarak perdenin geçirimsizliği test edilmiştir. Bu 5 adet izleme deneyine ek olarak, geçirimsizlik konusund kuşkulu bazı noktalarda yapılan iyileştirmelerden (balkon yapısı, enjeksiyon vb.) sonra da bu noktaların tekrar test edilmesi amacıyla da 3 adet daha izleme deneyi gerçekleştirilmiştir. İzleme deneyi öncesi yapılan çalışmalar ve izleme deneyinde yapılan uygulamalar hakkında genel bilgiler km 0+300.00 - km 0+435.00 metrajı arasında gerçekleştirilmiş olan boya izleme deneyi* örneği üzerinden aşağıda açıklanmıştır.

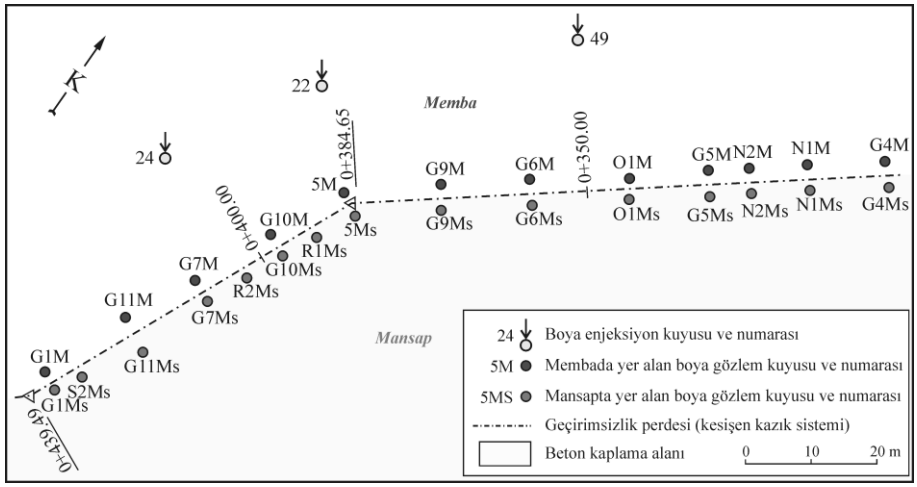


Şekil 3. Aktaş kireçtaşları kaplama bölgesinin a) harita ve b) kesit görünümü.

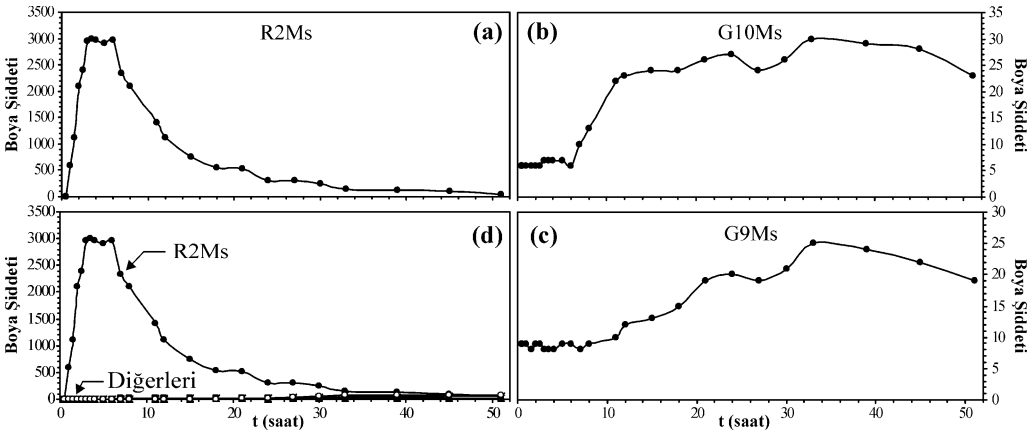


Şekil 4. Beton kaplamanın geçirimsiz Gökseki filişine bağlanmasında kullanılan kazıklarına) plan ve b) kesit görünümü.

İzleme deneyi gerçekleştirilmeden önce, ilk olarak harita üzerinde ve daha sonra da arazide incelenerek geçirimsizlik perdesinin membadaki olası boya enjeksiyon kuyuları ile geçirimsizlik perdesinin (kesişen kazık sisteminin) memba (M) ve mansabındaki (MS) boya gözlem noktaları belirlenmiştir (Şekil 5). YAS akım yönleri de dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, hat boyunca boya yayılımının homojen sağlanması için boyanın geçirimsizlik perdesinin memba tarafında yer alan 24, 22 ve 49 numaralı kuyulardan YAS'na verilmesi uygun bulunmuştur (bk. Şekil 5). Her 3 kuyu başında ayrı ayrı olmak üzere 1 kg boya (uranin) kuyu başında bulunan ~520 l kapasiteli mikserlerde su ile karıştırılarak enjeksiyon kuyuları aracılığı ile YAS'na verilmiştir. YAS'na boya enjeksiyon işleminden sonra her yarım saate bir olmak üzere, geçirimsizlik perdesinin membaında ve mansabında yer alan 13 adet piyezometre çiftinden (26 kuyudan) (bk. Şekil 5) su örneği alınarak boya (uranin) şiddeti değerleri Turner Model 111 fluorometre aleti kullanılarak arazide yerinde ölçülmüştür. Deney tamamlanıp boya ölçüm sonuçları elde edildikten sonra bu değerler kullanılarak zaman-boya şiddeti grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 6).



Şekil 5. İzleme deneyi öncesi seçilen boya enjeksiyon ve boya gözlem kuyuları.



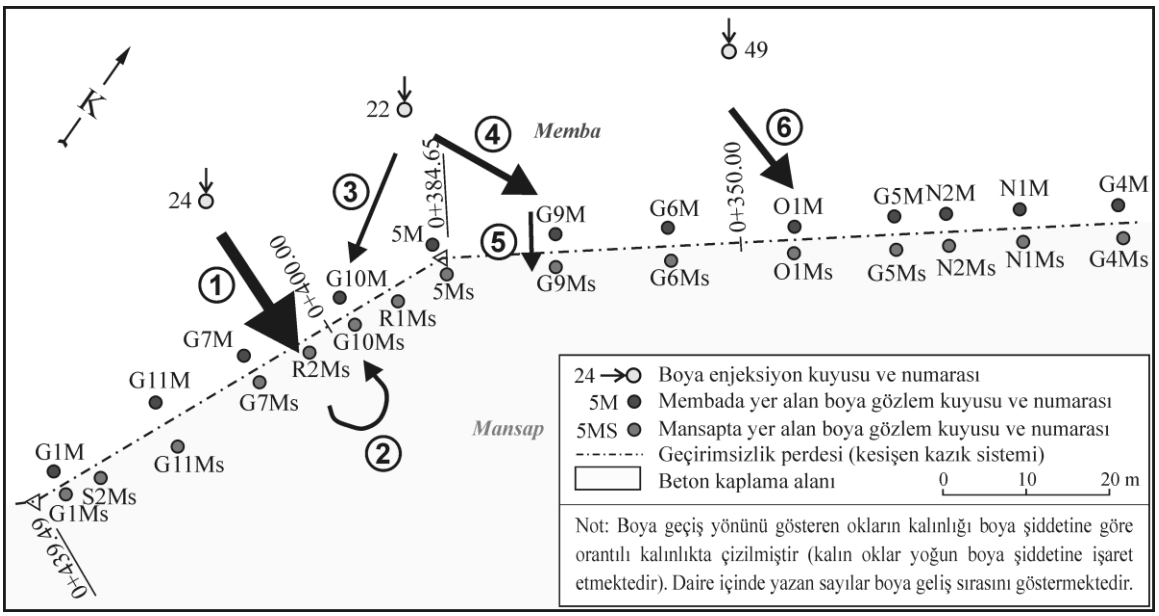
Şekil 6. a) R2Ms, b) G10Ms, c) G9Ms ve d) bu kuyuların tümüne ait boya şiddeti-zaman grafikleri.

Oluşturulan grafikler ve alanın jeolojik yapısı da göz önünde bulundurularak aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır: YAS'na boya verilme işleminin tamamlanmasından sonra ilk boya gelişi yaklaşık 1 saat sonra R2MS no'lu mansap kuyusunda gözlenmiştir (bu kuyunun memba kuyusu yoktur, bk. Şekil 6). Bu kuyuda boya hem oldukça çabuk sayılabilecek sürede ve oldukça fazla yoğunlukta gözlenmiştir (bk. Şekil 6a). Kuyuda oldukça hızlı ve yoğun bir şekilde boya görünmesi nedeniyle: bu noktaya gelen boyanın 24 no'lu enjeksiyon kuyusundan YAS'na verilen boyanın geçirimsizlik perdesini geçerek gelen boya olduğu düşünülmektedir. R2Ms no'lu kuyunun yaklaşık 5 m batısından bir fay hattı geçmektedir (bu fay hattı kuzeye doğru 24 no'lu boya enjeksiyon kuyusuna doğru da uzanmaktadır). Boyanın R2Ms no'lu mansap kuyusuna hızlı ve yoğun şekilde gelmesi: 1) boyanın geçirimsizlik perdesinin zayıf noktasından geçerek bu noktaya geldiği, 2) boyanın fay hattı boyunca bu noktaya geldiği, 3) boyanın yukarıda belirtilen iki seçeneğin de etkili olduğu bir durumla bu noktaya geldiği şeklinde üç durumla açıklanmıştır.

Boya gözlenen diğer nokta ise G10Ms no'lu mansap kuyusudur. Bu noktaya boya 7.saatte ve R2Ms no'lu kuyuya göre çok düşük yoğunlukta gelmiştir (bk. Şekil 6b) (R2Ms no'lu kuyuda boya şiddeti binlerle ifade edilirken G10Ms no'lu kuyuda ise onlu değerlerle ifade edilmektedir). G10M no'lu memba kuyusuna boya gelmeden G10Ms no'lu mansap kuyusunda boya gözlenmesi G10Ms no'lu kuyuya gelen boyanın R2Ms no'lu kuyudan (mansap ile mansap arasındaki bağlantı ile) geldiği şeklinde yorumlanmıştır.

Boya gözlenen diğer bir piyezometre çifti ise G9 no'lu memba ve mansap kuyularıdır (G9M ve G9Ms no'lu kuyular). Boya ilk olarak memba kuyusuna sonra da mansap kuyusuna gelmiştir. Boya, G9 no'lu memba kuyusunda (G9M) 11.saatte G9 no'lu mansap kuyusunda (G9Ms) ise 12.saatte gözlenmiştir (bk. Şekil 6c). Boyanın bu noktalara oldukça geç zamanda ve düşük yoğunlukta gelişi bu piyezometre çiftleri arasında oldukça düşük de olsa bir su geçişine işaret etmektedir.

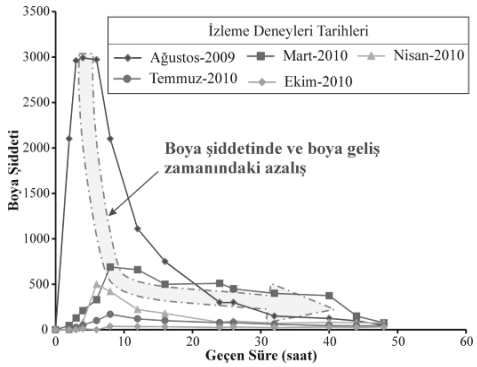
Bu hatta en geç boya gözlenen nokta ise O1M no'lu memba kuyusudur. Memba kuyusunda boya 21.saatte gözlenirken bu kuyunun mansabında yer alan piyezometre çifti olan O1Ms no'lu mansap kuyusunda ise tüm deney süresince boya gözlenmemiştir. Bu durum, memba ve mansapta yer alan piyezometre kuyu çiftleri arasında bir su geçişi (veya boya geçişi) olmadığına işaret etmektedir. Birinci hat için yukarıda bahsedilen boya geçişi gözlenen kuyuların dışındaki kuyularda herhangi bir boya değeri ölçülmemiştir. İrdelenmeye çalışılan boya geçiş zamanlarının, yerlerinin ve yoğunluklarının özet olarak gösterildiği şematik harita Şekil 7'de sunulmuştur.



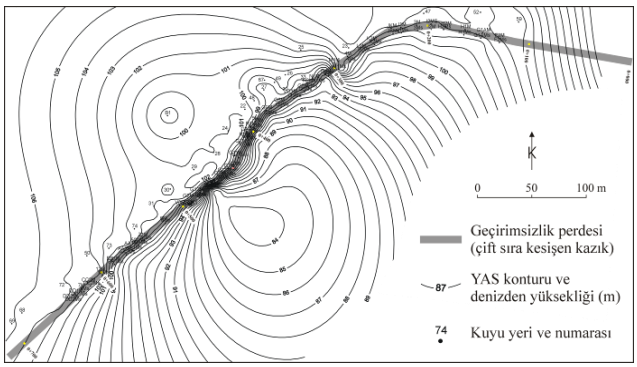
Şekil 7. İzleme deneyinde boya geçişi belirlenen noktalar.

Yukarıda örnek olarak açıklanmaya çalışılan 2.deneyin 1.kısmının (0+300.00-0+435.00) yaklaşık 135 m'lik bölümünü kapsayan boya izleme deneyi ve yorumlamaların benzerleri 810 m'lik geçirimsizlik perdesi boyunca değişik tarihlerde gerçekleştirilen diğer 7 adet izleme deneyi için de ayrı ayrı yapılarak geçirimsizlik perdesinde (kesişen kazık sisteminde) belirlenen zafiyet noktaları ortaya konulmaya çalışılmıştır. 810 m'lik geçirimsizlik perdesi boyunca gerçekleştirilen izleme deneyleri sonucunda zafiyet belirlenen noktalarda balkon yapısı (üçüncü sıra kazık), enjeksiyon vb. işlemlerle iyileştirmeler yapılmıştır. Bu iyileştirmeleri takiben bu noktalarda izleme deneyleri tekrarlanmış ve iyileştirmenin etkinliği incelenmiştir. İyileştirmesi yapılan noktalardan biri de yukarıdaki örnekte verilen R2Ms no'lu kuyunun bulunduğu noktadır. Bu kuyuda yapılan iyileştirme çalışmalarının ardından gerçekleştirilen boya izleme deneyi sonuçlarını gösteren grafik Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de anlaşacağı üzere; iyileştirme öncesi 3000 boya şiddeti gibi büyük bir değerde ve kısa sürede (2.saat) geçirimsizlik perdesini geçen boya iyileştirme işlemlerinden sonra ise hem boya şiddeti maksimum 35 boya şiddetine kadar düşmüş, hem de ilk boya geliş zamanı (6.saat) ötelenmiştir. Bu veriler bu noktada yapılan iyileştirme işlemlerinin oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Geçirimsizlik perdesinde yapılan tüm iyileştirmeler tamamlandıktan sonra 05.10.2010 tarihinde perdenin memba ve mansabında yer alan 62 piyezometre kuyu çiftinde (toplam 124 kuyuda) YAS seviyesi ölçülmüştür ve bu veriler kullanılarak YAS eş kontur haritası çizilmiştir (Şekil 9). Bu harita; YAS eş seviye eğrilerinin sıkılaşma yönünün veya başka bir değişle hidrolik eğimin (i) oldukça arttığı yerin geçirimsizlik perdesinin hemen yakını olduğunu göstermiştir. Geçirimsizlik perdesi çevresinde minimum, maksimum ve ortalama hidrolik eğim sırasıyla % 8, % 450 ve % 79'dur. Bu değerler oldukça yüksek hidrolik eğime işaret etmektedir. Bu durum özellikle geçirimsizlik perdesinin kuzeybatısında yer alan membaında yüksek YAS seviyesi ve perdenin güneydoğusunda yer alan mansabında ise düşük YAS seviyesi olduğunu göstermektedir. Bu da geçirimsizlik perdesinin YAS önünde bir bariyer oluşturduğunun yani işlevini yerine getirdiğine dair diğer bir çıkarımıdır.



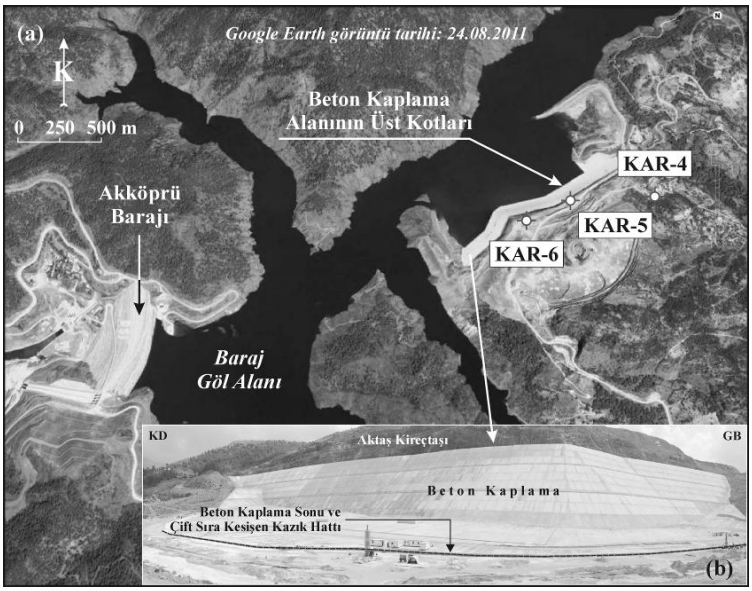
Şekil 8. R2Ms no'lu kuyunun bulunduğu noktada değişik tarihlerde gerçekleştirilen boya izleme deneylerine ait grafikler.



Şekil 9. Yeraltısuyu (YAS) eş kontur haritası.

6. SU TUTULDUKTAN SONRA KAPLAMA BÖLGESİNİN TEST EDİLMESİ

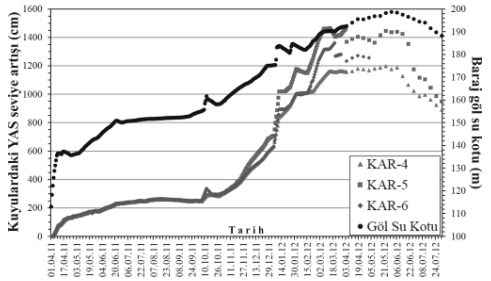
31.03.2011 tarihinde barajda su tutulduktan sonra ise kaplama bölgesinin (beton kaplama+geçirimsizlik perdesi) geçirimsizliğinin takibi için kaplamanın mansabında baraj gölü maksimum su kotu üzerinde olacak şekilde YAS gözlem kuyuları açılmıştır (Şekil 10a). Bu kuyularda, doğal şartlarda ölçülen YAS seviyeleri ile baraj su tuttuktan sonra ölçülen YAS seviyeleri karşılaştırılarak, geçirimsizlik yapılarının (beton kaplama+geçirimsizlik perdesi, (Şekil 10b)) etkinliği değerlendirilmiştir.



Şekil 10. a) Beton kaplama alanının mansabında, baraj gölü maksimum su kotu üzerinde açılan YAS gözlem kuyularının yerleri ve b) beton kaplama ve kesişen kazık hattı.

Yaklaşık 1.5 yıl ölçülen KAR-4, KAR-5 ve KAR-6 no'lu kuyulardaki YAS seviye değişimleri ile baraj göl suyu kot değişimleri karşılaştırma grafiği (Şekil 11)'ne göre: kuyulardaki YAS seviyesi ile baraj göl suyu kotu değerleri uyumlu değişmektedir. Baraj göl su kotu ile kuyulardaki YAS seviye artışı arasındaki ilişkinin korelasyon katsayısı (r) ortalaması 0.95 gibi oldukça yüksek bir değerdir ve bu değer kuyulardaki seviye artışının nedeninin baraj göl su kotundaki artışın olduğuna işaret etmektedir. Bu durum kaplama bölgesinden (baraj göl alanından) mansaba doğru bir su geçişinin olduğunu gösterse de Şekil 11'de açıkça görüldüğü gibi; baraj göl su kotundaki artış metrelerle ifade edilirken kuyulardaki YAS seviye artışları cm mertebesindedir. 488 gün süresince baraj göl su kotu

minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark ~86 m iken bu fark KAR-4 no'lu kuyu için 11.97 m, KAR-5 no'lu kuyu için 14.64 m, KAR-6 no'lu kuyu için ise 13.61 m ve ortalama olarak da ~13.5 m olmuştur. Eğer kaplama bölgesindeki imalatlar (beton kaplama+geçirimsizlik perdesi) işlevini yerine getirmemiş olsaydı baraj göl su kotu ile kuyular arası YAS akımı "U" borusu şeklinde olacak ve kuyularda göl su kotuna oldukça yakın seviyeler ölçülmesi gerekecekti ki bu durum alanda gözlenmemektedir. Baraj göl su kotunun maksimum (198.64 m) olduğu tarihte (30.05.2012) KAR-4 no'lu kuyudaki YAS seviyesi 29.35 m'dir ve aralarındaki su kotu farkı 169.29 m gibi oldukça büyük bir değerdir (Şekil 12). Bu durum da yine kaplama bölgesindeki imalatların (beton kaplama+geçirimsizlik perdesi) işlevini yerine getirdiğine bir işarettir.



Şekil 11. Baraj göl su kotu ile kuyulardaki YAS seviye değişimleri (göl su kotu m, kuyulardaki YAS seviye artışı ise cm'dir).

Şekil 12. Kaplama alanı ile KAR-4 no'lu kuyu arasındaki şematik YAS akımı.

7. SONUÇLAR

Barajda su tutulmadan önce kesişen kazık uygulamasıyla yapılan 810 m uzunluğundaki perdenin geçirimsizliği yaklaşık iki yıllık bir süreci kapsayan bir dizi izleme deneyleri ile test edilmiştir. Alanda gerçekleştirilen 8 adet YAS izleme deneyi sonucunda perdenin etkin olduğu belirlenmiştir. Barajda su tutulduktan sonra ise kaplama bölgesinin (beton kaplama+perde) geçirimsizliği; kaplama bölgesinin mansabında, baraj gölü maksimum su kotu üzerinde açılan kuyularda YAS kotu ve eş zamanlı ölçülen baraj göl su kotu değerleri karşılaştırılarak irdelenmiştir. Bu karşılaştırma; baraj göl su kotundaki yükselişe bağlı olarak, KAR-4, KAR-5 ve KAR-6 no'lu gözlem kuyularında YAS seviyelerinde de bir artışın olduğunu görülmektedir. Baraj göl su kotu maksimum (198.64 m) olduğu tarihte (30.05.2012) KAR-4 no'lu kuyudaki YAS seviyesi 29.35 m ölçülmüş olup, doğal şartlarda ortalama 15.85 m olarak belirlenen YAS kotuna göre 13.50 m'lik bir artış söz konusu olmuştur. Baraj göl su kotu düşmeye başladığında ise kuyulardaki YAS seviyelerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, kaplama bölgesindeki kesişen kazık perdesinden tamamen etkinliği sağlayamadığından az da olsa bir su geçişinin olduğunu veya kireçtaşları ile temas eden jeolojik birimlerin hidrolik yük altında çatlak ve kırık sistemlerinin kireçtaşına doğru YAS iletiminden kaynaklanabilir. Baraj göl su kotundaki artış metrelerle ifade edilirken buna mukabil kuyulardaki YAS seviye artışları cm mertebesindedir. Baraj göl su kotunun maksimum (198.64 m) olduğu tarihte (30.05.2012) KAR-4 no'lu kuyudaki YAS seviyesi 29.35 m'dir ve aralarındaki su kotu farkı 169.29 m gibi oldukça büyük bir değerdir ki bu durum da yine kaplama bölgesindeki imalatların (beton kaplama+perde) işlevini yerine getirdiğine bir işarettir.

8. KAYNAKLAR

Doğdu, M.Ş., Yiğitler, O., Sağnak, C., 2009. Dalaman-Akköprü barajı Aktaş kireçtaşları kaplama alanında km 0+280 - km 0+560 arasında gerçekleştirilen boya izleme deneyleri sonuç raporu. DSİ Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Kütüphanesi, Kütüphane Arşiv No: MR-74, Ankara.

Şekercioğlu, E. 1989. Muğla-Dalaman Çayı Aşağı Havzası Akköprü barajı ve çevresinin jeoteknik incelemesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Vezirköprü Barajında (Samsun) Su Kaçağının Tespiti ve İyileştirme Çalışmaları

Determination of Water Leakages and Improvement Works at Vezirköprü Dam (Samsun)

M. Çalışkan[1], A. Koçbay[2,*], Y. Şentürk[2], O. Karadağ[1]

[1]*DSİ 7.Bölge Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Şube Müdürlüğü-Samsun*
[2]*DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı-Ankara*
*(*akocbay@dsi.gov.tr)*

ÖZ: Samsun ili Vezirköprü ilçesi sınırları içerisinde yer alan Vezirköprü Barajı, kil çekirdekli kaya dolgu tipinde olup sulama amaçlıdır. 1993 yılında yapımına başlanmış, 2005 yılında tamamlanarak barajda su tutulmuştur. Baraj gölünde 28 m yüksekliğinde bir su kütlesinin depolanmasından sonra, baraj gövdesinin mansabında sol sahilde, yamaçtan su gelişi olmuştur. Daha sonra baraj gövdesi mansap topuk bölgesinden de su gelişinin olduğu görülmüştür. Su kaçağının meydana geliş şekli ve yerinin araştırılması baraj emniyeti ve kaçağın önlenmesi açısından önemli olduğundan baraj yerindeki kaya birimlerinin konumları ve yapısal özellikleri temel sondajlarla, jeofizik yöntemlerle araştırılmıştır. Yapılan jeoteknik çalışmalar ve izleme deneyleri sonucunda, sol sahildeki volkanik kayaçlarda yeraltısuyu taşıyan-ileten akım rejimi ile dolaşımı birbirinden farklı olan iki ayrı sistemin varlığı ortaya konmuştur. Bunun üzerine su kaçaklarının önlenmesi için enjeksiyon perdesi oluşturulması yöntemi seçilmiş, enjeksiyon perdesinin boyutlandırılması için baraj ekseni boyunca, sol sahilde araştırma sondajları açılmıştır. Açılan 250 m uzunluğundaki galeriden 40-85 m arasında değişen derinlikte toplam 25.359 m ilave enjeksiyon sondajı yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında 11.893 ton katı madde kullanılmış ve mansaptan çıkan suların kesilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon Perdesi, İzleme Deneyi, Barajlarda Su Kaçakları, Vezirköprü Barajı

ABSTRACT: *Vezirköprü Dam is within the vicinity of Vezirköprü district of Samsun and the type is rock fill with center clay core aiming irrigation. Its construction began in 1993 and completedin 2005 followed by impoundment. After reaching to a level of 28 m in the reservoir, water leakage occurred on the left bankat the downstream of dam. Later it was observed that there existed another leakage on downstream toe section. Investigation of the place and the way of occurrence of water leakage is important for the security of dam and preventing it. Whereupon the positions and structural characteristics of rock units on dam site is searched thoroughly with basic borings and geophysical methods is introduced. As a result of geotechnical studies and dye tracing experiments it is stated that there are two different systems consisting of carrying-transmitting flow regime and circulation regime on volcanic rocks on the left bank upon this for preventing water leakage it is decided to form a grout curtain and in order to make sure of the dimension investigation holes are drilled along the dam axis. Drilled a total depth varying from40-85m from the gallery at250 m25 359mdrilladditional injections were made.In this study,11893tonnes of solid material used to prevent water leakage.*

Keywords: *Grout Curtain, Dye Tracing Experiment, Water Leakages at Dams, Vezirköprü Dam*

1. GİRİŞ

Vezirköprü Barajı Samsun ili Vezirköprü ilçesi sınırları içerisinde, İstavroz çayı üzerindedir. Kil çekirdekli kaya dolgu tipinde inşa edilen baraj 11.000 hektarlık bir tarım alanını sulayacaktır (Çizelge1). Barajın yapımına 1993 yılında başlanmış ve 2005 yılında tamamlanmıştır. 22.09.2005 tarihinde su tutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Barajda su depolanmaya başlamasından sonra, 26.11.2005 tarihinde göl su kotu 537,00 m'ye ulaştığında baraj gövde mansap bölümü sol sahilde, 530,00 m kotlarında ve gövdeye 80 m mesafede, ana kayadan 130 l/s'lik debide bir su kaçağının oluştuğu görülmüştür. Baraj göl su kotunun yükselişine bağlı olarak sol sahil yamaçtaki kaçan su miktarında artış olmuş, göl su kotu 548,50 m kotuna ulaştığında baraj gövde mansap

topuğundan, mansap topuk duvarı boyunca ek su gelişlerinin olduğu gözlenmiştir. Baraj göl su seviyesi 554,30 m kotuna geldiğinde toplam kaçan su miktarı 942 l/s'ye ulaşmıştır. Vezirköprü Barajında meydana gelen su kaçaklarının oluşum şeklini, yerini, hızını ve yönünü belirlemek amacıyla etüt çalışmalarına başlanılmış ve elde edilen sonuçlardan sonra su kaçağının önlenmesine yönelik çalışmalara başlanılmıştır. Sunulan çalışmada, Vezirköprü Barajında meydana gelen su kaçağının önlenmesine yönelik yapılan araştırma ve iyileştirme çalışmaları anlatılmıştır.

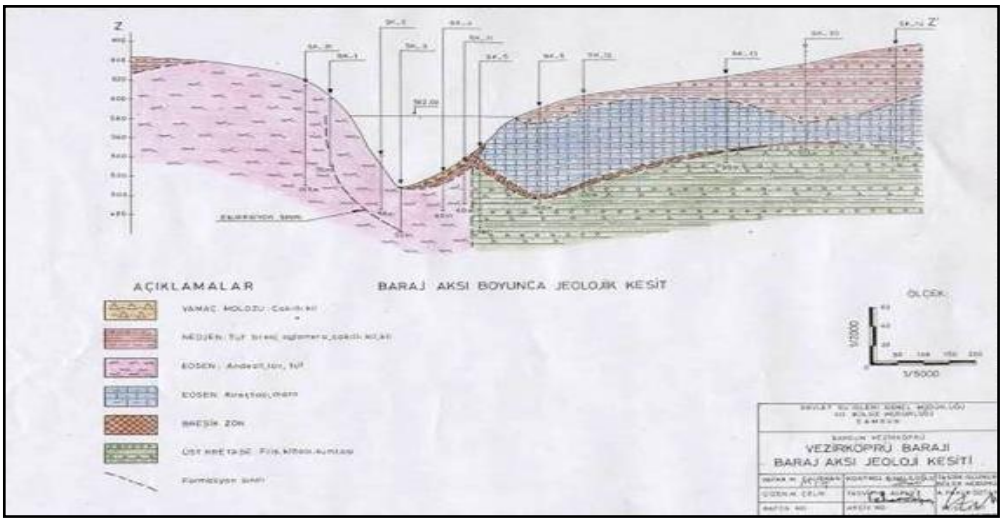
Çizelge1. Proje Özellikleri

Yeri	Vezirköprü ilçesi, İstavroz çayı üzerinde
Amacı	Sulama
Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu
Kret kotu	582,00 m
Kret uzunluğu	321 m
Yüksekliği (talvegden)	73 m
(temelden)	75 m
Toplam dolgu hacmi	2,050 hm^3
Derivasyon tüneli	2,90 m iç çapında at nalı kesitli
Derivasyon tüneli uzunluğu ve yeri	572,67 m uzunluğunda ve sol sahilde
Derivasyon kapasitesi	64 m^3/s
Dolusavak tipi ve yeri	K arşıdan alışlı-serbest ve sağ sahilde
Dolusavak kapasitesi	888 m^3/s
Yıllık ortalama su	79,10 hm^3
Maksimum su seviyesi	580,15 m
Toplam göl hacmi	59,58 hm^3

2. MÜHENDİSLİK JEOLOJİSİ

2.1. Baraj Yeri Jeolojisi

Baraj yerinde sol sahilde Eosen yaşlı andezit-lav yer almaktadır. Sağ yaka yamaçta Eosen yaşlı kumlu kireçtaşları ve onların üzerinde Neojen yaşlı tüf-tüf breşi, çakıllı kil, kil, siltli kumlu çakıl–blok görülmektedir. Andezitler, gri-kahverengi, 5-10 cm aralı eklemli, yüzeyde ayrışmalıdır. İstavroz Çayı yatağında 1,5 m kalınlığında alüvyon, sağ yaka düzlüğünde çakıllı kil özelliğinde yamaç molozu ve onun altında eski dere yatağında 9 m kalınlığında alüvyon bulunmaktadır (Balkaya, 1992). Barajın hemen mansabında yapı yerlerinin dışında Üst Jura – Alt Kretase yaşlı kireçtaşları yer almaktadır.Sağ yaka yamaçta üstte görülen Neojen tüf-tüf breşi, çakıllı kil-kil, siltli kumlu çakıl-blok birimleri, sarı-kırmızımsı-beyazımsı renkte, gevşek ve ayrışmalıdır. Bu birimin altında yer alan Eosen yaşlı kumlu kireçtaşları sarımsı-kırmızımsı renkte, 5-15 cm kalınlıkta tabakalı, yer yer erime boşluklu, sert ve kırılgandır. KB-GD doğrultu ve ortalama 30^0KDeğimlidirler. Kireçtaşlarının taban kısmında 2-10 m arasında kalınlık gösteren kendi taban konglomerası bulunmaktadır. Bunun altında ise Üst Kretase yaşlı kiltaşı-kumtaşları yer alır. Taban konglomerası, alttaki seri üzerinde hareket geçirmiş olması dolayısıyla breşik, kayma izli ve killeşmelidir. Kiltaşı ve kumtaşları geçirimsizdir (Şekil 1).



Şekil 1. Baraj aksı jeoloji kesiti

2.2. Göl Alanı Jeolojisi

Baraj gölalanı tamamında Neojen tüf-tüf breşi, çakıllı kil-kil, marn, killi silt, siltli kumlu çakıl- blok birimleri yer almaktadır. Baraj ekseni yakınında, sağ yaka akış yukarısında yüzeyde Eosen yaşlı kumlu kireçtaşları görülmektedir. Bu kısımda yapılan temel sondaj kuyuları, jeofizik (rezistivite) çalışmaları sonuçlarına göre kumlu kireçtaşlarının, Neojen örtü altında da doğuya ve mansapla bağlantılı olarak devam ettiği anlaşılmıştır. İstavroz Çayı boyunca alüvyon az siltli bloklu kum-çakıl özelliğindedir.

2.3. Yapısal Jeoloji ve Deprem Durumu

Bölge her üç zamanda orojenik hareketlerden etkilenmiştir. Bölgede Alpin Orojenezi etkisini sürdürmüştür. Özellikle Pirene Safhası şiddetli geçmiştir. Kuzey Anadolu Fayının Kargı – Kamil – Havza hattı boyunca uzanan bölümü baraj aksından 3.5 km güneyde baraj gölünden geçmektedir. Fayın doğrultu atımlı, sağ yönlü ve sismik olarak aktif olduğu bilinmektedir(Balkaya, 1992). Vezirköprü güneyi ile Havza arasında fay zonunun genişliği 10 km veya daha fazladır. Fayın doğu devamında Havza ilçesinde sıcak su çıkışları vardır. Kuzey Anadolu Fay hattı boyunca bu güne kadar olmuş depremlerin en şiddetlileri, 1939 Erzincan(M=7.9), 1942 Erbaa(M=7.3), 1943 Ladik(M=7.6) ve 1992 Erzincan(M=6.8) depremleridir. Bu depremler Havza civarında çok yoğun hissedilmiştir. Proje alanı Bayındırlık ve İskan Bakanlığının Türkiye deprem bölgeleri haritasına göre 1. Derece Deprem Bölgesi içerisindedir.

2.4. Baraj Yerinde Yapılan Enjeksiyonlar

Baraj Gövde Enjeksiyonları: 2 sıra kapak, 1 sıra perde enjeksiyonu olarak projelendirilen gövde enjeksiyonlarında toplam 30.700 m'lik sondaj açılmış ve 14.419 m^3'lük enjeksiyon malzemesi enjekte edilmiştir. Perde kuyu aralığı 2 m ve kuyu derinliği genel olarak 40-70 m arasında değişmektedir. Sol sahildeki perde enjeksiyon kuyularının delinmesi sırasında yer yer devridaim suyunun kaçtığı ve enjeksiyon sırasında bazı kademelerde 50 tona ulaşan yüksek enjeksiyon miktarlarına ulaşıldığı görülmüştür. Bunun üzerine ana perdeyi takviye etmek amacıyla, sol sahilde perde sırasının memba ve mansabında ilave iki sıra daha perde enjeksiyonları yapılmıştır. Ayrıca sol yamaca doğru, perdenin bitiminden itibaren yelpaze şeklinde ilave perde enjeksiyon delikleri açılarak enjekte edilmiştir.

Barajın sağ sahilinde yer alan kumlu kireçtaşlarının karstik özellikte olması nedeniyle, baraj yapımı sırasında kil blanketle kaplanmıştır (Foto 1). Bu amaçla baraj yerinde 528,50 m kotu ile 580,15 m kotu arasında 104.000 m^2'lik alanda kalınlığı 4,00-1,50 m arasında değişen bir kil blanket oluşturulmuştur. Kil blanketin yüzeyi aşınmalara karşı korumak amacıyla filtre ve kaya malzeme ile kaplanmıştır.

Derivasyon Tüneli Enjeksiyonları: Tünelde beton kaplama işleri tamamlandıktan sonra ilkönce beton kaplama içerisine yerleştirilen 3″, 3 m aralıklı şaşırtmalı ve her kesitte 4 adet olan borulardan ana kayada 15 cm'lik delik açılarak kontak enjeksiyonları yapılmıştır. 1336 ton katı madde kullanılmıştır. Alış 3 m^3/m tul'dür.

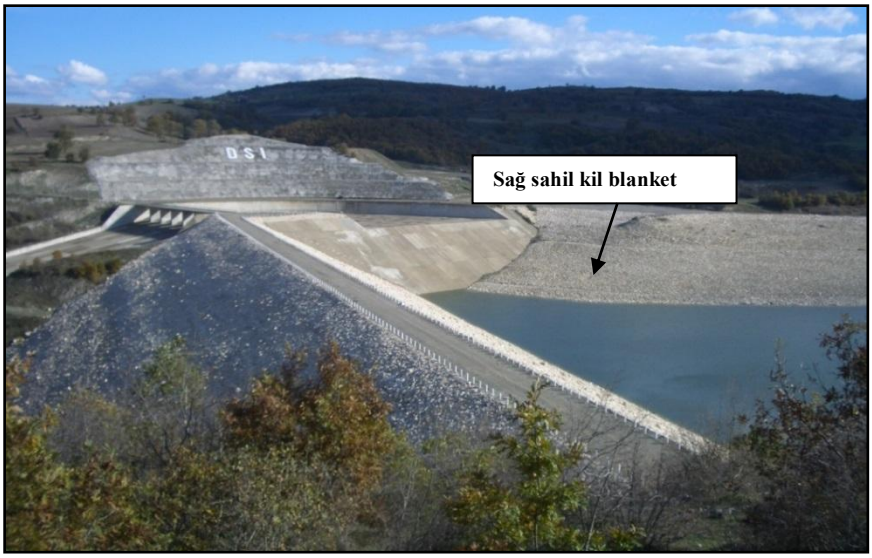


Foto 1. Vezirköprü barajı genel görünüşü

3. BARAJDA SU KAÇAĞININ OLUŞUMU

Barajda su tutma işleminin yapıldığı tarihten iki ay kadar sonra, 26.11.2005 'de göl su seviyesi 537,00 m kotunda iken diğer bir deyişle göl alanında 28 m yüksekliğinde bir su kütlesi oluştuğunda, mansap sol sahil yamacında,anakayadan su gelişi olmuştur. İlk su kaçağının debisi 133 l/s olarak ölçülmüştür. Baraj göl su kotu 548,32 m seviyelerine ulaştığında; baraj gövdesi mansap topuğundan da su gelişinin olduğu gözlenmiştir. Yamaçtan ve topuktan gelen suların debileri, haftada üçkez olmak üzere ölçülmüştür. Göldeki su kotunun artışına bağlı olarak kaçak su miktarı da artış göstermiştir (Foto 2).

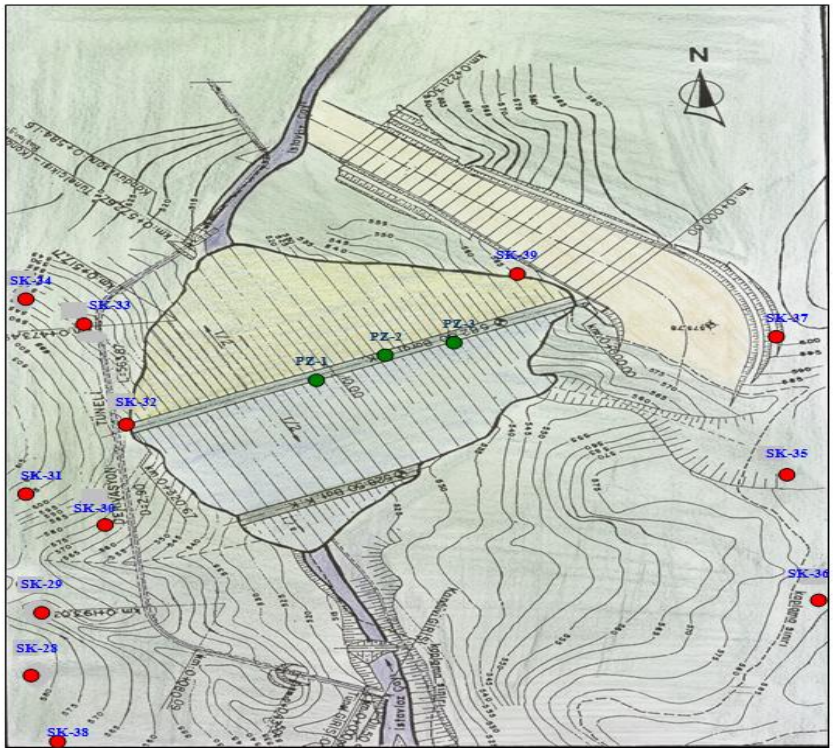
Foto 2. Yamaç ve mansap kaya dolgusu topuğundaki su gelişi

4. SU KAÇAĞININ TESPİTİ İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

Su kaçağının tespitine yönelik olarak temel araştırma sondaj kuyularının açılması, boya izleme deneyi, su kimyası ve jeofizik çalışması yapılmasına karar verilmiş olup yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

4.1. Temel Sondajların Açılması

Su kaçağının tespitine yönelik olarak temel araştırma sondaj kuyularının açılması; yamaçtan kaçan ve topuktan gelen su ile birlikte toplam debi olarak iki noktada ve haftada üç defa ölçüm yapılması ve su örnekleri alınarak laboratuvarda analizlerinin yapılması kararlaştırılmıştır. Hazırlanan ilave temel sondaj talimatı doğrultusunda 18.03.2006 tarihinde sol sahilde sondaj çalışmalarına başlanmış 12 adet temel araştırma sondaj kuyusu açılmıştır (Şekil 2.



Şekil 2. Temel sondaj kuyu yerleri

4.2. Jeofizik Çalışmalar

Jeofizik (Düşey Elektrik Sondajı) Çalışmaları: Bölge Jeoteknik Hizmetler ve YAS Şube Müdürlüğü elemanlarınca, sol sahilde jeofizik çalışmaları yapılmış, aşırı kırıklı andezit biriminin konumu araştırılmıştır.Yapılan jeofizik etüt çalışması ile;

1- İnceleme alanında Neojen yaşlı seriler, Eosen yaşlı volkanikler ile Jura Kretase yaşlı kireçtaşlarının yer aldığı,

2- Eosen yaşlı volkaniklerin üst seviyeleri çok fazla kırıklı çatlaklı ve ayrışmalı andezit, tarakiandezit seviyelerinden, daha alt kısımları ise masif ve az kırıklı çatlaklı bazalt seviyelerinden oluştuğu, Jura Kretase yaşlı kireçtaşlarının Eosen volkanikler içinde yer aldığı,

3- Rezistivite değerlerinin olması gerekenden ortalama 15-20 kat daha düşük olmasının nedeninin çok kırıklı andezit birimi içerisinde akış halinde olan sudan kaynaklandığı tahmin edilmiştir.

Jeofizik Tomografi Çalışması: Bu çalışma ile 6 hat boyunca 40, 80, 120 m derinliklere inilecek şekilde toplam 4116 noktada elektriki özdirenç ölçüsü alınarak, jeolojik yapının düşey ve yatay yöndeki değişimleri aydınlatılmaya çalışılmıştır (Aksu, 2006). Kesitlerin incelenmesi sonucunda Neojenin, volkaniklerin ve gömülü kireçtaşlarının düşey değişimleri ve kontakları ortaya konularak, gövdede kil çekirdek ve kontağından su kaçağının olmadığı, volkanikler içerisindeki düşük rezistivitelerin su geçen yerleri, yüksek rezistivitelerin ise kırık çatlaklı andezit ve bazaltları işaret ettiği anlaşılmıştır.

4.3.Boya İzleme Deneyi Çalışmaları

Göl Alanında Boya Deneyi: 08.05.2006 tarihinde, gölün gövdeye yakın, orta bölümünden belirli derinliklerde kademeler halinde, 12,5 kg boya (Fluoroscein) sulandırılarak göl suyuna pompa ile basılmıştır (Foto 3). Boya verme işlemi tamamlandıktan 2 saat sonra su kaçağı olan yerlerden ve sol sahilde açılmış temel sondaj kuyularından su numuneleri alınarak boya izi araştırılmıştır. Bu örnek alma işlemi ve test işlemi belirli periyotlar halinde devam ettirilmiştir. Ancak alınan numunelerde su kaçaklarına ışık tutacak bir bilgi elde edilememiştir. Zira ilk defa böyle büyük bir hacimde boya deneyinin yapılmış olması ve gölde yeterli boya konsantrasyonunun sağlanamamış olması gibi etkenler istenen sonucu alınamamasında etkili olmuştur. Bu nedenle temel sondajlarından boya deneyi yapılmasına karar verilmiştir.

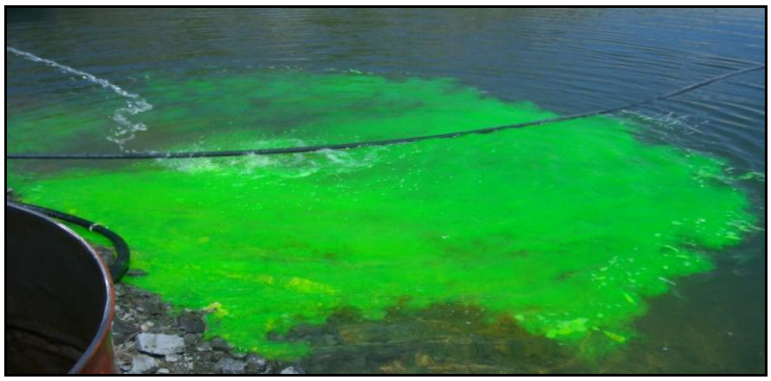
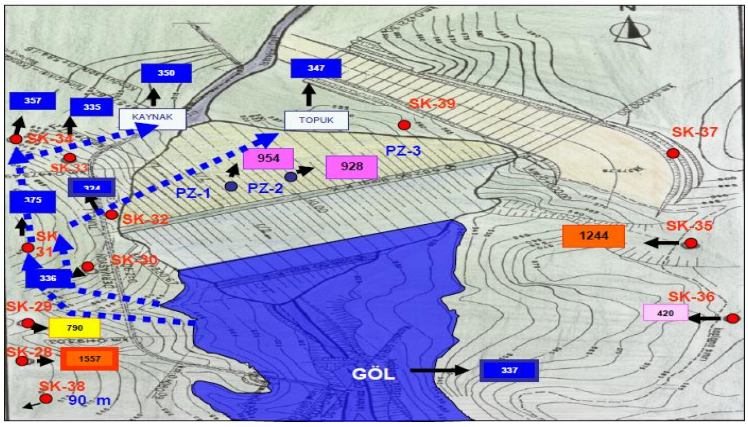


Foto 3. Göl alanına boya verilişi

Temel Sondaj Kuyularında Boya Deneyi: Temel sondaj kuyularında boya deneyi çalışmalarına 14.11.2006 tarihinde başlanılmış ve SK 30, SK-31, SK-32 ile SK-37 nolu kuyulardan Fluoroscein verilmiştir. Daha sonra kuyulardan, ve yüzeyden su çıkan bölgelerden örneklemeler yapılarak suyun hareket yönünün sol sahilden gövde dışından olduğu anlaşılmıştır (Akdeniz vd., 2007).

4.4. Su Kimyası Çalışması

Baraj göl suyu, yamaçtan ve topuktan gelen kaçak suları ile açılan temel sondaj kuyu sularının kalitelerinin belirlenmesi amacıyla, su noktalarından periyodik olarak su numuneleri alınmış ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Su noktalarında anyon katyon, askıda katı madde ve çözünmüş katı madde analizleri yapılmıştır. SK-28, SK-29, SK-35, PZ-1, PZ-2 ve PZ-3 numaralı kuyu sularının baraj göl suyu ile diğer temel sondaj kuyularındaki sulardan farklı özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Yukarda isimleri verilen temel sondaj ve piyezometre kuyularından alınan su numunelerinin EC değerleri ile Ca, Mg, SO_4 iyon değerlerinin yüksek, pH değerlerinin ise düşük olduğu görülmüştür.
Yapılan tüm çalışmalar sonrasında suyun iki farklı yol izlediği (Şekil 3) belirlenerek iyileştirme çalışmalarına geçilmesine karar verilmiştir.



Şekil 3. Su kaçaklarının izlediği yol

5. SU KAÇAĞININ ÖNLENMESİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Vezirköprü Barajında ki su kaçağının sol sahilde yer alan andezit biriminin içerisinden olduğunun anlaşılması üzerine, su kaçağının önlenmesinde enjeksiyon yöntemi benimsenmiş ve mevcut enjeksiyon perdesinin sol sahilde devam ettirilerek tüf-tüf breşi, çakıllı kil-kil, marndan oluşan geçirimsiz-az geçirimli Neojen yaşlı birimlere bağlanması öngörülmüştür. Enjeksiyon güzergahının belirlenebilmesi ve boyutlandırılabilmesi için sol sahilde baraj ekseni doğrultusunda 5 adet sondaj kuyusu açılarak her birinde basınçlı su tecrübesi yapılmış kuyu logları hazırlanmış ve jeolojik kesiti çıkarılmıştır.Su kaçaklarının önlenmesine yönelik yapılan çalışmalar kapsamında sol sahilin jeolojik haritası hazırlanmış, açılan sondajlarda yapılan basınçlı su deneylerinden yararlanarak sol sahilin geçirimlilik kesiti çıkarılmıştır. Kırıklı çatlaklı andezit biriminin, geçirimsiz Neojen birimleriyle olan sınırı belirlenmiştir. Bütün bu veriler doğrultusunda sol sahilde uygulanacak ilave perde enjeksiyonunun proje ve talimatı hazırlanarak 2008 yılı içerisinde ihale edilmiş ve geçen süre içerisinde enjeksiyonun yapılacağı galeri açılarak, enjeksiyon çalışmalarına hazır hale getirilmiştir. 20.10.2009 tarihinde enjeksiyon delgi çalışmalarına başlanmıştır. Aşağıda, proje ve yapılan çalışmalar hakkında özet bilgiler verilmiştir.

5.1. Enjeksiyon Galerisi

300 m uzunluğunda, modifiye at nalı şeklinde açılmıştır (Foto 4). Kazı sonrası iksa, tel kafesi ve püskürtme betonu ile desteklenmiştir. Kazı tamamlandıktan sonra beton kaplama yapılmıştır. Tünel çapı 3,5 m'dir. 582 m kotunda galeri ekseni ile baraj ekseni arasında membaa ya doğru 10 derecelik açı olacak şekilde inşa edilmiştir.

Foto 4. Açılan enjeksiyon galerisi giriş ve tünel aynasından görünümler

5.2. İlave Perde Enjeksiyonu

Yapılan araştırma sondajlarından elde edilen bilgiler ışığında sol sahilde açılan enjeksiyon galerisi içerisinde, girişten itibaren ilk 200 m'lik bölümde 85 m derinliğinde, 3m aralıklı 24 m'lik anolar şeklinde aşağıdan yukarı doğru 5 m'lik kademeler halinde enjeksiyon yapılması planlanmıştır. Km:0+200 ile Km:0+250 arasında ise geçirimlilik değeri 3-5 Lugeon arasında olup delik derinliği 40 m olarak belirlenmiştir. Projeye göre 3 m aralıklı, derinlikleri 85 ve 40 m olarak planlanan toplam 7051 m'lik enjeksiyon delgisi tamamlanmış, toplam 7.756.721 kg katı madde sarfiyatı olmuş ve ortalama alış 1.100 kg/m olarak gerçekleşmiştir. Ancak çok alış yapan kuyuların arasına ara kuyuları verilmiş ve bu kuyuların delgi ve enjeksiyonları bitirilmiştir. Toplam 53 adet 1.5 m aralıklı ilave kuyular verilmiştir. Bu kuyuların toplam delgi miktarı 3591 m olup toplam katı madde alış miktarı da 970.356 kg olmuştur. Ortalama alış 270 kg/m mertebesindedir.

Bazı ilave kuyulardaki alışların yüksek olması nedeniyle 75 cm aralıklı kuyuların açtırılması kararlaştırılmıştır. Bu aşamada da 2.545 m delgi açılmış ve toplam 726.739 kg katı madde enjekte edilmiştir. 52 adet olan bu kuyulardaki ortalama alış miktarı da 286 kg/m olmuştur. Daha sonra anolardaki geçirimsizliğin testi için karotlu ve karotsuz 26 adet kontrol kuyusu açtırılmıştır. Bu kuyularda basınçlı su tecrübesi deneyleri yaptırılmış ve geçirimlilik değerleri incelenmiştir. Buna göre Lugeon değerlerinin genel olarak 1'den düşük çıktığı bazı bölümlerde ise 1-3 Lugeon arasında yer aldığı tespit edilmiştir. Kontrol kuyuları içinde toplam 1857 m delgi açılmış ve 294.374 kg katı madde sarf edilmiştir. Ortalama alış 159 kg/m'dir. Enjeksiyon çalışmalarının bu aşamada yeterli olabileceği düşünülerek çalışmalara ara verilmiştir. Barajda tekrar su tutulmaya başlanmıştır.

5.3. İyileştirme Sonrası Göl Su Seviyesi ve Su Kaçağı Miktarları

Göl su kotu 537 m seviyelerinde olduğunda, kaynaktan gelen su miktarı 2 l/s mertebesinde iken göl su kotu 549,30 m kotuna çıktığında kaynaktan gelen su miktarı 11 l/s'ye yükselmiştir. Topuk duvarı üzerinden taşan su görülmemektedir ancak topuk mansabında yüzeyde ki sular toplanarak bir boruya alınmıştır. Debisinin de 2 l/s olduğu görülmüştür. Göl su seviyesi 17.09.2010 tarihinde 545,32 m seviyesine düştüğünde kaynaktan gelen su 4,2 l/s olarak ölçülmüştür. Tekrar göl su seviyesi arttığında kaynaktan gelen ve topuk çevresinde görülen suların arttığı görülmüştür. 20.12.2010 tarihinde göl su seviyesi 556 m kotuna yükselmiş ve kaynaktan gelen suyun debisi de 18 l/s olmuştur. Göldeki su seviyesinin artmasına bağlı olarak kaçak su miktarında artış olması; enjeksiyon alışlarının yüksek olduğu ilk 5 anoda ilave eğimli kuyularla bir iyileştirme yapılmasının uygun olacağı kararının verilmesinde etken olmuştur. 04.03. 2011 tarihinde göl su seviyesi 570,50 m seviyesine ulaşmıştır. Kaynaktan gelen su miktarı da 52 l/s'dir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

- Sol sahil ilave perde enjeksiyonu çalışmalarında toplam 25359 m delgi açılmış ve 11893 ton katı madde sarf edilmiş, ortalama alış 469 kg/m olmuştur.

- Yapılan enjeksiyon çalışmaları sonucunda göl su kotu maksimumda iken kaynaktan 12 l/s ve topuk çevresinden 70 l/s civarında su gelişi olduğu görülmüştür. Yapılan gözlemlerde bu debilerin sabitlendiği ve enjeksiyon çalışmalarında istenilen başarıya ulaşıldığı tespit edilmiştir.

- Tüm yapılarda jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik çalışmaların ne kadar önemli olduğu bilinen bir gerçektir. Ancak özellikle su yapılarında, bu durum çok daha büyük önem kazanmaktadır. Gerek etüt ve proje, gerekse uygulama aşamalarında yapılan jeoteknik çalışmaların eksik veya yanlış yapılması, telafisi mümkün olmayan zararlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, projenin yapılabilirliğini doğrudan etkileyen bu çalışmaların, son derece özenli, yeterli zaman aralığında, bilimsel verilere dayalı olarak ve titizlikle yürütülmesi gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

Akdeniz, U., Süral, U., 2007.Vezirköprü Barajı izleme deneyi raporu, DSİ, Ankara.

Aksu, T. F., 2006. DSİ VII Bölge Müdürlüğü Vezirköprü Barajı özdirenç tomografi etüt raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Balkaya, M., 1992.Samsun Vezirköprü projesi, Vezirköprü Barajı ve Sulaması Mühendislik Jeolojisi Planlama Raporu, DSİ, Samsun.

Pınarbaşı Karst Kaynağı ve Çevresinin (Honaz-Denizli) Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal İncelemesi

Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigation of Pınarbaşı Karst Spring and its Surrounding (Honaz-Denizli)

A. Gökgöz[1,*], Ö. Demirel[1], İ. Asal[1]

[1] *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Denizli (*agokgoz@pau.edu.tr)*

ÖZ: Pınarbaşı karst kaynağı Honaz ilçesinin (Denizli) 2 km batısında yer alır. Honaz Dağı'nın kuzey eteğinde, Mesozoyik yaşlı kireçtaşından boşalan kaynağın debisi 1 m^3/s'den fazladır. Kaynak boşalımının analizi, Pınarbaşı kaynağının geldiği karstik akifer için, su tablasının yanal kesitinin büyük, hidrolik iletkenlik katsayısının düşük-orta, etkin gözenekliğin yüksek ve hazne kayada bulunan su hacminin fazla olduğunu; aynı zamanda kaynak boşalımının tabaka, kırık ve çatlaklar yoluyla gerçekleştiğini göstermektedir. Pınarbaşı kaynağının sıcaklığı 18,7°C, elektriksel iletkenliği (EC) 693 µS/cm ve pH değeri 7,12'dir. Kaynak Ca-Mg-HCO_3-SO_4 tipindedir. Suyu, yüksek As değeri nedeniyle içilemez özelliktedir. Civardaki sondaj sularından sıcaklığı 24°C olan kuyu suyunda gözlenen nispeten yüksek iletkenlik, Na, K, Li, As, B, NH_4, SiO_2 değerleri ve H_2S gazının varlığı bir jeotermal sistemin varlığına ve soğuk yeraltısularının jeotermal akışkan ile karışımına işaret eder. Kimyasal jeotermometreler 33-84°C arasında değişen rezervuar sıcaklıkları vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Denizli, Honaz, Karst Kaynağı, Hidrojeoloji, Jeotermal

ABSTRACT: *Pınarbaşı karst spring is located 2 km to the west of Honaz district (Denizli). Discharge of the spring, which issues from limestone, is more than 1 m^3/sec. Spring flow analysis revealed that the lateral extension of groundwater table at the karstic aquifer is large, the hydraulic conductivity coefficient is low to moderately high, the effective porosity is high, and large volumes of water is stored in reservoir rock. In addition to that, groundwater flow occurs through the bedding planes, cracks, faults and joints. Temperature, electrical conductivity (EC) and pH values of the spring are 18.7°C, 693 µS/cm and 7.12, respectively. The spring hydrochemically is of type of Ca-Mg-HCO_3-SO_4. The spring water is undrinkable due to high As concentration. In one of the wells, the groundwater has temperature of* 24°C *in the area. The existence of high conductivity, and high values of Na, K, Li, As, B, NH_4, SiO_2, and H_2S gas in the well water indicate existence of geothermal system and mixing of spring water with the geothermal fluid. Chemical geothermometers gave the reservoir temperatures varying between 33-84°C.*

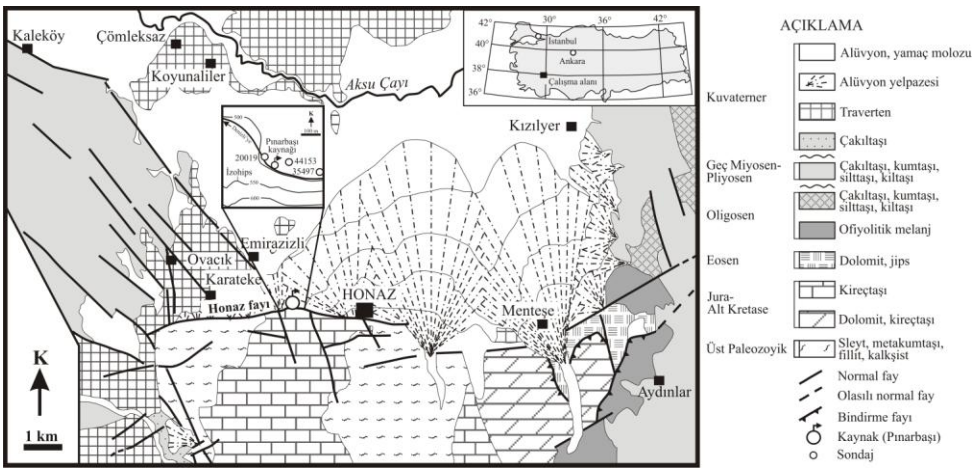
Keywords: *Denizli, Honaz, Karst Spring, Hydrogeology, Geothermal*

1. GİRİŞ

İçme, kullanma ve sulama suyu ihtiyacının giderek arttığı ülkemizde karstik su kaynakları önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak, karstik suların bir bölümünün içmeye uygun olmaması, karst akiferlerin gözenek akiferlerine göre kirlenmeye daha açık ve kirlilik taşınımının hızlı olması gibi nedenler bu kaynaklardan verimli ve sürdürülebilir yararlanmayı sınırlayan faktörlerdir. Su kaynakları kısıtlı olan ülkemizde su kaynaklarının hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal yönden araştırılması, bu kaynaklardan optimum yararlanma için büyük önem taşımaktadır. İnceleme alanı Honaz (Denizli) ilçesinin 2 km batısında yer alan Pınarbaşı karstik kaynağı ve civarını kapsar. Kaynağın ve civardaki sondajların suyu sulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada Pınarbaşı kaynağının gerçek rejimdeki hidrodinamik özelliklerinin ortaya konması, Pınarbaşı kaynağı ve civarındaki sondaj sularının hidrojeokimyasal açıdan incelenmesi ve sahanın jeotermal enerji olanaklarına bir yaklaşım sağlanması amaçlanmıştır. Bu çalışma ile Denizli il merkezine yakın olan bu yüksek debili kaynağın içme suyu olarak kullanılabilirliği ve sahanın jeotermal açıdan geliştirilebilirliği incelenerek bu konuların gündeme alınarak tartışmaya açılması hedeflenmiştir.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanının temelinde Okay (1989) tarafından "Honaz şeyli" olarak adlandırılan ve çok kırıklı kumtaşı, şeyl, fillit ve kalkşist ardalanmasından oluşan Üst Paleozoyik yaşlı (Çağlayan vd. 1980) metasedimentler bulunur (Şekil 1). Bloklu, kısmen serpantinleşmiş, yer yer silisleşmiş harzburjitlerden oluşan ofiyolitik melanj Eosen-Oligosen çökelleri üzerinde tektonik dokanakla yer alır (Bozkuş vd. 2001). Gri, koyu gri renkli kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitlerden oluşan karbonat kayalar alloktondur ve tektonik olarak metamorfitlerin üzerinde bulunur. Yaşları Triyas-Paleosen'dir (Çağlayan vd. 1980). Geç Eosen, dolomit-evaporit (jips, anhidrit) ve Oligosen, molas çökelleri ile temsil edilir; molas çökelleri ofiyolitik melanj ve Mesozoyik karbonatların altındadır ve üzerlerine uyumsuz olarak Neojen karasal çökeller gelir (Bozkuş vd. 2001). Üst Miyosen yaşlı (Taner, 2001) karasal tortullar başlıca akarsu ve göl çökellerinden oluşur. Çökellerin alt kesiminde kumtaşı, kiltaşı, üst kesiminde ise marn, killi kireçtaşı, kumtaşı-kiltaşı bulunur. Kuvaterner, çakıltaşı, traverten, alüvyon, alüvyon yelpazesi ve yamaç molozları ile temsil edilir. Travertenler Honaz fayı ve açılma çatlaklarından boşalan kaynak sularından çökelmiştir.



Şekil 1. İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Bozkuş vd. 2001'den değiştirilerek) ve su noktalarının lokasyonu.

3. HİDROJEOLOJİ

3.1. Kayaçların Hidrojeolojik Özellikleri

Mesozoyik kireçtaşları, dolomitik kireçtaşları: Maruz kaldığı yoğun tektonik aktivite nedeniyle çatlaklı-kırıklı bir yapı kazanan ve dolayısıyla ikincil gözenekliği ve geçirgenliği yüksek olan Mesozoyik kireçtaşları inceleme alanındaki önemli akiferlerden biridir. Birim, çatlak ve katman yüzeyleri boyunca ilerlemiş çözünme boşluklarına sahiptir. Denizli ilindeki en yüksek debiye sahip karstik kaynaklardan biri olan Pınarbaşı kaynağı bu birimden boşalmaktadır. Honaz fayı yoluyla yüzeyleyen kaynağın debisi genellikle 1 m^3/s'den fazladır. Pınarbaşı kaynağına yakın lokasyonda açılmış üç DSİ kuyusu da (20019, 44153 ve 35497 nolu kuyular) artezyen kuyulardır. Bu kuyuların derinlikleri 150-214 m, pompa debileri 55-70 l/s ve açıldıkları tarihlerdeki basınç yüzeyi kotları +0,25 ile +6,4 m arasında değişmektedir. Pompaj testleri sonundaki düşüm miktarları 20 m civarındadır. 20019 ve 44153 nolu kuyularda yaklaşık 70-80 m, 35497 nolu kuyuda ise 25 m kalınlıkta yamaç molozu kesilmiştir. Tüm kuyularda 72-149 m arasında değişen derinliklerde çok kırıklı, çatlaklı ve karstik seviyeler içeren Mesozoyik kireçtaşlarına girilmiş ve kuyu tabanına kadar bu birim devam etmiştir. Kuyu loglarındaki litoloji tanımlamalarına göre yamaç molozunda kil boyutlu malzeme egemendir. Bu durumda, Honaz fayı önündeki yamaç molozu, güneyden kuzeye akan yeraltısuları önünde geçirimliliği düşük bir bariyer oluşturmaktadır. Bu kuyuların dışında, Pınarbaşı kaynağı çevresindeki diğer DSİ kuyuları da artezyen kuyu özelliğindedir. Traverten: DSİ sondaj verilerine göre, inceleme alanı güneyindeki alüvyonların altında çakıltaşı ara düzeyli birçok traverten katmanının yer aldığı, çakıltaşı ara düzeyleri ile birbirinden ayrılmış başlıca iki traverten düzeyinin toplam 90 m.

kalınlığa eriştiği, ancak ovanın kuzeyine doğru alüvyonların altında travertenlerin incelerek kaybolduğu anlaşılmaktadır. Çalışma alanının kuzeyinde yüzeyleyen çakıllı travertenlerde çatlakların yanı sıra çözünme boşluklarının gözlenmesi, birimin iyi bir akifer özelliğinde olduğunu göstermektedir (Önhon vd. 1988).

Alüvyon ve alüvyon yelpazesi: Doğrudan yağış suları ve ayrıca Mesozoyik kireçtaşlarından boşalan sularla beslenen en önemli akiferdir. Yaklaşık 150 m. kalınlığında olan birimde açılan kuyularla, alüvyonun özellikle çakıllı ve kumlu düzeylerinden bol miktarda yeraltısuyu alınabilir. Alüvyon konilerinin alt düzeylerinde yer yer gözlenen killi seviyeler akifere yarı basınçlı bir özellik kazandırmaktadır (Önhon vd. 1988). İnceleme alanındaki ofiyolitli melanj ve metasedimentler geçirimsizdir ya da düşük geçirgenliğe sahiptir.

3.2. Pınarbaşı Karstik Kaynağının Boşalım Katsayısının İncelenmesi

Diğer akiferler ile su alış-verişi olmayan karstik bir akiferin boşalım katsayısı hazne kayanın geçirgenliği, başlangıç debisi, etkin gözenekliği, hacmi ve su tablasının uzunluğu ile orantılıdır. Kaynakların gerçek rejimdeki boşalım grafiğinin temel eşitliği (Maillet eşitliği)

$Q_t = Q_0.e^{-\alpha.(t-t_0)}$ şeklindedir. (1)

Burada, Q_t : t zamanına karşılık gelen debi (m^3/s), Q_0: t_o anındaki (gerçek rejimin başlangıç anındaki) debi (m^3/s), α : boşalım katsayısı ($gün^{-1}$), e : 2,718, t-t_0 : Boşalımın başlangıcından itibaren geçen zaman (gün)'dır. Kaynağın boşalım katsayısı (α), haznenin depolama kapasitesi (V_s), t zamanda hazneden boşalan su miktarı (V_d) ve t zaman sonunda haznede kalan su miktarı (V_r) aşağıdaki bağıntılarla bulunabilir.

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{t.\log e} \quad (2) \qquad V_s = \frac{Q_0}{a} \quad (3)$$

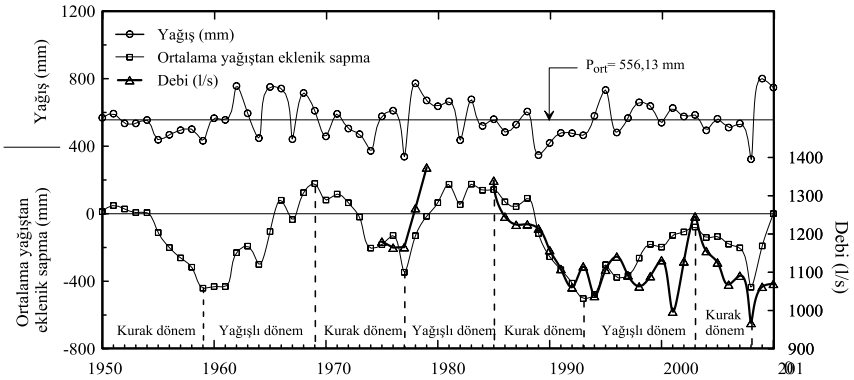
$$V_d = \frac{Q_0}{-\alpha}\left[e^{-\alpha.t}\right]_0^t \quad (4) \qquad V_r = V_s - V_d \quad (5)$$

Pınarbaşı kaynağının debisi DSİ tarafından aylık periyotla ölçülmektedir. 1973'de başlayan ölçümler 1979'a kadar (bazı aylar eksik olmak üzere) sürmüştür. 1980-1984 yılları arasında debi kaydı yoktur. 1986 yılından günümüze kadar düzenli debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yukarıda verilen bağıntılar, debinin yıl boyunca birbirine yakın olduğu yıllar dışında, Pınarbaşı kaynağına uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Çekilme, tek bir doğruyla temsil edilmektedir. İncelenen yıllar için kaynağın boşalım katsayısı $8{,}4.10^{-4}$ ile $2{,}81.10^{-3}$ $gün^{-1}$ arasında değişmektedir. Bu durum olasılıkla, yıllara göre, akiferin beslenme rejimi, yeraltı su seviyesi, akım yolları ve depolanma zonlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Pınarbaşı karstik kaynağının debisi kurak dönem sonundaki debiler de dahil olmak üzere genel olarak 1 m^3/s'nin üzerindedir. Bu nedenle kaynak "fazla yüksek debili kaynaklar" (10-1 m^3/s) sınıfında yer alır. Kurak dönem başlangıç debisi ile (Q_0) ile kurak dönem sonu debisi (Q_t) farkının başlangıç debisine (Q_0) oranına kaynak debi değişim yüzdesi (Q_d) denir. Pınarbaşı kaynağının debi değişim yüzdesi %13,5 ile %22,3 arasında değişmektedir. Bu değerlere göre Pınarbaşı kaynağı "debi değişimi orta kaynaklar" (%6-%27) sınıfındadır. Pınarbaşı kaynağının ortalama boşalım katsayısı 0,001705 $gün^{-1}$'dir. Bu değer ve debi değişim yüzdesi Pınarbaşı karstik kaynağını "2. Tür - boşalım katsayısı orta değişken kaynaklar" sınıfına sokmaktadır. Bu tür kaynakların debi ve yıllık boşalttıkları su miktarları, uzun yıllar yağış ortalamasından yıllık eklenik sapmaların kurak ve yağışlı dönemlerdeki değerleri ile paralellik gösterir. Şekil 2'de üstteki grafik 1950-2010 yılları arasında Denizli il merkezi için yıllık toplam yağış dağılımını, alttaki grafikler ise 1950-2010 döneminde yıllık ortalama yağıştan eklenik sapma ve 1975-2010 yılları arasında Pınarbaşı kaynağının yıllık ortalama debi dağılımını göstermektedir. Pınarbaşı kaynağının debi-zaman grafiği, ortalama yağıştan eklenik sapma grafiği ile uyumludur. Bu da kaynağın debisinin ortalama yağıştan eklenik sapma değerleri ile kontrol edildiğini gösterir. Yıllara göre, akiferde depolanan su hacminin %13 ile %22'si kurak dönemde Pınarbaşı kaynağından boşalmaktadır. Kaynaktan kurak dönemde boşalan su hacmi, kaynağın boşalım katsayısı ile ters orantılı olup boşalım katsayısı küçüldükçe kaynaktan zaman içinde alınacak su miktarı daha fazla olmaktadır. Boşalım katsayısı değerlerinden, Pınarbaşı kaynağının

geldiği karstik akifer için su tablasının yanal kesitinin büyük, hidrolik iletkenlik katsayısının düşük-orta, etkin gözenekliliğin büyük ve hazne kayada bulunan su hacminin büyük olduğu yorumları yapılabilir. Kaynağın boşalım katsayısı genellikle 10^{-3}gün^{-1} mertebesindedir. Bu değer, kaynak boşalımının kireçtaşının karstik kanallarından çok tabaka, kırık ve çatlaklardan olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1. Pınarbaşı kaynağının boşalım katsayısı, depolama gücü ve debi değişim yüzdesinin yıllara göre değişimi.

Yıl	$t-t_0$ (gün)	Q_o (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	α (gün^{-1})	V_o (m^3)	V_d (m^3)	V_r (m^3)	Q_d
1991	120	1187,8	1009,4	0,00134	75.682.832	11.364.273	64.318.559	15,0
1992	120	1112,2	941,0	0,00139	68.983.546	10.618.024	58.365.522	15,4
1994	150	1156,8	921,5	0,00152	65.928.443	13.408.470	52.519.973	20,3
1997	120	1173,6	1015,6	0,00121	84.148.581	11.327.969	72.820.612	13,5
1998	150	1191,0	993,0	0,00121	84.902.970	14.112.250	70.790.720	16,6
2002	90	1221,8	985,7	0,00238	44.354.420	8.551.317	35.803.103	19,3
2003	90	1347,6	1046,4	0,00281	41.435.103	9.258.015	32.177.088	22,3
2004	90	1227,7	974,5	0,00257	41.273.650	8.522.166	32.751.484	20,6
2005	180	1194,2	1025,8	0,00084	122.249.858	17.228.607	105.021.251	14,1
2009	120	1187,0	1011,0	0,00134	76.706.657	11.369.223	65.337.434	14,8



Şekil 2. Denizli il merkezi için 1950-2010 yılları arasındaki yağış-ortalama yağıştan eklenik sapma-zaman ve Pınarbaşı kaynağının 1975-2010 dönemindeki debi-zaman grafikleri.

4. HİDROJEOKİMYA

4.1. Suların Kimyasal Kompozisyonu

İnceleme alanı ve yakın çevresinde birçok kaynak ve DSİ, Köy Hizmetleri Denizli İl Müdürlüğü, İller Bankası ve şahıslarca açılmış çok sayıda sondaj bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında Pınarbaşı kaynağı, 44153 ve 20019 nolu DSİ kuyularının hidrokimyasal özellikleri incelenmiştir. Pınarbaşı kaynağı ve 44153 nolu kuyudan 31.10.2014 tarihinde alınan su örneklerinin kimyasal analizleri Hacettepe Üniversitesi'nde yapılmış, 20019 nolu kuyunun analizi ise Fórizs vd. (2011)'den alınmıştır. Suların iyon, element ve SiO_2 analiz sonuçları Çizelge 2a ve 2b'de verilmiştir.

Çizelge 2a. Suların majör iyon analiz sonuçları (EC: µS/cm, iyonlar: mg/l).

Suyun Adı	t°C	EC	pH	Na	K	Ca	Mg	Li	NH_4	Cl	SO_4	HCO_3	F	NO_2	NO_3
Pınarbaşı	18,7	693	7,1	5,7	1,11	114	32	0,008	0,23	3,03	126	320	0,39	0,007	2,77
DSİ-20019	20,0	827	6,9	9,0	1,50	127	34	0,013	0,24	4,00	178	342	0,58	-	1,10
DSİ-44153	24,1	1151	6,6	15,6	2,43	189	46	0,033	0,84	5,85	201	564	0,68	0,051	0,00

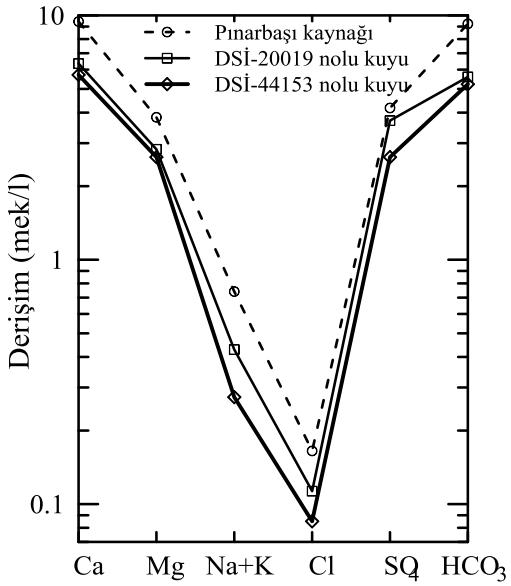
Çizelge 2b. Suların ağır metal, iz element ve SiO_2 analiz sonuçları (µg/l).

Suyun Adı	Al	As	B	Ba	Co	Cr	Cs	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	SiO_2
Pınarbaşı	9,9	21,2	43	49,1	0,08	1,3	0,6	110	-	-	4,6	0,15	1156	17310
DSİ-20019	4,0	26,0	70	23,0	-	-	1,3	73	-	-	-	-	1298	17554
DSİ-44153	9,4	69,4	171	44,8	1,49	-	3,6	57	14,8	7,2	4,1	0,14	1789	21028

Toplam iyon miktarları Pınarbaşı kaynağında 604,8 mg/l, 20019 nolu kuyuda 697,5 mg/l ve 44153 nolu kuyuda 1024,5 mg/l'dir. Uluslararası Hidrojeologlar Birliği'nin sınıflamasına göre sular Ca-Mg-HCO_3-SO_4 sınıfına girmektedir. Tüm sularda katyon sıralanımı Ca>Mg>Na>K ve anyon sıralanımı HCO_3>SO_4>Cl şeklindedir. Yarı logaritmik diyagramdan, suların aynı akiferden (Mesozoyik kireçtaşı) geldikleri veya yeraltında benzer kimyasal süreçlerden geçtikleri anlaşılmaktadır (Şekil 3). Tüm majör iyonlar Pınarbaşı kaynağı, 20019 ve 44153 kuyu suları sıralaması ile artış gösterirler. Sularda Hg, Cd, Se ve Cu tespit edilememiştir. As, B, Co, Cs, Mn, Ni, Sr ve SiO_2 değerleri 44153 nolu kuyuda göreceli olarak yüksektir. Bu kuyudan boşalan suyun sıcaklığı da diğer sulara göre 4-5°C daha fazladır. Özellikle Na, K, Li, As, B, Cs, SiO_2, H_2S ve NH_4'un suda fazla bulunması jeotermal su göstergeleridir. Bu element ve bileşenlerin (bazılarında 3-4 kat olmak üzere) 44153 nolu suda fazla olması ve H_2S gazının varlığı, bu suda bir miktar jeotermal su katkısı olabileceğinin bir göstergesidir.

4.2. Suların Doygunluk Durumları

Kabuklaşma, sondaj ve iletim borularında zamanla tıkanmalara yol açarak debi azalmasına ve ekonomik kayba neden olur. Bu nedenle, sondaj ve iletim borularında çökelme eğiliminde olan mineral türlerinin bilinmesi önemlidir. İnceleme alanı sularının seçilen bazı minerallere göre doygunluk durumları PhreeqC programı (Parkhurst ve Appelo, 1999) ile belirlenmiştir (Çizelge 3). Mineral doyma indeksi (SI) negatif olanlar çözünme, pozitif olanlar çökelme eğiliminde olan mineralleri gösterir. Buna göre hemen hemen tüm sular anhidrit, aragonit, dolomit, fluorit, jips, K-feldispat, kalseduan, sepiyolit ve sölestin minerallerine göre doygun değildir. SI değerleri barit, Ca-montmorillonit, gibsit, K-mika, kaolinit ve kuvars mineralleri için doygunluk üstü, kalsit için ise doygunluğa yakın değerler vermesine karşın sulardan başlıca kalsit ve kuvars çökelmesi beklenir. Pınarbaşı kaynağının suyunun Çürüksu Ovası'na ileten açık kanalın sonunda suyun pH'ının 7.1'den 8.0'a yükseldiği ve traverten çökeliminin başladığı belirlenmiştir.



Şekil 3. Yarı logaritmik diyagram.

Çizelge 3. Suların çeşitli minerallere göre doygunluk durumları (gri ton, çökelme eğiliminde olan mineralleri göstermektedir).

Mineral	Pınarbaşı	DSİ-20019	DSİ-44153
Anhidrit	-1,75	-1,58	-1,40
Aragonit	-0,09	-0,28	-0,17
Barit	0,16	-0,09	0,09
Ca-Mont.	1,86	1,03	1,33
Dolomit	-0,18	-0,56	-0,32
Fluorit	-1,62	-1,27	-1,09
Gibsit	1,23	0,91	1,01
Jips	-1,38	-1,22	-1,09
K-feldispat	-1,67	-2,13	-2,01
K-mika	6,36	5,27	5,61
Kalseduan	-0,24	-0,25	-0,22
Kalsit	0,06	-0,13	-0,02
Kaolinit	3,66	3,01	3,25
Kuvars	0,20	0,19	0,13
Sepiyolit	-5,31	-6,28	-6,90
Sölestin	-1,67	-1,50	-1,39

4.3. Suların Kullanılabilme Özellikleri

Pınarbaşı kaynağı ile DSİ-20019 ve 44153 nolu kuyu sularının içilebilirliği TSE 266 (2005) ve Sağlık Bakanlığı'nın "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" (İTASHY-2005)'te yayımlanan standartlara göre incelenmiştir. Bu standartlara göre DSİ-44153 nolu kuyu limit değerlerin üzerinde kalan As ve amonyum değerleri ve diğer sular da yüksek As değerlerinden dolayı içilmez özelliktedir. Doğal Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik (2004)'te verilen standarda göre limitlerin üstünde yer alan As miktarı nedeniyle 44153 nolu kuyu suyu doğal ve mineralli su olarak kullanılamaz niteliktedir. İncelenen üç su noktası için, suların EC değerleri 693-1151 µS/cm, sodyum adsorpsiyon oranı (SAR)

değerleri 0,12-0,26 ve %Na değerleri 3,18-5,29 arasındadır. Buna göre, Pınarbaşı kaynağı C_2S_1 sınıfında, çok iyi-iyi özellikte, diğer sular ise C_3S_1 sınıfında ve iyi-kullanılabilir özellikte sulama suyu niteliğindedir. Bunun dışında suların Cl ve B miktarları, sulama suyu olarak kullanılmaları açısından bir sorun yaratmaz.

5. JEOTERMAL ENERJİ OLANAKLARI

Büyük Menderes ve Gediz grabenlerinin kesiştiği Pamukkale-Karahayıt jeotermal alanlarından itibaren doğuya doğru uzanan Çürüksu grabeninde ılık suların varlığı (Kaklık mağarası kaynakları ve sondajları gibi) bilinmektedir. Kaklık-Honaz bölgelerindeki travertenleri oluşturan sularda jeotermal su katkısının da olduğu ortaya konmuştur (Özkul vd. 2013). Dolayısıyla inceleme alanı ve çevresinde Özler (2000) tarafından da ifade edildiği üzere, düşük entalpili bir jeotermal sistemin varlığı sözkonusudur. Çürüksu grabeninin güney kenarındaki aktif Honaz fayının üzerinde açılan DSİ-44153 nolu kuyu suyu, sıcaklığının (24,1°C) Denizli'nin yıllık hava sıcaklığı ortalamasından (16°C) 8°C daha fazla olması nedeniyle sıcak ve mineralli sular sınıfına girer. Bu suda, son 10 yılda, değişik mevsimlerde yapılan sıcaklık ölçümlerinde sıcaklığın değişmediği gözlenmiştir.

Jeotermal araştırmaların en önemli bölümünü oluşturan çalışmalardan biri jeotermal sistemdeki rezervuar sıcaklığının tahmin edilmesidir. Rezervuar sıcaklığı, jeotermal sudan yararlanma alanlarını (elektrik üretimi, konut-sera ısıtması, kaplıca gibi) belirleyen en önemli faktördür. Hazne kaya sıcaklığının saptanmasında çok değişik yöntemler önerilmiştir. Araştırmalarda en çok kullanılan jeotermometreler kimyasal jeotermometrelerdir. Hazne kaya sıcaklığını belirlemek için çeşitli araştırmacılar tarafından çözünürlüğe, iyon değişimine ve iyon etkinliğine dayalı kimyasal jeotermometre bağıntıları geliştirilmiştir. Rezervuar sıcaklığını tahmin etmek için DSİ-44153 nolu kuyu suyuna bunlardan SiO_2, Na/K, Li ve Na/Li jeotermometreleri uygulanmış ve sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir.

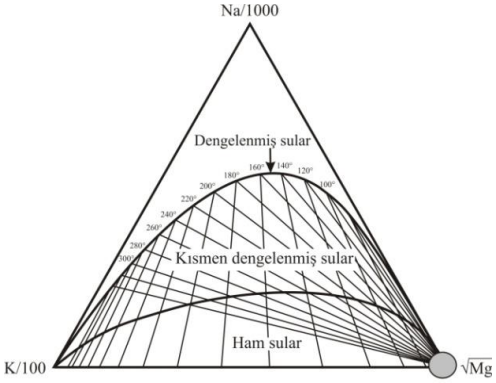
Çizelge 4. Çeşitli kimyasal jeotermometreler ile hesaplanan rezervuar sıcaklıkları (°C).

Kalseduan[a]	Kuvars[a] buhar kaybı yok	Kuvars[a] buhar kaybı	Na/K[b]	Na/K[c]	Na/K[d]	Na/K[e]	Na/Li[g]
33	65	71	241	253	269	252	187

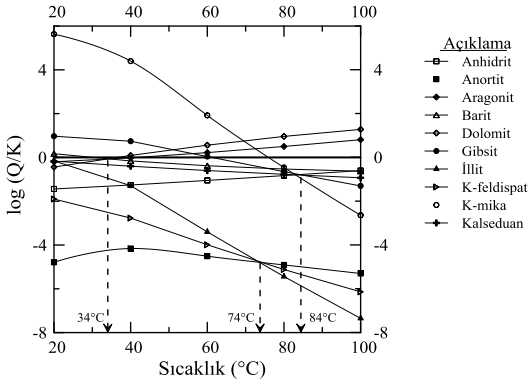
[*a]Fournier (1977), Fournier (1973), [b]Truesdell (1976), [c]Arnórsson vd. (1983), [d]Fournier (1979), [e]Tonani (1980), [f]Kharaka vd. (1982).

Giggenbach (1988) tarafından geliştirilen Na-K-Mg diyagramı, su-kayaç ilişkisinin dengede olmadığı (ham sular), kısmen dengede olduğu ve tam dengede olduğu sular olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır (Şekil 4). Giggenbach (1988) ham sular bölümüne düşen suların katyon jeotermometre sonuçlarına şüpheyle bakılması gerektiğini belirtmektedir. Giggenbach diyagramında 44153 nolu kuyunun ham sular bölgesine düştüğünden katyon jeotermometreleri ile hesaplanan 187-269°C aralığındaki rezervuar sıcaklıkları çok yüksektir. Daha gerçekçi rezervuar sıcaklıkları SiO_2 jeotermometreleri ile elde edilen 33-65°C'lik değerlerdir.

Reed ve Spycher (1984) jeotermal sistemlerde yeraltı sıcaklığının tahmin edilmesi için sıcaklıkla mineral doygunluklarının değişmesi esasına dayanan bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem kısaca suyun kimyasal analizi sonucunda yukarıda belirtildiği gibi çeşitli mineraller ile bu minerallerin her bir sıcaklık değerinde ayrı ayrı doygunluk indekslerinin hesaplanması ve bu sıcaklık değerleri ile doygunluk indeksi değerlerinin bire bir doğrularını içeren mineral denge diyagramlarının çizilerek yorumlanması ilişkisine dayanır. DSİ-44153 kuyu suyunda Phreeq C programı (Parkhurst ve Appelo, 1999) ile çeşitli mineraller için mineral doygunlukları hesaplanmış ve elde edilen değerlerle sıcaklık-mineral denge diyagramı çizilmiştir (Şekil 5). Bu diyagramda SI=0 noktası üzerinde dolomit, aragonit ve barit minerallerinin 34°C'de kesiştiği görülmektedir. SI=0 çizgisinin altında (negatif kısımda) illit, K-feldispat, anortit ve krizotil mineralleri 74°C, K-mika, gibsit, kalseduan ve anortit mineralleri ise 84°C'de kesişmektedir. SI denge doğrusunun aşağısında (negatif kısımda) olabilecek kesişmeler farklı sıcaklıktaki akışkanların karışımını ve dolayısıyla bu akışkanların sıcaklıklarını belirtebilir.



Şekil 4. Giggenbach diyagramı.



Şekil 5. Sıcaklık-mineral denge diyagramı.

6. SONUÇLAR

Pınarbaşı kaynağı ve civarındaki sondaj suları Mesozoyik karstik kireçtaşlarından boşalan Ca-Mg-HCO_3-SO_4 tipindeki sulardır. Kaynak boşalımının analizi, su tablasının yanal kesitinin büyük, hidrolik iletkenlik katsayısının düşük-orta, etkin gözenekliğin yüksek, hazne kayada bulunan su hacminin büyük olduğunu ve kaynak boşalımının karstik kanallardan çok tabaka, kırık ve çatlaklar yoluyla gerçekleştiğini göstermektedir. Mineral doygunluk hesaplamalarına göre suların çıkarılması ve iletimi sırasında çökelmesi beklenen başlıca mineraller kalsit ve kuvarstır. İncelenen sular yüksek amonyum ve As içerikleri nedeniyle içilmez özelliktedir. Ancak, sulamada kullanılabilirler. 44153 nolu kuyu suyu, sıcaklığı (24.1°C), yüksek EC, Na, K, Li, As, B, NH_4, SiO_2 değerleri ve H_2S gazının varlığı ile diğer sulardan ayrılır ve düşük entalpili bir jeotermal sistemin varlığına işaret eder. Jeotermal sistemin ısı kaynağı olarak genç tektonik aktivite sonucu gelişen olağandan yüksek jeotermal gradyan öngörülmektedir.

Mesozoyik karstik kireçtaşı akiferinin beslenmesi başlıca yağmur ve daha az oranda eriyen kar sularından sağlanmaktadır. Yeraltına süzülen yağış sularının bir kısmı sığ dolaşım yaparak yüksek kotlardaki mevsimsel kaynak sularını oluştururlar. Derine süzülen sular su tablasına erişir. Honaz Dağı'nın kuzey yamaçlarında, akiferdeki yeraltısuyu akımı güneyden kuzeye doğrudur. Honaz fayı önündeki yamaç molozu yeraltısuları için geçirimsiz bir zon oluşturur. Bu noktada bir kısım yeraltısuyu yüzeye çıkarak Pınarbaşı kaynağını oluşturmaktadır.

Fay önünde, aktif Honaz fayı aracılığıyla derinlerden yüzeye doğru yükselen jeotermal su soğuk yeraltısuları ile karışır. Bunun sonucunda, bu kesimlerde açılan sondajlardan soğuk-sıcak su karışımı alınmaktadır. Bu sondajların sığ ve soğuk yeraltısuyu teminine uygun techizle açıldığı düşünülürse, derinlerde daha yüksek sıcaklıktaki sulara erişilmesi mümkün görünmektedir. Jeotermometreler, yeraltında farklı sıcaklıklarda (33-84°C) jeotermal suların varlığını göstermektedir. Bölgede yapılacak ayrıntılı jeolojik, hidrojeolojik, hidrojeokimya ve jeofizik çalışmaları sonunda belirlenecek lokasyonda derin jeotermal sondaj açılması ve soğuk yeraltısuyu karışımının önlenmesi halinde 33 ile 84°C arasındaki sıcaklıklarda jeotermal akışkan elde edilebilecektir. Bu gerçekleştiğinde, jeotermal akışkanın entegre kullanımı (başta sera ısıtması ve spa faaliyetleri olmak üzere) yörenin sosyo-ekonomik gelişimine katkı sağlayacaktır.

7. KATKI BELİRTME

Bu çalışma kapsamında Pınarbaşı kaynağı ve 44153 nolu kuyu suyunun analiz bedelini karşılayan Şükrü Ceylan'a (Ceysu), Pınarbaşı kaynağının debi değerleri ve kuyu loglarına ilişkin döküman sağlayan Salim Yüzereroğlu (DSİ 21. Bölge Md.) ve M. Hakan İlhan'a (DSİ 212. Şube Md) katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

8. KAYNAKLAR

Arnnorsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmoschimica Acta, 47, 567-577.

Bozkus, C., Kumsar, H., Özkul, M., Hançer, M., 2001. Seismicity of active Honaz fault under an extentional regime. International Earth Science Colloquium of the Aegean Region (IESCA), İzmir, Proceedings, 7–12.

Çağlayan, A., Öztürk, E.M., Öztürk, Z., Sav, H., Akat, U., 1980. Menderes masifi güneyine ait bulgular ve yapısal yorum. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 10, 9-17.

Doğal ve Mineralli Sular Hakkında Yönetmelik.

Fórizs, I., Gökgöz, A., Kele, S., Özkul, M., Deák, J., Baykara, M.O., Alçiçek, M.C., 2011. Comparison of the isotope hydrogeological features of thermal and cold karstic waters in the Denizli Basin (Turkey) and Buda Thermal Karst (Hungary). Central European Geology, 54(1-2), 115-119.

Fournier, R.O., 1973. Silica in thermal waters: Laboratory and field investigation. Symposium on Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, Tokyo, Japan.

Fournier, R.O., 1977. A review of chemical and isotopic geothermometers for geothermal systems. In: Proceedings of the Symposium on Geothermal Energy, Cento Scientific Programme, Ankara.

Fournier, R.O., 1979. A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Resources Council Transactions, 3, 221-224.

Giggenbach, WF, 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52, 2749-2765.

İTASHY, 2005. İnsani tüketim amaçlı sular hakkında yönetmelik, 17.02.2005, 25730 sayılı resmi gazete, Ankara.

Kharaka, Y.K., Lico, M.S., Law, L.M., 1982. Chemical geothermometers applied to formation waters. Gulf of Mexico and California Basins, American Association of Petroleum Geologists Bulletin**,** 66, 558.

Okay, A.İ., 1989. Denizli'nin güneyinde Menderes Masifi ve Likya naplarının jeolojisi. MTA Dergisi, 109, 45-58.

Önhon, E., Ertan, I., Güler, S., Nazik, M., Kaplan, A., 1988. Research on the origin of the karst waters in Yukarı Çürüksu plain using isotope techniques.

Özkul M.**,** Kele, S., Gökgöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Németh, T., Chang, Y.W., Alçiçek, M.C., 2013. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli Extensional Basin based on their depositional and geochemical data. Sedimentary Geology, 294, 179-204.

Özler, H.M., 2000. Hydrogeology and geochemistry in the Çürüksu (Denizli) hydrothermal field, western Turkey. Environmental Geology, 39(10), 1169-1180.

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)-A computer program forspeciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 pp.

Reed, M.H., Spycher, N.F., 1984. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal water with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. Geochimica et Cosmoschimica Acta, 48, 1479-1490.

Taner, G., 2001. Denizli bölgesi Neojeni'ne ait katman startigrafik konumlarında yeni düzenleme. 54. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara.

Tonani, F., 1980. Some remarks on the application of geochemical techniques in geothermal exploration. Proceedings of the Adv. Eur. Geoth. Res. 2nd Symposium, Strasbourg, 428-443.

Truesdell, A.H., 1976. Summary of section III – geochemical techniques in exploration. Proceedings of the 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco.

TS-266, 2005. Sular-insani tüketim amaçlı sular, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 10 s.

Baraj Yeri Seçiminde Komşu Vadiler Arasındaki Hidrolik İlişkinin ve Jeolojik Yapıların Etkisinin İrdelenmesi

Investigation of the Effects of Hydraulic Connection Between Neighboring Valleys and Geologic Structure on Dam Site Selection

R. Karagüzel[1,*], H. T. Yalçın[1], C. Yaltırak[1]

[1] *İTÜ Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak İstanbul*
*(*karaguzel@itu.edu.tr)*

ÖZ: Bu bildiride, Alanya-Alara Çayı üzerinde 200 m gövde yüksekliğinde yapılması planlanan ve komşu vadiye en yakın mesafesi yaklaşık 3 km olan, baraj gölünün su tutma özellikleri tartışılmaktadır. Amaca yönelik olarak iki vadi arasındaki bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik modeli ortaya konulmuştur. Bölgede geçirimsiz metamorfik ve sedimenter temel kayalar üzerinde yüzeyleyen Miyosen serisi, ekseni vadilere dik konumlu ve komşu vadiye dalımlı kıvrımlı bir yapı sunmaktadır. Alara Barajı göl alanından olası su kaçaklarına karşı yapılan bu çalışmada, öncelikli olarak kıvrımlı yapının temelinde yer alan Aksu ve Oymapınar formasyonlarının karstik özellikleri incelenmiştir. İki vadi arasındaki jeolojik ortamın su tutma özelliklerini belirlemek amacıyla araştırma kuyularında basınçlı su deneyleri yapılmış ve yeraltı su seviyeleri periyodik olarak ölçülmüştür. Araştırma bulguları, karbonatlı kayaçlarda tabakalanmaya paralel iyi gelişmiş, yaygın ve açık bir karstik sistemin geliştiğini göstermiştir. Alara Barajının seçilen aks yerinde ve planlanan yükseklikte yapılması halinde, kıvrımın kuzey kanadında ve senklinal ekseninde mevcut karstik sistem, yeni hidrostatik basınç koşullarında baraj gölünden zamanla artan su kaçaklarına neden olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Baraj Gölü, Hidrolik İlişki, Karst, Kıvrım, Su Kaçakları

ABSTRACT: *This proceeding discusses the water retaining capacity of a reservoir behind a planned dam on Alara River (Alanya) having a height of 200 m which is 3 km away from the nearest neighboring valley. For this particular purpose, hydrogeologic and geologic models were constructed between two adjacent valleys. Geologic structure comprises folded Miocene series overlying impermeable metamorphic and sedimentary base rocks where the axis is perpendicular to valleys and plunging to neighboring valley. Initially, the karstic properties of Aksu and Oymapınar formations at the base of folded structure were investigated aiming to assess possible water leakages from the reservoir of the Alara Dam. Pressured water tests and periodic groundwater level measurememts were carried out in boreholes between two valleys to obtain water tightness properties of the geologic units. Investigations revealed well-developed, extensive and open karstic structures between layer surfaces of carbonated rocks. It is understood that the chosen site for the Alara Dam at specified height causes increasing water leakages from the reservoir lake at the northern limb of fold and along the karstic system on the syncline axis under changing hydrostatic pressure.*

Keywords: *Reservoir Lake, Hydraulic Connection, Karst, Fold, Water Leakage*

1. GİRİŞ

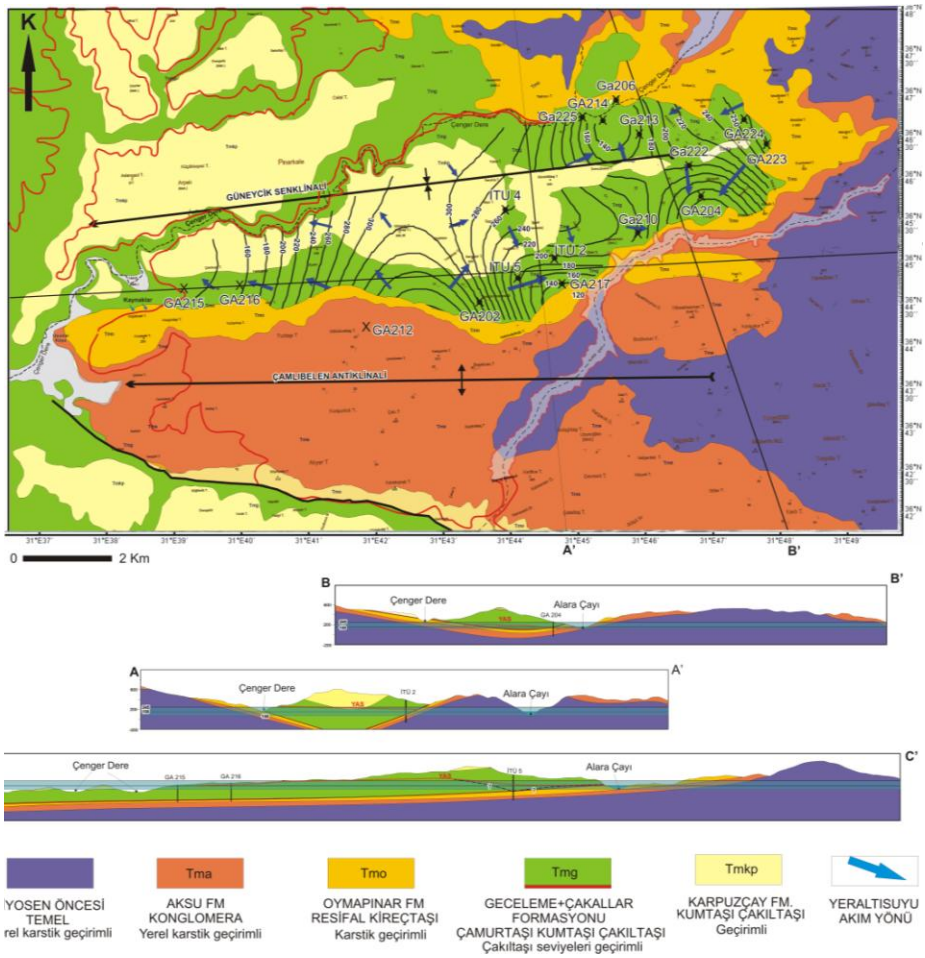
Barajların yapılabilirliğinin temel koşulu ve öncelikle araştırılması gereken konu göl alanının su tutabilme özelliğidir. Jeolojik ortamların su tutma yetenekleri; litolojik ve yapısal özellikleri tarafından denetlenmektedir. Göl alanının mühendislik jeolojisi (geçirimlilik ve yamaç stabilitesi) araştırma bulguları baraj eksen yerinin ve hatta baraj yüksekliğinin belirlenmesinde etkin parametrelerdir.

Bu çalışmada, Alanya-Alara Çayı üzerinde planlanan 200 m yüksekliğindeki bir barajın yapılabilirliği tartışılmaktadır. Planlanan baraj gölünden en yakın mesafesi 3 km olan komşu vadiye olası su kaçakları açısından, kıvrımlı yapı içerisindeki karbonatlı kayaçların konumu ve karstik özellikleri birincil öneme sahiptir. Amaca yönelik olarak sürdürülen jeolojik ve hidrojeolojik çalışmalar

kapsamında, sahada yapılan gözlem, araştırma kuyularında yapılan basınçlı su deneyleri ve yeraltısuyu seviye ölçümlerden yararlanılarak vadiler arası hidrolik ilişki tartışılmaktadır.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanının yer aldığı Orta Toroslar bölgesinde Prekambriyen-Kuvaterner aralığında gelişmiş allokton ve otokton konumlu kaya birimler yüzeylemektedir. Otokton konumlu kaya birimleri Beydağ otoktonu ve Anamas-Akseki otoktonu; allokton konumlu kaya birimleri ise Antalya napları, Alanya napı, Beyşehir-Hoyran-hadim napları olarak tanımlanmıştır. Temel kayalar üzerindeki Neojen yaşlı denizel çökeller geniş alanlar kaplamaktadır. Planlanan Alara barajının su tutma özellikleri ile ilgili birincil öneme sahip formasyonlar, bölgedeki Miyosen yaşlı birimlerdir (Şekil 1).



Şekil 1. Alara Çayı ile Çenger Dere arasının jeoloji-hidrojeoloji haritası ve kesitleri (Karagüzel vd., 2011)

2.1. Miyosen Formasyonlarının Jeolojik Özellikleri

Alara Barajı su toplama havzasında farklı niteliklere sahip, Miyosen öncesi yoğun deformasyon geçirmiş, metamorfik ve sedimanter birimler temeli oluştururlar. Bu birimlerin üzerinde uyumsuz olarak Aksu, Oymapınar, Çakallar, Geceleme ve Karpuzçay formasyonları bulunur (Şekil 1). Bu formasyonlar akarsu, kıyı, sığ deniz, resif ortamlarında çökelen yanal ve düşey geçişli formasyonlardır. Aksu Formasyonu, temelden türemiş karbonat çimentolu konglomera ve kumtaşından oluşan bir istiftir. Bu birimin içinde yersel olarak karbonatlı mercekler ve kireçtaşı mercekleri vardır. Üste doğru karbonat oranı artarak dereceli olarak Oymapınar Formasyonu'na geçiş yapar. Oymapınar Formasyonu, bir karbonat serisi olup tabandan tavana doğru kalınlığı 60-200

metreyi bulan heterojen resifal nitelikte kireçtaşlarından oluşur. Oymapınar kireçtaşları arazi dağılımı ve özellikleri dikkate alındığında, düşük eğimli bir kıyının önünde gelişen bir set resifidir. Oymapınar Formasyonu, Alara Çayı yatağında vadi duvarlarında tabakaya bağımlı gelişmiş karstik boşluklar 0.1 m arasında dikey, 20-40 m arasında yatay uzunluklarda izlenmektedir (Şekil 2). Çakallar Formasyonu, Oymapınar Formasyonu üzerinde uyumlu olarak gelen, silttaşı, kumtaşı ve marndan oluşur ve Geceleme Formasyonu ile yanal geçişlidir. Çakallar Formasyonu'nun bu çalışma açısından en önemli özelliği, karbonatlı kil ve marndan oluşan bir resif ilerisi bir fasiyesle Oymapınar Formasyonu ile uyumlu olmasıdır. Çakallar Formasyonu'nun tabanında yer alan bu kesim, 10-20m arası kalınlığa sahiptir. Bu tabakalar, bir membran gibi Oymapınar Formasyonu'nu üzerindeki kırıntılı formasyonlardan ayırır ve izole eder. Bu izolasyonun hemen üstünde yer alan kesimlerdeki karbonatlı kumtaşlarında çok sayıda mevsimsel su kaynağı bulunur. Çakallar, Geceleme ve Karpuzçay formasyonları birbiriyle yanal ve düşey geçişli, hâkim olarak transgresif nitelikte başlayan regresif olarak sona eren bir istiftir.

Sahada gözlenen Miyosen istifi, paleocoğrafik olarak, kuzeyde bulunan bir yükselimin önünde çökelmeye başlamış kıyı, kıyı ardı ve kıyı önü ortamları içerir. Oymapınar Formasyonu kıyıya paralel gelişen, denize doğru genişliği yaklaşık 20 km den fazla olan sığ ve sıcak bir denizin kenarında gelişen resiflerin oluşturduğu kayaçlardır. Alara Barajı sağ sahilinde söz konusu Miyosen serisi kıvrımlı bir yapı sunmaktadır. Bu yapının en ilginç özelliği Oymapınar Formasyonu'nun mevcut kıvrımlardaki konumudur. Arazide bulunan iki büyük ölçekli kıvrım, Çambeleni Antiklinali ve Güneycik senklinalidir (bkz. Şekil 1). Çambeleni antiklinalinin güney kanadındaki Oymapınar Formasyonuna ait tabakalar baraj ekseni mansabında kalırlar. Fakat senklinalin ana ekseni Alara Çayı üzerinde yaklaşık 4 km'lik bir kesimde vadinin iki yamacını oluşturmaktadır.

Şekil 2. Alara vadisinde yüzeyleyen karstik Oymapınar Formasyonundan bir görüntü

3. HİDROJEOLOJİ

3.1. Jeolojik Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

Alara Çayını kesen kıvrımlı yapı batıya dalımlı olduğundan dolayı özellikle geçirimliliği yüksek olan Oymapınar Formasyonu'nun Güneycik senklinalinin içinde Çakallar Formasyonu ile izole edilmiş olması, yeraltı suyu dinamiği, özellikte planlanan baraj gölünden su kaçakları açısından önem arz eder (bkz. Şekil 1). Özellikle set resifleri deniz seviyesindeki değişimlerle zaman zaman su üstünde kaldıklarından dağılgan gevşek bir yapı ile parçalanarak yeniden çökelirler veya su seviyesi yükseldikçe boğularak gelişimlerini durdururlar. Bu durumda parmak arası adı verilen yanal geçiş fasiyeslerini diğer birimlerle oluştururlar. Güneycik senklinalinin teknesinde gömülü olan Oymapınar Formasyonu'nun yanal ve düşey konumu, formasyon nitelikleri bölgedeki hidrojeolojik yapının en

öncelikli sorunlarını oluşturur. Oymapınar Formasyonu'nun karstik geçirimli özellikleri olmasına rağmen Alara çayına en yakın boşalım noktası Uzunlar köyü kuzeydoğusundaki su kaynaklarıdır (Şekil 1). Kasım 2010 döneminde Alara çayı eksenindeki Oymapınar mostralarındaki karstik boşluklardan yeraltısuyu boşalımı gözlenmemiştir. Oysa sadece çakıllı seviyeleri geçirimli olan Çakallar ve Geceleme formasyonlarında aynı mevsimde Çenger dereye doğru boşalan kaynaklar saptanmıştır. Bu beklenmeyen durumun nedeni Oymapınar ve Çakallar formasyonları arasındaki killi marnların oluşturduğu bariyerdir. Güneycik senklinalinin batıya dalımlı olması, senklinalin doğu kesiminde Oymapınar Formasyonu'nun hem Çenger derede hem de Alara Çayında yüzeylendiği dikkate alınırsa, Oymapınar Formasyonun'dan batıda boşalan su kaynaklarının beslenme noktalarının Alara çayı ve Çenger deresinden olması kuvvetle muhtemeldir. Yapısal olarak Oymapınar Formasyonu'nun Çakallar Formasyonu ile izole edilmiş tabakalarından oluşmuş Güneycik senklinali çekirdeğindeki hidrojeolojik sistem, 100 metre kotunda Alara çayında ve Çenger deresi yatağında yüzeylenir. Bu kesimden itibaren de senklinalin kanatları boyunca eksenin batıya doğru olan dalımdan dolayı deniz seviyesine kadar olan tüm mostralarda karstik sistem açığa çıkmış durumdadır, hatta Güneycik senklinalinin Akdeniz'e doğru dalması dikkate alınırsa deniz tabanında da günümüzde deniz seviyesinden -150 m kadar olan kesimlerde yüzeylenen Oymapınar formasyonu var ise arada bir bağlantısının olması muhtemeldir. Sonuç olarak Oymapınar formasyonu karstik ve üzerindeki formasyonlardan doğal membranla sınırlandırılmış bir hidrojeolojik sistemdir. Üstlerinde yer alan diğer formasyonlar ise kırıntılı olup tabanda bulunan marn ile Oymapınar formasyonu üzerinde yer alan diğer bir hidrojeolojik sistemi temsil eder. Bölgedeki iki ayrı hidrojeolojik sistem paketinin nedeni söz konusu geçirimsiz marn seviyesidir. Üst hidrojeolojik sistemde açılan İTÜ-4 nolu araştırma kuyusunda genelde geçirimsiz litolojiler arasında karbonatlı çimentolu çakıltaşı seviyeleri, dolayısıyla basınçlı akifer delinmiş olup, pozitif artezyen koşulu oluşmuştur. Dolayısıyla planlanan barajdan üst hidrojeolojik sistemden kaynaklanan bir su kaçağı beklenmemektedir. Alara Çayı ve Çenger deresi yataklarında yüzeyleyen alt hidrojeolojik sistem yapısal nedenlerden dolayı batıya doğru dalarak uzanmaktadır (bkz. Şekil 1). Bu durumda yapılacak bir barajın su kotu 90 m üstüne çıktığı andan itibaren Alara çayı da bu sistemi besleyecektir. Vadinin derin kazmasından dolayı fosil halde yamaçlarda askıda kalmış karstik sistem, su yükseldikçe senklinal teknesini ve batıya doğru bu sistemi besleyecektir.

3.2. Litolojik Birimlerin Hidrolik Özellikleri

Alara barajı sağ sahilindeki litolojik birimlerin hidrolik özellikleri araştırma kuyularında yapılan Basınçlı Su Testlerinden (BST) yararlanılarak belirlenmiştir. İnceleme alanında, Miyosen öncesi temel kuvarsit, rekristalize kireçtaşı ve dolomitten oluşan Cebireis Formasyonu oluşturmaktadır. Bu formasyonda GA-223 nolu araştırma kuyusunda yapılan deneylerden Lugeon değerleri 0,4 ile 1,3 Lu arasında hesaplanmış olup, delinen ortam geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır.

Aksu Formasyonu; Bu formasyonda GA-201, GA-203, GA-204, GA-206, SG-207 ve SL-208 nolu araştırma kuyularında yapılan BST'den hesapalanan Lugeon değerleri yer yer 50 Lu'ya ulaşmaktadır. Bu çok geçirimli olarak sınıflandırılan birim de Lu değerleri GA-202 nolu kuyuda 0-5,9 arasında hesaplanmış olup, ortam çok düşük geçirimli olarak tanımlanmıştır. Oymapınar Formasyonu; Basınçlı Su Testleri GA-222, GA-224, GA-204, GA-206 nolu araştırma kuyularında yapılmıştır. Birçok seviyede 25 Lu üzerinde değerler (çok geçirimli) kaydedilmiştir. Lugeon değeri GA-202 nolu sondajda 0 ile 19,4 Lugeon arasında (orta geçirimli) olarak ölçülmüştür. Bu çalışma kapsamında açılan İTÜ-5 nolu araştırma kuyusunda ise 302 ile 316,5 metreler arasında delinen resifal kireçtaşlarında yapılan BST su basıncının yükselmediği, diğer bir ifadeyle ortamın çok geçirimli olduğu görülmüştür. Çakallar Formasyonunda Basınçlı Su Testleri GA-202 ve GA-217 nolu sondajlarda 0 ile 43,6 Lugeon arasında değişen değerler ölçülmüştür. Genelde geçirimsiz karakterde olan birimde çok çatlaklı seviyelerinin yüksek geçirimli özellikte olduğu görülmektedir. İTÜ-5 sondajında ise 251 - 302 metreler arasında delinen birimde 0 ile 4,5 Lugeon arasında değişen değerler ölçülmüş ve düşük geçirimlilikte olduğu görülmüştür. İTÜ-2 sondajında, İTÜ-5 sondajı gibi 0 ile 4,2 Lugeon aralığında değerler görülmüş ve birimin düşük geçirimliliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. Geceleme Formasyonu;

Bu formasyonda yapılan BST'lerinde İTÜ-5 sondajında 130 ile 251. metreler arasında 0 ile 12,3 Lugeon arasında değişen değerler ölçülmüş, ancak 130-135m, 170-175 m ve 175-210 m seviyelerinde su basıncının yükselmediği diğer bir ifadeyle çok geçirimli zonların varlığı görülmüştür. İTÜ-2 sondajında 0 ile 1,6 arasında değişen değerlere karşın 35-40m, 150-155 m, 75-85 m ve 190-195 m aralığında su basıncının yükselmediği yani çok geçirimli zonların varlığı görülmüştür. BST'de basıncın yükselmediği derinlikler üst hidrojeolojik sisteme karşılık gelmektedir.

3.3. Yeraltı Su Seviyesi ve Hidrolik Eğim

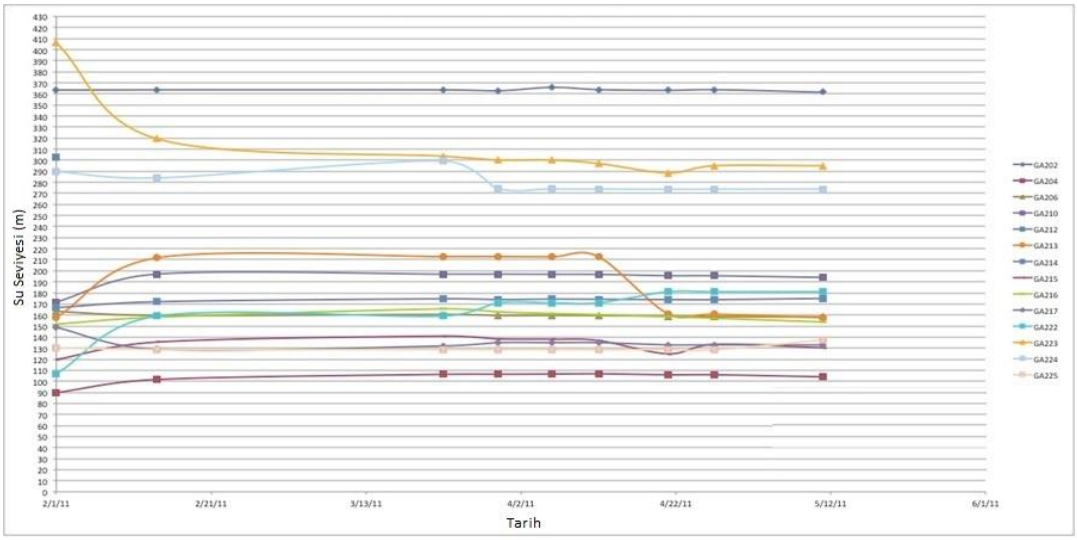
Bu çalışma kapsamında EİE tarafından açılan kuyularda ölçülen su seviyeleri Çizelge 1'de ve Şekil 2'de sunulmuştur. Bu veriler kullanılarak oluşturulan eş yeraltı su seviyesi haritası Şekil 1'de verilmiştir. Yeraltısuyu bölüm hatlarından biri GA-212 ile GA-202 kuyuları arasındadır. Bu su bölüm hattında su KB yönünde Çenger dereye doğru ve KD yönünde Alara Çayına hareket etmektedir. Burada ortalama hidrolik eğim 7/100 olup, Çenger dereye yaklaştıkça GA-215 yakınında 3/100 civarındadır.

Diğer yeraltısuyu bölüm hattı, GA-224 ile GA-222 kuyularının olduğu hattadır, buranın güneyinde su güneye Alara Çayına, kuzeyinde ise batı ve kuzey yönlerine doğru hareket ederek Çenger deresine doğru hareket etmektedir. GA-222 nolu kuyunun güneyinde hidrolik eğim 8/100, en yüksek hidrolik eğim GA-202 doğusunda 14/100 olup, en düşük hidrolik eğim 15/1000 ile İTÜ-2'nin kuzeyinde gözlenmektedir. İTÜ-2 den İTÜ-4'e çizilen hattın kuzeyinde, Çenger deresinden Alara Çayına doğru bir yeraltısuyu akımı göze çarpmaktadır.

Hazırlanan eş yeraltı su seviye haritası, Oymapınar Formasyonuna kadar delinmeyen İTÜ-4 sondajı dikkate alınmadan hazırlanmış, İTÜ-5 sondajında ise koruma borusu varken ölçülen 90 m su kotu yerine, koruma borusu yokken ölçülen 190 m su kotu dikkate alınarak çizilmiştir. Bu haliyle, hazırlanan haritadaki yeraltısuyu hem alttaki karstik birimi hem de üstteki akiferleri kesen kuyularda oluşan ortak yeraltı su seviyesini temsil eder. Oldukça engebeli bir arazide ve kaya ortamda çizilen eş yeraltı su seviyelerinin, düz bir alüvyal ovada çizilenler kadar hidrolik yapıyı yansıtması beklenemez.

Çizelge 1. Araştırma kuyuları ve yeraltısuyu kotları (Karagüzel vd. 2011)

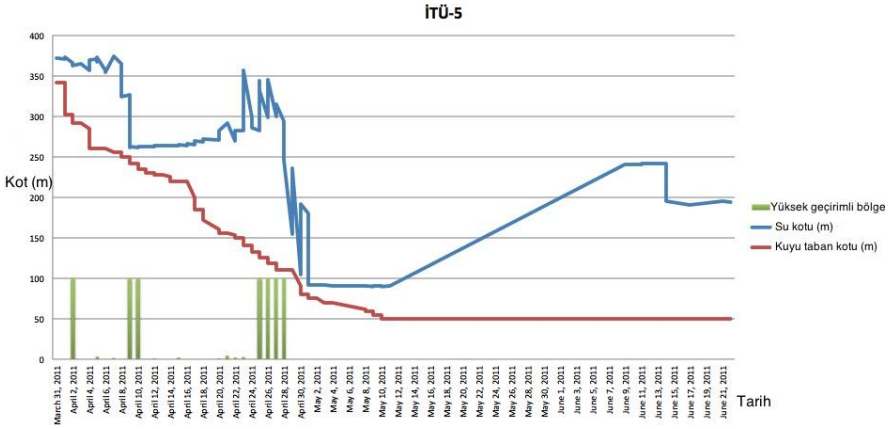
Kuyu No	Kuyu Ağız Kotu (m)	Yeraltı Suyu Derinliği 14.02.2011 (m)	Kuyu Taban Kotu (m)	EIE Yeraltı Su Kotu (m)	Yeraltı Su Kotu 14.02.2011 (m)
GA-202	380.23	16,50	100,23	363.33	363.73
GA-204	357.91	256,25	41,91	89.51	101.66
GA-206	238.01	78,45	-11,99	163.01	159.56
GA-210	210	-	-43,95	-	-
GA-212	380	-	11,85	-	-
GA-213	393.69	182,00	-6,31	157.39	211.69
GA-214	180	8,00	-73,45	166.50	172.00
GA-215	180	44,50	-186,6	119.50	135.50
GA-216	232	73,95	-178,5	151.65	158.05
GA-217	320	>191	119	148.70	<129
GA-222	471	>300	0,8	106.70	<177.5
GA-223	507	187,60	197,8	406.35	319.40
GA224	450	>166	247	289.60	<291
GA225	188	59,25	90,45	130.50	128.75
İTÜ-5	380	176,20	49,5	-	193,80
İTÜ-2	270	63,08	-100	-	206,92



Şekil 3. EIE Sondajlarında yapılan periyodik su seviyesi ölçümleri

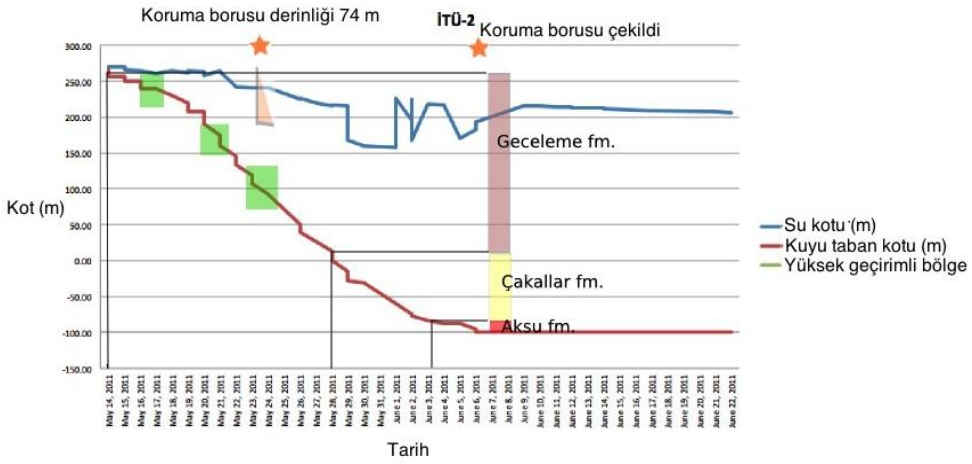
3.4 Araştırma Kuyularında Yeraltı Su Seviyelerinin Delgi Derinliği, -Tekniği ve Zamana Bağlı Değişimi

Havzalar arasındaki hidrolik ilişkinin belirlenmesi bakımından araştırma kuyularında yeraltı su seviyelerinin ve suların ait oldukları hidrojeolojik sistemin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Amaca yönelik olarak delgi derinliği ve yeraltısu seviyesini zamana bağlı değişimini karşılaştırmalı olarak gösteren grafikler hazırlanmıştır (Şekil 4-5). İTÜ-5 kuyusunda sondaj sırasında ve kuyudan koruma borusu çekildikten sonra ölçülen su seviyeleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Su seviyesindeki ilk ani düşüm, koruma borusunun 54 metreye yerleştirilmesi ile oluşmuştur. Bu Geceleme Formasyonu içerisinde geçirimli bir zonun kapatılması ile gerçekleşmiştir. Kuyu 2. Geçirimli seviyeye geldiğinde su seviyesinin aniden yükselmesine ve koruma borusunun 171 m derinliğe indirilmesiyle tekrar su seviyesinin düşmesine neden olmuştur. Kuyu çok geçirimli Oymapınar Formasyonuna girdiğinde ise su seviyesi aniden tekrar düşmüştür. Suyu boşalan kuyuda vakum etkisi gelişmiştir. Vakum etkisinin sondaj delgi takımını bile içe çekmeye çalışacak güçte olması karstik sistemin iyi gelişmiş, yaygın ve açık bir sistem olduğunu göstermektedir. Kuyu tamamlanıp, koruma borusu çekilmeden önce 90 m kotunda olan su seviyesi, koruma borusu çekildikten sonra kısa zamanda 241 m kotuna yükselmiş, daha sonra yeraltı su seviyesi 190-195 m kot aralığında sabitlenmiştir. Buna oldukça benzer YAS değişimleri EİE tarafından açılan GA-202 ve GA-203 ve GA-214 nolu araştırma kuyularında da rastlanmıştır.



Şekil 4. İTÜ-5 kuyusunda sondaj sırasında ve sondaj tamamlandıktan sonra gözlenen su seviyeleri (Karagüzel vd. 2011)

İTÜ-2 kuyusunda sondaj sırasında ve kuyudan koruma borusu çekildikten sonra ölçülen su seviyeleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. İTÜ-2 kuyusunda sondaj sırasında ve sondaj bittikten sonra gözlenen su seviyeleri (Karagüzel vd. 2011)

Bu kuyuda, ilk geçirimli zon koruma borusu ile kapatıldıktan sonra bir düşüş gözlenmiş, ancak ikinci ve üçüncü geçirimli zonlar koruma borusu ile tıkanmadığı için su seviyesi sondaj sırasında gözlenen ani fakat fazla olmayan düşüş ve yükselişlerden sonra koruma borusunun çekilmesini takiben sabit kalmıştır. Araştırma sondajlarında, çok büyük karstik boşluklara rastlanan Oymapınar Formasyonunun suyu tutamadığı, hatta sondaj sirkülasyon suyunun da %100 oranında kaybolduğu ve başka bölgelere kaçırdığı gözlenmiştir. Geceleme Formasyonu ise geçirimli bölgelerinden kuyuya su veren üst hidrojeolojik sisteme ait önemli bir akifer olduğu anlaşılmıştır.

4. TARTIŞMA

Alara Barajı gölü alanı ile Çenger Dere arasındaki hidrolik bağlantı açısından iki farklı hidrojeolojik sistem önem taşımaktadır. Bunlar, geçirimsiz membran özeliğindeki Çakallar Formasyonunu altında bulunan karstik ortamlar ile üzerindeki kumtaşı ve konglomera düzeyleri bulunan hidrojeolojik sistemlerdir. Çakallar Formasyonu altında bulunan karstik resifal kireçtaşlarından oluşan Oymapınar Formasyonu ile tabanındaki karstik konglomera seviyeli Aksu Formasyonu çok yüksek geçirimli özellikteki kaya birimleridir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan yeraltısuyu seviye haritasından da kıvrımın kuzey kanadında Çenger deresinden Alara Çayına yeraltısuyu akımı görülmektedir. Seçilen baraj yerinde hedeflenen yükseklikte bir barajın yapılması durumunda sistem tersine beslenerek gölden su kaçakları olacaktır.

Senklinalinin güney kanadındaki hidrolik ilişkiyi gösteren D-B doğrultulu hidrojeolojik kesitte Alara Çayı yatağında geniş alanlarda haritalanan erime boşluklu Oymapınar Formasyonunun Çenger deresine kadar devam ettiği görülmektedir (bkz. Şekil 1). Bu doğrultu üzerindeki araştırma kuyularında da yeraltı su seviyeleri planlanan barajın hedeflenen maksimum su seviyesinin (250 m) altındadır (Şekil 1). Kesit doğrultusu üzerinde İTÜ-5 nolu kuyudaki yeraltısu seviyesi, karstik boşluklu Oymapınar Formasyonuna girildiğinde 90 m ölçülmüştür (bkz. Şekil 3). Oymapınar Formasyonu içindeki erime boşluklarda hava sirkülasyonunun oluşturduğu vakum etkisinin sondaj delgi takımını bile içe çekmeye çalışacak güçte olması karstik sistemin iyi gelişmiş, yaygın ve açık bir sistem olduğunu göstermektedir. Araştırma kuyusu açılan bölgelerde büyük karstik boşluklara rastlanan Oymapınar Formasyonunun su içermediği ve sadece üstten gelen tüm suyu başka bölgelere kaçırdığı gözlenmiştir. Barajın su kotunun 90 m üstüne çıktığı andan itibaren karstik sistemin besleneceği, yani baraj gölünden su kaçacağı anlaşılmaktadır. Bu hidrolik bağlantı Alara Çayın üzerinde yapılacak bir

baraj gölünde 250 m kotuna yükselecek su seviyesinin sebep olacağı hidrostatik basınç etkisinde daha da gelişecektir.

5. SONUÇLAR

Alara Barajı sağ sahilinde metamorfik ve sedimenter kayaçlardan oluşan temel üzerindeki Miyosen serisi kıvrımlı bir yapı sunmaktadır.

Alara Barajı göl alanı ile Çenger (?) Dere arasındaki hidrolik bağlantı açısından iki farklı hidrojeolojik sistem önem taşımaktadır. Bunlar, geçirimsiz membran özeliğindeki Çakallar Formasyonunu altında bulunan karstik ortamlar ile üzerindeki kumtaşı ve konglomera düzeyleri bulunan hidrojeolojik sistemlerdir. Yapılan araştırmalar üst hidrojeolojik sistemde yeraltısu seviyesinin planlanan barajda öngörülen maksimum su seviyesinin üzerinde olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla su kaçakları açısından hidrolik bir bariyer bulunmaktadır. Alt karstik hidrojeolojik sistemde Oymapınar Formasyonunun çok geçirimli zonları deneylerle belirlenmiştir. Senklinalin kuzey kanadında D-B doğrultulu hidrojeolojik kesit boyunca araştırma kuyularında yeraltısuyu seviyelerinin, planlanan barajın ön görülen maksimum su seviyesinin altında olması ve Oymapınar Formasyonu tavan kotu üzerine çıkamaması, vadiler arasında hidrolik bir bağlantının bulunduğunu göstermektedir.

Senklinalin güney kanadında açılan İTÜ-5 nolu araştırma kuyusunda büyük karstik boşluklara rastlanan Oymapınar Formasyonunun su içermediği, sadece üstten gelen tüm suyu başka bölgelere kaçırdığı tespit edilmiştir. Planlanan barajda su kotunun 90 m üstüne çıktığı andan itibaren karstik sistemin besleneceği, yani baraj gölünden su kaçacağı yüksek bir ihtimalle sabittir.

Tüm bu olumsuz jeolojik-hidrojeolojik koşullar birlikte değerlendirildiğinde, Alara Barajının seçilen aks yerinde yapılması halinde mevcut karstik sistemin yeni hidrostatik basınç koşullarında baraj gölünden zamanla artan su kaçaklarına neden olacaktır.

6. KATKI BELİRTME

Yazarlar, Alara Barajı ve HES projesi kapsamında yıllarca süren araştırma bulgularını bizlerle paylaştıkları ve değerli katkıları için EİE ile Borusan–EnBW Enerji Yatırımları ve Üretim A.Ş.'ye teşekkürlerini sunarlar.

7. KAYNAKLAR

EİE, 2006, Alara Barajı ve HES Master Plan Raporu, Ankara.

Temelsu, 2008, Alara Çayı Havzası Fizibilite Raporu, Ankara.

HPI, 2009, Hydroprojekt – Alara Hydroelectric Project, Verification and Optimization Report.

HPI, 2010, Hydroprojekt - Alara Hydroelectric Project, Request of Permision, First Step Geotechnical Investigation Program (Alara Dam Site, Alara Reservoir).

İslamoğlu, 2002 Antalya Miyosen Havzasının Mollusk Faunası ile Stratigrafisi (Batı-Orta Toroslar, GB Türkiye), MTA Dergisi, 123-124, 27-58, Ankara.

Karagüzel, R., Yalçin, T., Yaltırak, C., 2011, Alara Barajı ve HES Projesi, Rezervuar Alanı ile Çenger Dere Arasının Jeolojik-Hidrojeolojik Değerlendirme Raporu, İTÜ Maden Fakültesi Vakfı İktisadi İşletmesi, İstanbul

Şenel, 1997, 1:250 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Isparta Paftası,No:4, MTA Jeoloji Dairesi, Ankara.

Kahramanmaraş Orçan Bölgesi İçme Sularının Temel Kalite Özellikleri ve Çevresel İzotop İçerikleri

Basic Water Quality Properties and Environmental Isotope Content of Drinking Water In Kahramanmaraş Orçan Area

Y. Uras[1,*],M. Ünsal[2], A.Kop[1], S. Nacar[2], A. E. Yağcı[2]

[1] K.Maraş.S.İ.Ü. Jeoloji Müh. Böl.Avşar Yerleşkesi Kahramanmaraş
[2] K.Maraş.S.İ.Ü. İnşaat Müh. Böl.Avşar Yerleşkesi Kahramanmaraş
*(*yuras@ksu.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışma Kahramanmaraş ili sınırları içerisinde yeralan Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinde içmesuyu olarak kullanılmakta olan soğuk suların kalitesi ve çevresel izotop içerikleri incelenmiştir. Kahramanmaraş merkezinin güneybatısında önemli bir su potansiyeline sahip olan bölgede Uzunsöğüt, Aydınkavak, Kırmakaya, Yeşilyöre, Önsenhopuru, Doluca, Yavuzlar, Yolderesi yerleşim birimleri yeralmaktadır. Triyas-Kretase yaşlı Andırın Kireçtaşı ana akifer niteliğinde olup Türkoğlu-Orçan bölgesinin içme su kaynaklarının önemli bir bölümü bu akiferden sağlanmaktadır. Adı geçen köylerden bir yıl boyunca her ay su numuneleri alınmış olup, sıcaklık, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen, pH, nitrat, sülfat ve bulanıklık analizleri ve ^{18}O, ^{2}H ve ^{3}H analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen su kaynakları analiz edilen parametreler açısından içmesuyu standartlarına ve sulamaya uygun kalitede sulardır.

Anahtar Kelimeler: Kahramanmaraş, Türkoğlu Orçan Bölgesi, Su Kalitesi, Çevresel İzotop

ABSTRACT:*In this study, water quality and isotope content of drinking water sources in the province of Kahramanmaras Türkoğlu Orçan were investigated. This province which is situated to the southwest of Kahramanmaras consists of 8 villagesnamely Uzunsöğüt, Aydınkavak, Kırmakaya, Doluca, Yeşilyöre, Önsenhopur, Yavuzlar, and Yoldere.The Triassic-Cretaceous Andırın limestone forms the productive aquifer that supplies drinking water to the above listed villages.Samples collected on monthly basis were measured and analyzed forenvironmental isotopes* such as *^{18}O, ^{2}H and ^{3}H as well as temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, nitrate, sulphate, and turbidity. Based on the results, it was concluded that the sampled waters are suitable for drinking water by some of the water quality parameters and for irrigation water purposes.*

Keywords: *Türkoğlu Orçan Region, Water Quality, Environmental Isotope*

1.GİRİŞ

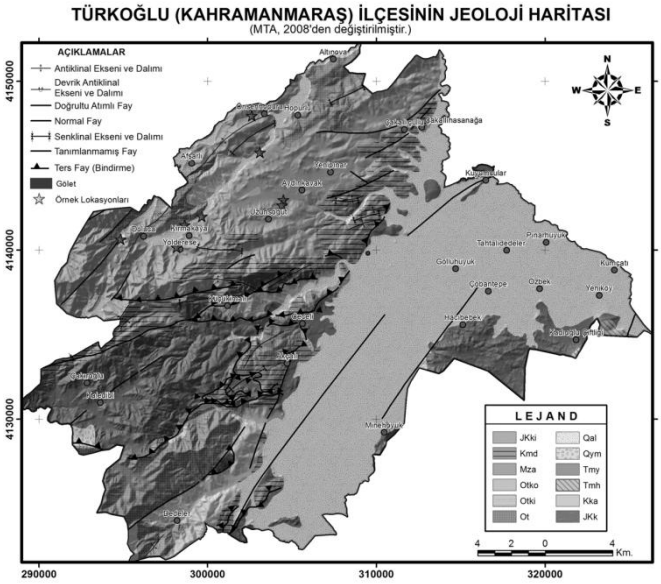
Son yıllarda hızlı nüfus artışı, endüstrileşmenin muazzam bir hızla gelişimi ve çarpık kentleşme nedeniyle su ve su kaynaklarına olan ihtiyaç giderek artmış, bunun sonucunda ise su kirlenmesi problemi ortaya çıkmıştır. Dünyada belirli bir miktarda bulunan su, sürekli bir döngü içerisinde hareket etmektedir.İnsanın en zaruri ihtiyaç maddesi olan suyun, halk sağlığı ile yakın ilgisi dolayısı ile bazı kriterlere uygun olması istenir. Suyun içinde çökebilen, askıda, kolloid ve çözünmüş halde bulunan maddeler sağlığa, iletim ve biriktirme tesislerine zarar vermemelidir. Suyun kalitesinde istenen özellikler, kullanılış yerine bağlı olarak bazı değişiklikler göstermekle beraber, uygun bir içme suyunda aşağıda belirtilen kalite şartları aranır.İyi bir içme suyu, kokusuz, renksiz, berrak ve içimi serinletici olmalıdır. İçimi hoş, tercihen 15 C°'den aşağı sıcaklıkta olmalıdır. Yeterli derecede yumuşak olmalıdır. Korozotif veya borularda taş yapmamalıdır. Toksik ve zararlı maddeler ihtiva etmemelidir. Hastalık yapıcı (patojen) mikroorganizmalar ihtiva etmemelidir. Bol miktarda ve fiyatı ekonomik olmalıdır. Önsenhopuru Köyü (ON-1), Yeşilyöre Belediyesi (YE-2), Kırmakaya Köyü (KM-3), Yolderesi Köyü (YO-4), Doluca Köyü (DO-5), Yavuzlar Köyü (YA-6) ,Uzunsöğüt Köyü (UZ-7) ,Aydınkavak Köyü'(AY-8)nden oluşan 8 ayrı noktadan su örnekleri alınmıştır(Şekil 1). Bu köylerin içme su kaynaklarından bir yıl boyunca bir aylık

periyodlarla su kimyası ve izotop amaçlı örnekleme yapılmıştır. Çalışma konusunu oluşturan su örneklerinden elde edilen veriler ile kökenleri ve içilebilirliği araştırılmıştır.

Şekil 1.İnceleme alanının ve yerbulduru haritası

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

Çok genel olarak Kahramanmaraş ili ve civarı Anadolu ve Arabistan levhalarının birbirleri ile kenetlendiği orojenik kuşak üzerinde yer almaktadır. Bu kuşağın hemen güneyinde allokton konumlu Koçali Karmaşığı'na ait litolojilerin yüzeylendiği alan ve daha güneyde ise Amanoslar'ın ana kütlesi ve Arabistan levhasına ait litolojiler bulunmaktadır. Gül (2000), Kahramanmaraş ve yakın civarını "Orojenik Kuşak", bu alanın güneyinde allokton konumlu Koçali Karmaşığı'na ait litolojilerin yüzeylediği alanı "Kenar Kıvrım Kuşağı", daha güneyde tektoniğin etkili olduğu alanı "Kıvrım Kuşağı" ve en güneyde tektoniğin etkisinin azaldığı alanı ise "Ön Ülke olarak adlandırmıştır.Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme Sularının bulunduğu çalışma alanının jeoloji haritası revize edilmiştir (Şekil 2). İçme suyu kaynaklarının bulunduğu Triyas-Kretase yaşlı kireçtaşları, Ayaşlıoğlu ve diğ. (1970) tarafından ilk kez, Andırın kireçtaşı (Mza) adı verilerek tanıtılmıştır. Sürgü-Elbistan faylarının kuzeyi ile Andırın Bindirme kuşağının batısında oldukça geniş alanlarda yayılım gösteren birim oldukça sarp bir morfolojik görünüm sunmaktadır. Birimi oluşturan kireçtaşları, yerel renk farklılığı sunan, gri-koyu gri, beyaz, sarımsı renkli, ince-orta-kalın tabakalı, yer yer masif, oldukça karstik, erime boşluklu, erime yüzeyli, genellikle sağlam-çok sağlam dayanımlı, üst düzeyleri çört, ya da resifal kireçtaşı arakatkılıdır. Bazen bol fosil kavkılı olan birim, oldukça tektonize, çok çatlaklı ve eklemlidir. Çatlaklar kalsit dolguludur. Yer yer rekristalize kireçtaşı özellikleri sunan birim, sparitik ya da mikritik dokuludur. Çalışma alanında güneye ve doğuya itilmiş, dilimlerden oluşan, naplar halinde izlenmektedir. Sürgü Fayı'nın kuzeyinde Permiyen ve öncesi yaşlı Yoncayolu, Çayderesi Nergile formasyonları, Berit Metaofiyoliti, Eosen yaşlı Ballıkısık formasyonu üzerinde tektonik dokanakla yer almaktadır. Üst Triyas-Jura-Alt Kretase yaşındadır (Kozlu 1987; Perinçek ve Kozlu 1984). Andırın Kireçtaşı, Bolkardağı-Aladağ yörelerinde Bozkır birliği içerisindeki Beyaz Aladağ (Tekeli ve diğ., 1984), tektonik dilimi ile deneştirilebilir (Özgül, 1976)



Şekil 2. İnceleme alanını kapsayan bölgenin sadeleştirilmiş jeoloji haritası(MTA 2008)

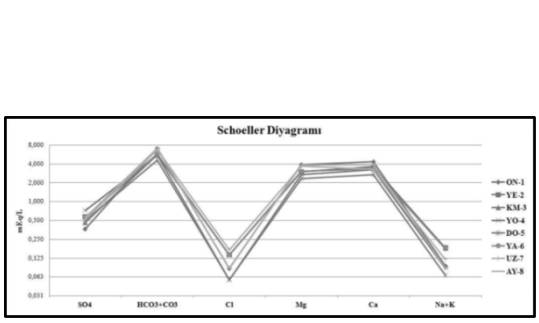
3.İKLİMSEL ÖZELLİKLER

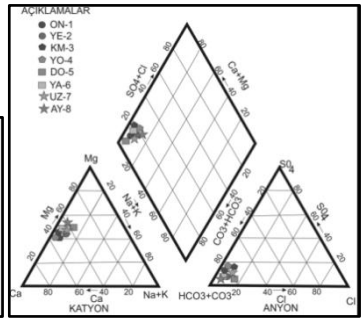
Üç ayrı coğrafi bölgenin (Akdeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi) birbirine en çok yaklaştığı alandaki coğrafi konumu nedeniyle Kahramanmaraş ilinde üç farklı iklim tipi bir arada gözlenebilmektedir. Artan yükseltiye bağlı olarak ilin kuzey kesimleri tamamen karasal, güney kesimleri ise genel olarak, "Bozulmuş Akdeniz İklimi''ne daha yakın bir iklim özelliğine sahiptir. Bu nedenle inceleme alanında genel olarak yazların sıcak ve kurak, kışların ise yağışlı ve ılıman olduğu söylenebilir. Uzun yıllar (1970-2012) aylık toplam yağış ortalaması verilerine (DMİ, 2012) göre çalışma alanı ve civarında Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında 40 mm'nin üzerinde yağış ortalamaları olduğu, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında ise yağış ortalaması değerlerinin 10 mm'nin altında olduğu söylenebilir Buna göre kış ve bahar aylarında bölgenin sürekli yağış aldığı, yaz aylarının ise kurak geçtiği görülmektedir. Uzun yıllar (1970-2012) aylık maksimum yağış değerlerine göre (DMİ, 2012) çalışma alanında Aralık, Ocak ve Şubat aylarında 100 mm'yi aşacak şekilde yoğun yağışların olduğu, Haziran-Eylül arasındaki dönemde ise yağış miktarının 10 mm'nin altına düştüğü söylenebilir. Uzun yıllar (1970-2012) aylık maksimum kar kalınlığı verilerine göre (DMİ, 2012) Aralık-Mart döneminde inceleme alanın karla örtülü olduğu, en kalın kar kalınlığına ise Şubat ayında ulaşıldığı belirlenmiştir Yağışlı ve ılıman iklim özellikleri nedeniyle yüzey suları bakımından zengin bir konuma sahip olan çalışma alanında geniş bir alanda yüzeyleyen Andırın Kireçtaşı formasyonu yoğun tektonik etkiler nedeniyle oldukça bol eklemli ve kırıklı bir yapı sunmaktadır. Bu yapı, Andırın Kireçtaşı formasyonu yüzey sularının daha aşağılara süzülmesini sağlayacak şekilde geçirimli olmasına ve derine süzülen sularının yer altında depolanabileceği uygun bir akifer niteliği kazanmasına neden olmaktadır.

4.HİDROKİMYASAL ÖZELLİKLER

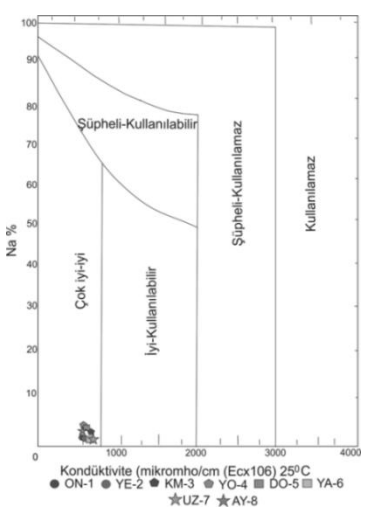
İnceleme alanındaki içme su kaynaklarının sıcaklıkları 8-25ºC arasında değişim göstermiştir Araştırma süresince tespit edilen çözünmüş oksijen miktarı 4.1 mg/l ile 7.2 mg/l arasında değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Sulardaki iletkenlik direkt olarak suda bulunan toplam çözünmüş katı madde miktarıyla orantılı olduğundan önemli bir parametredir. Araştırma süresince tespit edilen elektriksel iletkenlik değerleri 341 µmhos/cm ile 736 µmhos/cm arasında değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Dünya Sağlık Örgütü, TS-266 ve Avrupa Sağlık Örgütlerinin de öngördüğü elektriksel iletkenlik değeri 400 µmhos/cm ile 2000 µmhos/cm konsantrasyonu değerleri arasındadır. Bu çalışmada belirlenen değerlerin standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. İçme suyu standartları açısından pH' ın 6,5-8,5 arasında olması gerekmektedir. Araştırma süresince tespit edilen pH 6,87 ile 7,78 arasında değişim

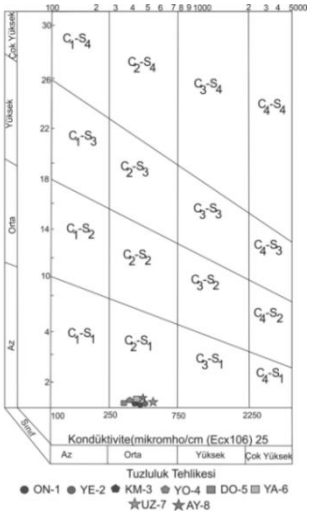
gösterdiği belirlenmiştir.Su kalite kriterlerine göre nitrat konsantrasyonu en yüksek 50 mg/l olmalıdır. Araştırmanın yapıldığı kaynak ve kuyularda nitrat konsantrasyonu en yüksek (50,60 mg/l) olarak Önsenhopuru Köyü 2013-Nisan ayı ve (50,91 mg/l) Uzunsöğüt Köyü 2013-Haziran ayı numunelerinde tespit edilmiştir. Diğer numunelerin tamamının 50 mg/l'nin altına kaldığı tespit edilmiştir. Bu değerler içme suyu kalite standartları açısından incelendiğinde, tavsiye edilen miktarın altında kalmaktadır. İçme suyu kaynaklarının çevresinde endüstriyel kuruluşların olmayışı, yerleşim alanlarının da az olması, tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan azot bileşiklerinin su kaynaklarına az miktarda ulaştığının bir göstergesidir. Bu değerler içme suyu standartları açısından uygun olup, kıta içi su kalite kriterlerine göre 1. Sınıf sular grubuna dahil olduğunun göstergesidir. Araştırmanın yapıldığı kaynak ve kuyularda sülfat parametresi en yüksek (108,36 mg/lt) olarak Yolderesi Köyü 2013-Şubat ayı ve en düşük (6,21 mg/l) Aydınkavak Köyü 2012-Ekim ayı numunelerinde tespit edilmiştir. Standartlarla karşılaştırıldığında, insani tüketim amaçlı sularda Dünya Sağlık Örgütü bu sınırı 500 mg/l, Avrupa Standartları 250 mg/l olarak belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar standartlarda belirtilen sınırların çok altındadır bu nedenden dolayı kullanılan kaynak ve kuyularda bulunan sülfat miktarı standartlar tarafından uygun kabul edilebilir düzeydedir. Sularda Ca, Mg, ve HCO_3iyonları hakimdir. Bu durumda sert sular sınıfındadır. Kaynakların birbirleri arasındaki kökensel ilişkileri Schoeller diyagramı (Şekil 3) ile incelendiğinde iyonları birleştiren doğrular birbirine paralel geçmekte olup, aynı kökenlidir. Kaynakların kimyasal bileşimindeki benzerlik aynı litolojilerden geçtiği anlamına gelmektedir (Çizelge 1). Piper (Piper,1944)diyagramına göre içme su kaynakları $CaCO_3$ ve $MgCO_3$'lı sular gurubuna girmektedir (Şekil 4). Wilcox diyagramına göre çok iyi-iyi(Şekil 5), ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre ise C2-S1 sular sınıfındadır(Şekil 6).





Şekil 3. Suların Schoeller diyagramı Şekil 4.Suların Piper diyagramı





Şekil 5. Suların Wilcox diyagramı Şekil 6.ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı

Çizelge 1. İnceleme alanındaki suların fiziko-kimyasal analiz sonuçları

23.03.2013	ON-1	YE-2	KM-3	YO-4	DO-5	YA-6	UZ-7	AY-8
Sıcaklık (^{O}C)	18	16	16	17	15	17	17	17
pH	7.43	7.32	7.43	7.41	7.42	7.26	7.20	7.24
EC(mS/cm)	654	745	501	467	432	545	682	614
Ca ppm	80.73	67.63	65.00	62.64	61.38	69.47	81.34	85.30
Mg ppm	47.64	32.79	33.67	33.02	38.03	38.32	43.79	45.38
Na ppb	1.65	3.32	3.43	1.65	1.23	3.65	2.72	1.84
K ppm	0.32	1.42	1.23	0.32	0.23	0.54	0.40	0.27
HCO_3(mg/L)	422.10	354.52	371.50	343.50	270.53	342.76	434.50	233.10
CO_3 ppm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO_4 ppm	16.45	23.72	21.03	32.61	22.54	26.77	23.74	20.63
Cl ppm	3.5	5.0	5.0	2.0	2.0	5.0	6.0	3.0
Fe ppb	9.0	10	10	10	10	10	10	10
Cu ppb	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
Al ppb	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mn ppb	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NO_3 ppm	32.23	32.41	22.06	16.98	13.45	20.69	35.54	25.45
Sertlik Fr	20	24	23	26	29	20	23	27

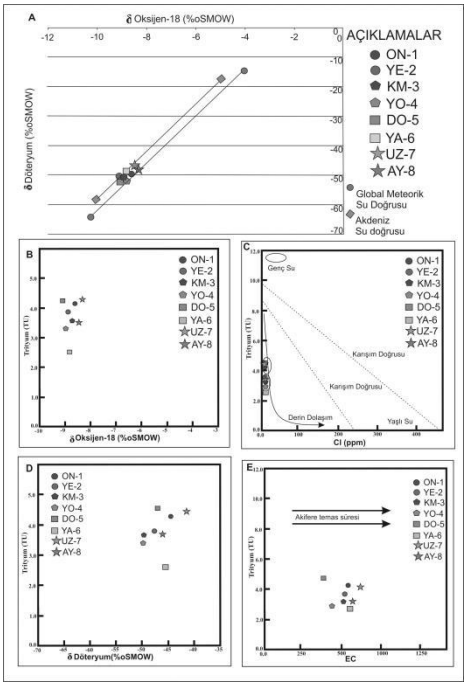
5.ÇEVRESEL İZOTOP İÇERİĞİ

Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin içme sularının çevresel izotop içerikleri incelenerek kökenleri, beslenme alanları, su-kayaç etkileşim süreleri belirlenmeye çalışılmıştır. İzotop analizleri DSİ TAK dairesinde yapılmıştır (Çizelge 2).Bilindiği gibi oksijen ve hidrojen su molekülünü oluşturan iki element olduklarından dolayı oksijen-18, döteryum ve trityum izotopları hidrolojik çevrimin çeşitli kesimlerindeki su hareketlerinin incelenmesi için izleyici olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir bölgedeki suların izotopik açıdan karakterizasyonu, ^{18}O ile döteryum arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir regresyon denklemiyle tanımlanabilmektedir. Bu ilişki ilk olarak Craig (1961) tarafından küresel yağışların ortalaması için D=8*^{18}O+10 şeklinde ve Dünya Meteorik Doğrusuolarak tanımlanmıştır. Türkoğlu- Orcan yöresi içme sularının ^{18}O ve döteryum değerlerinin Dünya Meteorik Doğrusu ile doğu Akdeniz bölgesi yağışlarını temsil eden Doğu Akdeniz Meteorik doğrusu arasında yeralmaktadır. (Şekil 7a). Suların trityum içerikleri ile nispeten genç yeraltısularının bağıl yaş ve geçiş süreleri belirlenmektedir.Oksijen-18 ve trityum arasındaki ilişkiye göre incelenen su kaynaklarının hepsinin yeraltında kalış sürelerinin yaklaşık aynı olduğu görülmektedir (Şekil 7b).

Çizelge 2Orçan(Türkoğlu-Kahramanmaraş) İçme Su Kaynaklarına ait izotop analiz sonuçları

Orçan(Türkoğlu-Kahramanmaraş) İçme Su Kaynakları	Tarih	δ^{18}O (%)	δ^{2}H(%)	Trityum (TU)
ON-1	16.01.2014	-8.21	-44.68	4.42
YO-2	16.01.2014	-8.74	-46.15	3.84
KM-3	16.01.2014	-8.59	-47.70	3.64
YO-4	16.01.2014	-8.85	-48.02	3.04
DO-5	16.01.2014	-8.88	-47.89	4.55
YA-6	16.01.2014	-8.44	-45.98	2.58
UZ-7	16.01.2014	-8.10	-43.19	4.36
AY-8	16.01.2014	-8.33	-45.82	3.75

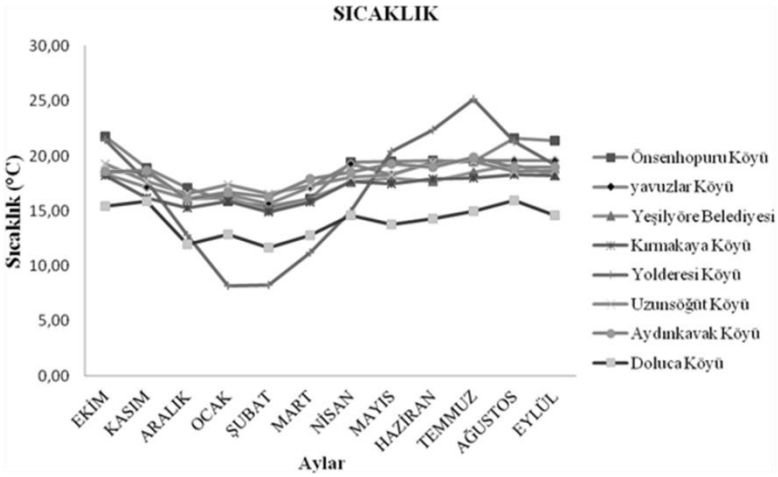
Cl-Trityum ilişkisine göre kaynak suları yüksek trityum ve düşük Cl içerikleri ile genç sular grubuna düşmektedir (Şekil 7c). Meteorik kökenli olan kaynak sularında yeraltında dolaşım yolu uzadıkça trityum izotopunun radyoaktif bozunmaya uğraması nedeniyle trityum değerinin düşmesine neden olur. Döteryum-trityum ilişkisinde UZ-7 nolu Uzunsöğüt su kaynağının diğer su kaynaklarına göre daha derin dolaşım izlediği söylenebilir (Şekil 7D). Trityum-EC grafiğine göre yüksek trityum düşük EC değerleri geçiş süresinin kısa olmasına işaret etmektedir. Trityum verilerine göre Yavuzlar Köyü (YA-6) ve Yolderesi köyü (YO-4) içme suyu kaynakları diğer kaynaklara göre daha kısa geçiş süresine sahiptirler (Şekil 7E).



Şekil 7.a)^{18}O-Döteryum grafiği **b)**^{18}O-Trityum grafiği **c)** Cl-Trityum grafiği
d)Trityum-Döteryum grafiği **e)**Trityum-EC grafiği

6. SONUÇLAR

Bu çalışma Akdeniz bölgesi Kahramanmaraş ili sınırları içerisinde yeralan Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme Sularının bazı hidrojeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Toplam 8 adet örnekleme noktası tespit edilmiştir. Kahramanmaraş Türkoğlu-Orçan Bölgesinde yer alan Uzunsöğüt, Aydınkavak, Kırmakaya, Yolderesi, Doluca, Yavuzlar, Önsenhopuru köylerine ve Yeşilyöre belediyesine içme suyu temini amaçlı kullanılan kuyu ve kaynaklardan aylık periyotlarla bir yıl süresince örnekler alınmıştır. Elde edilen su örneklerinden yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.Triyas-Kretase yaşlı Andırın Kireçtaşı formasyonundan boşalan Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme su kaynakları kireçtaşlarının içinden gelmektedir.Çalışma alanının çevresini kireçtaşları ile çevrili olması çatlaklı ve kırıklı yapılı olması yüksek permabiliteden dolayı akifer kalitesi üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme Su Kaynaklarının sıcaklığı bir yıl süresince bir aylık aralıklarla ölçülmüş ve sıcaklıkların 8^0C-25^0C arasında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8). . Elde edilen değerlere göre, örneklenen su kaynakları incelenen parametreler açısından içmeuyu ve sulama suyu olarak kullanıma uygun bulunmuştur.



Şekil 8. Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) bölgesi içme suyu sıcaklık grafiği

Bu değerler ile IAH'a göre soğuk su sınıfında olan kaynaklarda sertlik değerleri ise 20FS^{0}olarak belirlenmiştir. Bölgede önceden yapılan çalışmalarda Kahramanmaraş'ın yeraltısularının genel olarak sert sular olduğu belirtilmektedir (Uras 2015). Dolayısıyla Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme Sularının da sertlik değerinin yüksek olması bölgedeki litoloji ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Suların elektriksel iletkenlik değerleri (407-687µmhos/cm) ve Na değerleri Wilcox diyagramı ve ABD tuzluluk diyagramlarıyla değerlendirilmiş ve Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin İçme sularının orta tuzlu az sodyumlu ve çok iyi- iyi sular sınıfında olduğu belirlenmiştir.Piper diyagramına göre 5. bölgeye düşmektedir. Karbonat sertliği %50 den fazladır.. Bunlar $CaCO_3$ ve $MgCO_3$ 'lu sular sınıfına girmektedir.Schoeller Diyagramında kaynak sularının mg/l değerlerini birleştiren doğruların birbirine paralel geçtiği görülmektedir. Buda bu suların aynı akiferden beslendiğini göstermektedir. Ca veMg iyonları yüksek değerde gözlenmiştir Türkoğlu-Orçan (Kahramanmaraş) Bölgesinin içme sularının izotop içerikleri değerlendirildiğinde döteryum ve oksijen 18 grafiğine baktığımızda DünyaMeteorik Doğrusu ile ve Doğu Akdeniz Meteorik Doğrusu arasında yeralmaktadır.^{18}O-trityum grafiğinegöre Yavuzlar Köyü(YA-8)düşük kotlardan güncel yağış sularıyla beslenmiştir. Cl-trityum grafiğine göre yüksek trityum düşük Cl içeriği bakımından diyagramda genç sular grubuna düşmektedir. Döteryum-trityum ilişkisi ise UZ-7 nolu Uzunsöğüt su kaynağı derin dolaşım diğer su kaynakları ise sığ bir dolaşım sunmaktadır.Oksijen-18 ve Tirityum değerlendirilmesinde bütün su kaynaklarının aynı yaşa sahip olduğu grafikte görülmektedir. Trityum-EC grafiğine göre yüksek trityum düşük EC geçiş süresinin kısa olmasına işaret etmektedir.

7. KAYNAKLAR

Ayaslıoğlu, Y,1970 Berke projesi-Berke barajı mühendislik jeolojisiplanlama raporu, DSİ

Craig, H,1961 Isotopicvariations in meteoricwater, Science 133 1702-1703

Devlet Meteoroloji Işleri Genel Müdürlüğü, 2014.

Gül, M, 2000, Kahramanmaraş Yöresinin Jeolojisi. Hacettepe Üniv, Fen Bilimleri Enstitüsü, 304 s.

Güler, Ç, 1997. Su Kalitesi - Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi No: 43 Ankara.

Kozlu, H, 1987. Misis-Andırın Dolaylarının Stratigrafisi ve Yapısal Evrimi, Türkiye 7. Petrol. Kongresi, Ankara, s. 104-113.

Kuleli, S, 1995. Çevre ve İnsan Dergisi,

Özgül, N, 1976. Toroslar'da bazı temel jeoloji özellikleri :Türkiye Jeol.Kur.Bült., 19, 65-78.

Perinçek, D., Kozlu, H., 1984, Stratigraphy and structural relations of the units in the Afşin -Elbistan - Doğanşehir region (eastern Tauros).In: Geology of Tauros belt (eds., O.Tekeli and M.C. Göncüoğlu). MTA , p.181-198

Piper, A. M, 1944. Graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. Transactions, American Geophysical Union, 25, pp. 914–923.

Schoeller, H, 1962. Les eaux soutterraines. Mason et cie.,Paris.
Su Kirliliği ve Kontrolu¨ Yönetmeliği (SKKY). 2004. 31 Aralık25687 sayılı Resmi Gazete.
World Health Organization (WHO). 1985. Health hazardsfrom nitrates in drinking water. WHO Regional Office forEurope, Copenhagen.
World Health Organization (WHO). 2011. The Guidelines forDrinking-Water Quality (4th ed.). World Health Organization,Geneva.
Uras , Y., Uysal ,Y.,Arıkan, T., Kop, A., Çalışkan, M., 2015 Hydrogeochemistry of the drinking water sourcesof Derebogazi Village (Kahramanmaras) and their effectson human healthEnviron Geochem Health volume 37issue 3 page:475–490
Uyak, V, 1999. İçme Sularının Özellikleri, Kalite Parametreleri ve Kirleticilerin Sağlık Etkileri, Denizli.
Tekeli, O., Göncüoğlu,M. C., 1984. Geology of the Taurus Belt da.,Proceedings Int.Sym., 26-29 Eylül, 143-158, Ankara.

Artvin Barajı ve HES Projesi: Enjeksiyon Çalışmaları

Grouting Works in Project of Artvin Dam and HEPP

S. Altuğ[1,*], C. Tezel[2], F. Demirkazık[3]

[1] *Altuğ Jeoteknik-Enjeksiyon Danışmanlık Ltd. Şti. Çankaya/Ankara*
[2] *Doğuş İnş.ve Tic. A.Ş. Esenyaka Köyü Mevkii Yusufeli/Artvin*
[3] *Ayson Geot.ve Deniz İnş. A.Ş. Esenyaka Köyü Mevkii Yusufeli/Artvin*
*(*saydin.altug@gmail.com)*

ÖZ: Çoruh Nehri üzerinde yer alan ve 180 metre yüksekliğindeki kemer-ağırlık tipindeki Artvin Barajı, Artvin iline 43 km mesafededir. İnşa halinde olan barajın santral kurulu gücü 332MW, yıllık üretim 1 milyon kWh'tir. Baraj gövde betonu Nisan 2015 tarihinde tamamlanmıştır; su tutma işlemine 2015 Ağustos sonunda başlanılması planlanmıştır. Baraj yerindeki temel kaya genellikle metalitik-tüf-metalav ve fillatlardan oluşmaktadır. Baraj enjeksiyon perdesine baraj temeli konsolidasyon enjeksiyonu sonrası test panelin yapıldığı 344.50 kotundaki galeriden başlanılmıştır. Perde geometrisinin 344.50, 419.50, 479.50 kotundaki galerilerden ve 515.00 kotundaki kretten yapılacak paneller ile tamamlanması projelendirilmiştir. Enjeksiyonda incelik modülü yüksek çimento, süper akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkılardan oluşan düşük viskozite ve kohezyonlu bentonitsiz karışımlar kullanılmıştır. Aşağıdan yukarı kotlara doğru yapılan enjeksiyonda 419.50 kotuna kadar tüm işlemler tamamlanmıştır (delgi 75 420.55m, enjeksiyon-katı madde 1688878.22 kg ve ortalama katı madde alışı temel kayasının geçirimsizlik mertebelerine bağımlı olarak22,4 kg/m).

Anahtar Kelimeler: Perde, Geometri, Enjeksiyon, Alış

ABSTRACT: *Artvin Dam of 180 meters high and concrete-arch gravity type which issituated on Çoruh River is at a distance of 43 km to Artvin province. The dam which is still under construction, is planned for an installed capacity of power house of 332 MW and an annual production of 1 million kWh. The dam-body concrete was completed on April 2015; impoundment was planned to commence at the end of August 2015. The dam-foundation rock is generally consisting of meta-lithic tuff, meta-lava and phyllite. Dam-grout curtain was started at the gallery of el.344.50 in which the test-panel was executed, after completion of dam foundation-grouting. The project of dam-grout curtain geometry was planned by the panels to be executed from the galleries of el. 344.50, 419.50, 479.50 and dam crest of el. 515.00. The grout-mixes which are composed of cement with high modulus of fineness, super plasticizer–accelerator additives and with low viscosity–cohesion and without bentonite were used. All grouting works werecompleted up to el. of 419.50, by performing to start from the lowest elevations to higher ones (drilling 75 420.55m, grout-dry material 1688878.22 kg,average take depending on the imperviousness rates of foundation rock 22.4 kg/m).*

Keywords: *Curtain, Geometry, Grouting, Take*

1. GİRİŞ

Artvin barajı ve HES projesi Artvin ilinin 43 km güneybatısında Çoruh Nehri üzerinde yer almaktadır.Proje 180 m yüksekliğinde beton-kemer ağırlık tipi baraj ve kurulu gücü 332 MW olan santraldan oluşmaktadır. Baraj gövde kazısı 01.02.2012 ve beton dökümü 03.08.2103 tarihinde başlamıştır. 2015 Ağustos sonu su tutulması planlanan barajın 419,50 kotuna kadar tüm enjeksiyon işlemleri tamamlanmıştır. Ayrıca, baraj kret kotu (515,00) dahil 419,50 kotu üzerindeki bütün panellerin enjeksiyon yapım yöntemleri hazırlanmıştır.

Bildiri kapsamında, Atrvin Barajı eksen yerinin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri verilmiş ve projedeki temel kayaların su tutma özelliklerinin iyileştirilmesi amacına yönelik alınan enjeksiyon önlemlerinin tekniği ve sonuçları belirtilmiştir. Amaç, BST değerlerine göre genel olarak süreksizlik

düzlemleri boyunca düşük mertebede geçirimlilik sunan temel kayasının su tutma yönünden özelliklerini belirtmektir. Baraj temeli ve yamaç konsolidasyonunda, hetorejen yapısal nitelikli kayaçta farklı oturmalardan kaçınmak ve taşıma gücünün eşit olarak dağılması için kayacın monolitik bir yapı kazanmasına yönelik GIN enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Basınç (P) x Hacim ilşkisi ile zayıf nitelikli kayacın ve betonun deforme olmasının önüne geçilmiştir.

Delgi örneğinde zamanlama yönünden değerlendirmenin daha kısa zamanda yapıldığı 10 m'lik ano sistemi tercih edilmiştir. Sistemde birincil (P) kuyularının arası 10,0 m, ikincil (S) kuyularının 5,0 m ve üçüncül (T) kuyuların 2,5 m'dir. Ayrıca 1,25 m aralıklı dördüncül (Q) kuyularının üçüncül (T) kuyularının her iki tarafında açılması için alışın 30 kg/m veya üzerinde olması kriteri uygulanmıştır.

2. BARAJ YERİNDE LİTOLOJİK BİRİMLER VE EKLEMLENME ÖZELLİKLERİ

Baraj yerinde temel kayası olarak Paleozoyik yaşlı metalitik-tüf, metalav ve fillatlar yer almaktadır. Egemen birim metalitik-tüf olup daha ziyade sağ yamacın iç kısımlarında tüf aratabakalı fillatlar bulunmaktadır. Tüflerdeki tabakalar KD doğrultulu ve GD yarı-düşey eğimli olup flllatlardaki yapraklanma tüfllerdeki tabakalanma ile uyumludur.

Baraj inşaatı öncesi araştırma galerilerinde yapılan ölçümlerin Schimidt eşit alan izdüşümündeki yoğunluklarına göre birincil eklem takımı sol sahilde $K85^0D\ 80^0KB$ ve sağ sahilde $K25^0D\ 70^0GD$ duruşludur. Baraj yerindeki çalışmalarda 10 adet fay tanımlanmıştır; faylardan duraylılık yönünden en önemlisi 8-50 cm genişliğinde ezilme zonlu ve kalın kalsit damarlı $K7^0$-40^0B doğrultulu ve19^0-40^0 GB eğimli F-5 fayıdır (EPDC,1990, Ayson-Altuğ,2013).

3. HİDROJEOLOJİ

G0 galerisindeano başı kuyularındaki ölçümler Yeraltısuyu(YAS) seviyesinin kurak mevsimlerde 344,50 kotunun altında, yağışlı mevsimlerde yersel olarak 344,50 kotunun biraz üzerinde oluğunu işaret etmektedir. Baraj yapımı öncesi yapılan araştırmalara göre sağ sahil yamacında YAS seviyesi vadiden uzaklaştıkça yükselmekte, buna karşın sol sahilde daha düşük açıyla yamaç içine doğru devam etmektedir. BST sonuçları göz önüne alındığında,tüm birimler bölgesel hidrojeolojik nitelikleri yönünden geçirimsiz-yarı geçirimli kayaç sınıfındadır. Tektonik hareketler sonucu gelişen fay ve eklem sistemleri dolayısıyla kayaçlarda ikincil yarı-geçirimlilik oluşmuştur.

4. BATARDOLAR VE BARAJENJEKSİYON PERDESİ GEOMETRİSİ

Birbiriyle irtibatlı ortalama 35 m derinliğindeki kesişen fore kazık sistemiyle memba ve mansap batardolarının geçirimsizliği alüvyon sahada sağlanmış ve üçgen alanlı kaya bölümünde geçirimsizlik için enjeksiyon perdesi projelendirilmiştir. Batardolar arası kazı alanına gelebilecek su miktarı toplam 80 L/s (günlük yağışın 10 mm'den fazla olması ve yağışın yüzeysel akışa geçmesi durumunda ilaveten 260 L/s) olarak hesap edilmiştir (Altuğ, 2014). Kazı alanına yeraltısuyu ve yüzeysel akışla gelebilecek suya karşı önlemler uygulama paftasında batardoların konumuna göre yerleri projelendirilen pompaj kuyuları ile belirtilmiştir(Doğuş-Teknik Müh., 2012).

Baraj enjeksiyon perdesi geometrisi 344,50, 419,50, 479,50 kotundaki galerilerden ve 515,00 kotundaki baraj kretinden yapılacak panelleri kapsamaktadır. Enjeksiyon perdesi taban seviyesi 344,50 kotundaki galeriden yapılan Test Panel sonrası 264 kotu (344-80) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, enjeksiyon perdesinin gövde betonuna bağlanması mevcut galerilerden yapılan başyukarı kuyuların oluşturduğu üçgen bölgelerin enjeksiyonu ile sağlanmıştır. Sol sahildeki enjeksiyon perdesi geometrisi dip savak ulaşım galerisi perdesinin varyant tüneline soketlenmesi ile sonlanmıştır. Derivasyon tünelinden açılan kuyular ile dip savak galerisinden açılan düşey ve yelpaze tipi kuyular birbirine bağlanmıştır (Şekil1.). Klasik yöntemin uygulandığı perdede, baraj temeli konsolidasyon enjeksiyonunda ve gövde betonu kaya arasındaki yamaç konsolidasyonunda farklı oturmalara engel olunması ve kayacın monolitik bir yapı kazanmasına yönelik Lombardi-GIN yöntemi uygulanmıştır.

Paneller arasındaki perde bütünlüğü başyukarı bağlantı kuyuları ile sağlanmıştır. Beton kaplamalı tüm enjeksiyon galerilerinin kontak-konsolidasyon enjeksiyonu yapılmıştır.

5. ENJEKSİYON KARIŞIMLARI

Enjeksiyonda, karışımların en önemli bileşeni olan ve incelik modülü yüksek iki tip çimento kullanılmıştır. Yüksek fırın cüruf miktarı % 36-65 arasında değişen CEMIII / A-42,5 N tipi çimentonun kullanımından priz süresinin uzun olmasından ve fabrikadaki üretim koşullarının değişmesinden dolayı vazgeçilmiş ve yerine puzzolan içeren CEM II / A-M(P-LL) 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun ve karışımların özellikleri Çizelge1.'de belirtilmiştir. Enjeksiyon Karışımlarının saha ve laboratuvar deneyleri ile belirlenen özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

Ölçüm Yerleri : Birincil Enj. İstasyonu; Galerideki İkincil Enj. İstasyonu
Viskozite (sn) : Marsh Hunisi (AT-M3,AT-M4)
Yoğunluk (gr/cm^3) : Çamur Terazisi (AT-M3,AT-M4)
Ani Viskozite Limit Değerleri : Laboratuvar/Enj. İstasyonu değerlerinden (±) 2 fark
Ani Yoğunluk Limit Değerleri : Laboratuvar/Enj. İstasyonu değerlerinden (±) 0,06 fark

Basınç dayanımı, Reometre ve Süzme Presi deneyleri Artvin Barajı saha laboratuvarında gerekli zaman aralığında, çimentonun elek analizi ile özgül yüzeyi deneyleri fabrikadan gelen her parti için yapılmıştır. Baraj galerilerinde, test panel ve bağlantı kuyularında bentonitsiz ana karışım AT-M3 ve tiksotropik özellikli AT-M4 karışımı kullanılmıştır. AT-M4, karışıma su-çimento oranı değişmeden priz hızlandırıcı katkının ilave edilmesiyle elde edildiğinden karışım değişikliğinde kayıp olmamıştır. Her iki karışımının laboratuvar koşullarında saptanan priz süreleri, "presso-filtration = basınç altında karışımın ince çatlaklardan su kaybetmesi" olayından dolayı enjeksiyon esnasında kısalmaktadır. Her bir enjeksiyon işlem için limit hacimleri 2000 litreden az olmayan akış şemaları düzenlenmiştir.
Basınç dayanımı, Reometre ve Süzme Presi deneyleri Artvin Barajı saha laboratuvarında gerekli zaman aralığında, çimentonun elek analizi ile özgül yüzeyi deneyleri fabrikadan gelen her parti için yapılmıştır.

Çizelge 1. Çimento ve Karışımların Özellikleri

Çimento Tipi - ÜNYE	CEM II A-M (P-LL) 42,5 R
Bileşim oranları	Klinker : % 80-94 Puzzolan : % 6-20
Özgül yüzey	4596 cm^2 / gr
90 mikron açıklıklı elek üzerinde kalan	% 0,1
45 mikron açıklıklı elek üzerinde kalan	% 1,8 (maks. % 2)
Özgül ağırlık	2,99 gr/ cm^3

Karışım No.	Su / Çimento	Kimyasal katkı %		Yoğunluk (gr/cm^3)	Viskozite – Marsh hunisi (sn)			
		S.FFN	Sika-4b		0_{dk}	15_{dk}	30_{dk}	45_{dk}
AT-M3	0,69	2,5	-	1,67	33,30	34,12	34,17	35,18

Karışım No.	Çökelme (%)			Priz süreleri (saat : dakika)			Basınç Dayanımı (MPa)	
	1 ssat	2 saat	3 saat	P. başı	P. sonu	Süre	7 gün	28 gün
AT-M3	1,0	2,0	2,5	14:45	15:35	00:50	29,1	34,6

Karışım No.	Su / Çimento	Kimyasal katkı %		Yoğunluk (gr/cm^3)	Viskozite – Marsh hunisi (sn)			
		S.FFN	Sika-4b		0_{dk}	15_{dk}	30_{dk}	45_{dk}
AT-M4	0,69	2,5	1,6	1,66	40,87	44,25	48,15	48,75

Karışım No.	Çökelme (%)			Priz süreleri (saat : dakika)			Basınç Dayanımı (MPa)	
	1 ssat	2 saat	3 saat	P. başı	P. sonu	Süre	7 gün	28 gün
AT-M4	0,5	0,5	0,5	11:35	12:50	01:15	21,7	38,1

6.ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ VE DİKKATE ALINAN KRİTERLER

Artvin Barajı enjeksiyon çalışmalarının tamamında temel kayasının geçirimsizlik kriterleri göz önüne alınmış ve alçalan kademe yapılmasını gerektiren koşullar hariç prensip olarak, yükselen kademe enjeksiyon yöntemi uygulanmıştır. Kademe boyu, yükselen kademe yönteminde 5,00 m'dir. Su kaybının %70 ve kayacın çok parçalı olduğu yerlerde tıkaç zonun 1,0 m üstüne tutturularak alçalan kademe enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyon basıncı ve alışlar Logac cihazı ile her kademede kaydedilmiştir.

6.1. Enjeksiyon (Refü) Basınçları ve Refü Kriteri

Farklı enjeksiyon önlemlerinde aşağıdaki refü basınçları uygulanmıştır.
Kontak enjeksiyonu :2 bar,
Konsolidasyon :5 bar,
Bağlantı Kuyuları (başyukarı) : 0,0 – 2,0 m: 5 bar, 2,0 – 6,0 m: panel basıncı (25 /15 bar)
344,50 (G0) paneli, 30 bar; 419,50 (G3) paneli, 25 bar; 479,50 (G5) ve kret (515,00) paneli, 15 bar
Alışın 10 dakika süre içerisinde seçilen enjeksiyon basıncı altında "0,5 litre/metre/dakikadan" az olması durumunda kademe refü olmuş kabul edilmiştir. Basıncın aniden refü basıncına ulaşması halinde, kademe 3 saat sonra yeniden delinip enjeksiyonu yapılmıştır.

6.2. Kapsamlı basınçlı Su Testi (Lugeon Deneyi)

Basınçlı Su Deneyleri (BST), karotlu kuyularda veya istenilen karotsuz kuyularda ilerlemeye paralel olarak 5 m lik kademelerde yapılmış ve Lugeon (Lu) değerleri hesaplanmıştır. Deneylerde, 0,0-5,0 kademesinde3-6-3 bar, 5,0 m'den daha derindeki kademelerinde ise 3-6-10-6-3 bar basınçları uygulanmıştır. BST'li kuyular, temel kayasının ilksel geçirimliliğini ve enjeksiyon önlemlerinin başarısını kontrol etmek için açılmıştır Testlerin sonuçlarında enjeksiyon öncesi geçirimli sınıfında olan kuyu kademeleri geçirimsiz hale dönüştürülmüştür.

6.3. Dördüncül (Q) Kuyularının Delinme ve Uzatılma Kriterleri

Enjeksiyon önlemleri tamamlanan bir panelde, üçüncül (T) kuyularında, 30 kg/m'den fazla alış yapan kademelerin her iki tarafında ve kademeyi 5 m geçecek şekilde 1,25 m aralıklı dördüncül (Q) kuyuların açılmasıdır. Bu yöntem perde panellerinde geçirimsizliği kuyu aralıklarını azaltarak sağlamak amacına yöneliktir. Enjeksiyon perdesi taban geometrisini saptamak amacıyla BST yapılan kuyularda, alış yapan kademenin 5 metre altındaki son kademede ≥ 5 LU geçirimsizlik değerinin elde edilmesi veya alışın >250 kg/m olması durumunda kuyu 5 m daha derinleştirilerek temel kayasının geçirimlilik mertebesi ölçülmüştür..

6.4. Kuyu Eğimi Ölçümü

Kuyular arasında, enjeksiyon yönünden etkinleşme kuyuların izin verilebilir miktarda sapmasıyla sağlanmaktadır. Artvin barajı projesinde, kuyu eğimi ölçümünde "Deviflex Non Magnetic Multishot" cihazı kullanılmıştır. İzin verilebilir sapma miktarı %2'dir. Sapması öngörülen miktardan daha fazla olan kuyuların delgisi iptal edilerek kuyu yeniden açılmıştır.

7. ENJEKSİYON ALIŞLARI

Bu bölümde, Artvin Barajı projesi kapsamında uygulanan enjeksiyon önlemlerinde farklı tünel ve panellerde toplam katı madde (kg) ve ortalama katı madde alışları (kg/m) ile toplam delgi boyları (m) olarak verilmiştir (Çizelge 2-7.).

▪ **Tüneller**

Proje tünellerinde, kayacın ve süreksizlik düzlemlerinin konumuna bağımlı olarak kontak-konsolidasyon enjeksiyonlarındaki ortalama alış düşük düzeydedir (22 – 31 kg/m).

Çizelge 2. Tünellerin Delgi Boyu ve Enjeksiyon Alışları

Tünel	Delgi (m)	Katı madde (kg)	Ortalama alış (kg / m)
Derivasyon:Kontak-Konsolidasyon	15 089,80	334 454,07	22,09
Varyant: Kontak-Konsolidasyon	8 999,60	286 306,94	31,81

▪ **G0-344,50 Kotundaki Panel**

G0-334,50 kotundaki panelin sol ve sağ sahildeki uzantılarının (alan:8157m^2) geçirimlilik mertebeleri toplam 428,00 m uzunluğundaki karotlu-eğimli kuyular ile araştırılmıştır. Sol sahildeki LG0-K2 kuyusunun alçalan kademe yapılan 33-35 m kademesinde (basınç 0,5 bar, debi 8 L, alış: 490,98 kg/m),LG0-kuyusunun 29-31 m (3 bar,8 L, alış;46,37 kg/m) ve 33-35 m kademesinde (1,2 bar,13 L, alış 373,82 kg/m) artezyenlere rastlanılmıştır. Sol ve sağ sahil araştırma kuyularının tüm diğer kademelerindeki Lugeon değerleri düşük olduğundan panelin yelpaze tipindeki kuyular ile desteklenmesine gerek duyulmamıştır.

Çizelge3. LG / RG-0 (kot:344,50) Panelindeki Enjeksiyon Alışları

G0 - Paneli	T. Delgi (m)	T. Katı madde (kg)	Ortalama alış (kg / m)
Kontak	46,15	16 191,98	350,85
Konsolidasyon	1253,34	37 832,18	30,18
Perde	10 430.00	91 208,81	8,74
Bağlantı (başyukarı)	292,10	3 346,69	11,79
Üçgen bölge (başyukarı)	1712,00	125 901,79	73,54

▪ **G0-344,50 Kotundaki Panelin Geçirimliliği**

Çizelge 4. LG0 – RG0 galerilerinin Lugeon Kümülatif değerleri

Yeri	Toplam Test Sayısı	Geçirimlilik Mertebeleri											
		Geçirimsiz 0 – 1 LU		Çok Az Geçirimli 1 – 3 LU		Az Geçirimli 3 – 5 LU		Orta Geçirimli 5 – 10 LU		Çok Geçirimli 10 – 25 LU		Aşırı Geçirimli > 25 LU	
		sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%
Ano Başı	119	117	98	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Test Panel	60	46	77	12	20	-	-	1	1,5	1	1,5		
Kontrol	170	170	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

▪ **G3-419,50 Kotundaki Panel**

Çizelge 5. LG/ RG-3 Panelindeki Enjeksiyon Alışları

G3 - Paneli	T. Delgi (m)	T. Katı madde (kg)	Ortalama alış (kg / m)
Kontak	80,70	39 956,74	495,12
Konsolidasyon	1 963,15	51 329,29	26,14
Perde	11 542,00	180 285,55	15,62
Bağlantı (başyukarı)	558,80	9 926,64	17,76

▪ **G3-419,50 Kotundaki Panelin Geçirimliliği**

Çizelge 6. LG3 – RG3 Galerilerinin Lugeon Kümülatif Değerleri

Yeri	Toplam Test Sayısı	Geçirimlilik Mertebeleri											
		Geçirimsiz 0 – 1 LU		Çok Az Geçirimli 1 – 3 LU		Az Geçirimli 3 – 5 LU		Orta Geçirimli 5 – 10 LU		Çok Geçirimli 10 – 25 LU		Aşırı Geçirimli > 25 LU	
		sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%	sayı	%
Ano Başı	130	86	66	26	20	10	7,7	3	2,3	4	3,0	1	1,0
Kontrol	145	144	99	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-

▪ **Baraj temeli , F-5 Fayı ve Vana Odası Konsolidasyon EnjeksiyonlarI**

Çizelge 7. Diğer Yapıların Delgileri ve Enjeksiyon Alışları

Yeri	T. Delgi (m)	T. Katı madde (kg)	Ortalama alış (kg / m)
Baraj ve Santral temeli	8 230,30	188 953,64	22,95
F-5 fayı	2 721,70	95 222,52	34,98
Yamaç kons. (G0,G1)- G2,G3	6 188,00 4 992,00 (devam)	267 747,74	23,94
Vana odası	643,40	68 928,83	107,13

8. SONUÇLAR

- Enjeksiyon galerilerinde kontak enjeksiyonunda beton kaplamadan sonra kayada 30 cm, konsolidasyonda kayada 4,00 m ilerlenmiştir. Kesitler arası 3,00 m olan kontak enjeksiyonunda 2 x 1 ve konsolidasyonda şaşırtmalı olarak 60^0 açılı 6 kuyudan oluşan delgi örneği uygulanmıştır. Kontak enjeksiyonu basıncı 2 bar, konsolidasyon refü basıncı, çevre kayacın enjeksiyonla elastisite modülünün yükseltilmesi ve kuyular arasındaki iletişimin sağlanması ve galeri etrafında bir emniyet kuşağının oluşturulması amacıyla 5 bar olarak belirlenmiştir.

- Baraj temeli ve yamaç konsolidasyonunda, hetorejen yapısal nitelikli kayaçta farklı oturmalardan kaçınmak ve taşıma gücünün eşit olarak dağılması için kayacın monolitik bir yapı kazanmasına yönelik GIN enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Basınç (P) x Hacim ilşkisi ile zayıf nitelikli kayacın ve betonun deforme olmasının önüne geçilmiştir

- Delgi örneğinde zamanlama yönünden değerlendirmenin daha kısa zamanda yapıldığı 10 m'lik ano sistemi tercih edilmiştir. Sistemde birincil (P) kuyularının arası 10,0 m, ikincil (S) kuyularının 5,0 m ve üçüncül (T) kuyuların 2,5 m'dir. Ayrıca 1,25 m aralıklı dördüncül (Q) kuyularının üçüncül (T) kuyularının her iki tarafında açılması için alışın 30 kg/m veya üzerinde olması kriteri uygulanmıştır

- Sol sahildeki enjeksiyon perdesi 430,00 – 380,00 kotları arasında varyant tünelinden yapılan enjeksiyon perdesine bağlanmıştır. Derivasyon tüneli içerindeki galeriden açılan kuyular dip savak tünelinden açılan yelpaze tipli kuyular ve 330.00 m kotuna kadar devam eden düşey enjeksiyon perdesi ile irtibatlandırılmıştır.

- G0-344,50, G3-419,50, G5-479,50 ve 515,00 kret kotundan yapılan perde uçlarından açılan karotlu, BST'li yelpaze tipli kuyular ile kayaçtaki süreksizlik düzlemleri ve kayacın geçirimlilik mertebeleri kontrol edilmiştir. LG-0 enjeksiyon galerisinden açılan araştırma kuyularında rastlanılan artezyen yapan kademeleri kapsayacak şekilde LG-3 galerisinden yapılan perde 300,00 m kotuna kadar uzatılmıştır.

- Enjeksiyon galerileri arasında yer alan düşey düzlemli panellerin birbirleriyle olan bağlantıları galerilerin memba ve mansap yönlerinde galeri ekseni ile10^0 açı yapan 6,00 m boyundaki başyukarı kuyular ile sağlanmıştır. Bağlantı kuyularının 0,00-2,00 m kademesinde 10 bar, 2,00-6,00 m kademesinde bir üst panelin refü basıncı uygulanmıştır.

- 2015 Ağustos sonu su tutulması planlanan barajın 419,50 kotuna kadar tüm enjeksiyon işlemleri tamamlanmıştır. Ayrıca, baraj kret kotu (515,00) dahil 419,50 kotu üzerindeki bütün panellerin enjeksiyon yapım yöntemleri hazırlanmıştır.

- Enjeksiyon karışımlarında nüfuz kabiliyeti yüksek ince taneli çimento kullanılması, 2,5 m olan delik aralıklarının ve perde geometrisi taban kotunun test panel değerlendirilmesi sonucu belirlenmesi, 1,25 m aralıklı dördüncül kuyu açılması için 2,5 m aralıklı üçüncül kuyu kademesindealış kriterinin (30 kg/m'den fazla) konulması, panellerde yüksek basınç tekniğinin uygulanması, sık açılan kontrol kuyuları ile perde geçirimsizliğinin olumlu yönde olduğunun belirlenmesi, temel kayası meta-litik tüf-metalav ve fillattan oluşan barajda enjeksiyon perdesinin başarılı olmasında rol oynayan önemli faktörlerdir.

KAYNAKLAR

Altuğ Jeoteknik Enjeksiyon Hidrojeoloji Danışmanlık Ltd.Şti, 16 Nisan 2013, Artvin Barajı ve Hidroelektrik Santralı, Batardolar Arası Kazı Alanına Gelebilecek Su Miktarı

Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş.- Altuğ Jeoteknik Enjeksiyon Hidrojeoloji Danışmanlık Ltd.Şti. 21 Ağustos 2013, Artvin Barajı ve HES, Baraj ve Santral Temeli Kontak-Konsolidasyon Enjeksiyonu (GIN) Yapım Yöntemi,

Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş.- Altuğ Jeoteknik Enjeksiyon Hidrojeoloji Danışmanlık Ltd.Şti. 22 Kasım 2013, Artvin Barajı ve HES, F-5 Fayı Konsolidasyon Enjeksiyonu ve Drenaj Sistemi Yapım Yöntemi

Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş.- Altuğ Jeoteknik Enjeksiyon Hidrojeoloji Danışmanlık Ltd.Şti. 23 Ocak 2015, Artvin Barajı ve HES, Sol-Sağ Sahil LG5/RG5-KLR (Kret) Enjeksiyon Perdeleri Yapım Yöntemi

EPDC: Electric Power Development Co. Ltd. Japonya, Su-İşProje Mühendislik ve Müşavirlik Ltd, TMB Terzibaşoğlu Müşavir ve Mühendislik Ltd, Türkiye, Artvin Baraj ve Hidroelektrik Santral Projesi, Kesin Proje Raporu-ProjePaftalarıEkim 1990. Cilt 2-1

Lombardi G,,1990, La permeabilité et l'injectabilité des massifs rocheux fissurés, Revue Française Géotechnique, No 51, Avril 1990, pp. 5-29

Lombardi G,, 1996, Selecting the Gouting İntensity, Hydropower & Dams, 1996, pp.62-66

Teknik Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş., 2012-2015, Artvin Enjeksiyon Perdesi Paftaları-Uygulama Projeleri, Ankara

Doğu Karadeniz Bölümü Suları Çevresel Duraylı İzotop İçeriğinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Environmental Stable Isotope Content of Eastern Black Sea Region

M. Ekmekçi[1,*], F.Gültekin[2]

[1] *Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Araştırma Merkezi Beytepe, Ankara*
[2] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Müh. Böl. Trabzon*
*(*ekmekci@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Yeraltısuyuna ilişkin sorunların etkin çözümü doğal sistemi temsil eden bir hidrojeolojik kavramsal modelin oluşturulmasını gerektirir. İncelenen hidrojeolojik sistemin beslenme alanlarının belirlenmesi, kavramsallaştırmanın en sorunlu çalışmalarındandır. İzotop hidrolojisi teknikleri bu sorunların aşılmasında önemli katkılar sağlamaktadır. Doğu Karadeniz Bölümü'nde oluşan suların çevresel duraylı izotop içeriklerinin belirlenmesi amacıyla Karadeniz kıyısından başlayarak güneyde yer alan yüksek alanlara doğru olacak şekilde 3 hat üzerinde su örnekleri toplanmış ve duraylı izotop analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, Doğu Karadeniz Bölümü meteorik doğrusunun 16 döteryum fazlasıyla, $\delta D=8*\delta O^{18}+16$ şeklinde yazılabileceği ortaya konmuştur. Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarında duraylı izotop içeriğinin kota bağlı olarak değişimi ise batıdan doğruya doğru oransal olarak artmaktadır. Zigana hattında oksijen-18 ve döteryum her 100 m kot artışına bağlı olarak sırasıyla ‰ 0.1 ve ‰ 0.8 olarak belirlenmiştir. Ardeşen hattı için bu değerler sırasıyla ‰ 0.2 ve ‰ 2, Hopa hattında ise ‰ 0.85 ve ‰ 6.2 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beslenme Alanı, Doğu Karadeniz, Döteryum, Hidrojeoloji, Oksijen-18

ABSTRACT: *Effective solutions to groundwater problems requires a representative hydrogeological conceptual model, which can be obtained by a thorough understanding of the physical system. Deliniation of recharge areas is one of the most challanging tasks in conceptualization studies.Use of isotope hydrology techniques significantly contributes to overcome the problems related to determination of recharge areas of hydrogeological systems.Water samples were collected along three major lines that represent the eastern Black Sea Region in Turkey aiming at stable isotopic characterization of waters in the region. Results revealed that the local meteoric line can be represented by a regression equation as* $\delta D=8*\delta O^{18}+16$ *and that the depletion in stable isotope content with elevation significantly increases eastward. In the west part the depletion of oxygen-18 is 0.1 ‰ per 100 m rise in elevation, 0.2 ‰ in the middle section and 0.85 ‰ in the eastern part of the region. The depletion of deuterium in the Zigana line is 0.8 ‰ per 100 m rise in elevation, 2 ‰ in the Ardeşen line and 6.2 ‰ in the Hopa Line.*

Keywords: *Recharge Area, Eastern Black Sea, Deuterium, Hydrogeology, Oxygen-18*

1. GİRİŞ

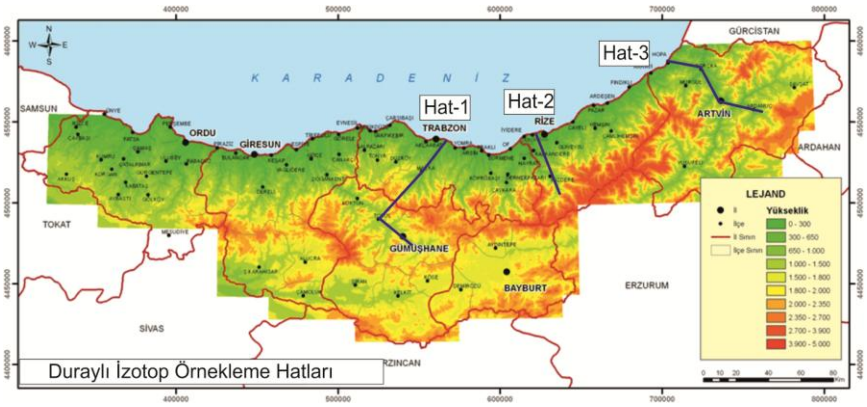
Yeraltısuyuna ilişkin problemlerin tanımlanması, boyutlandırılması ve çözümü öncelikle, sorunun görüldüğü alandaki hidrojeolojik yapının kavramsal modelinin oraya konmasını gerektirir. Hidrojeolojik kavramsal model, akım alanının yayılımı, kalınlığı ve hidrostratigrafik birimler arasındaki yapısal ilişkileri ortaya koyan "hidrostratigrafik" bileşen ile beslenme-depolama-boşalım ilişkilerini tanımlayan "hidrodinamik" bileşenden oluşur. Hidrostratigrafik bileşen genellikle haritalama, jeofizik, sondaj gibi yüzey ve yeraltı araştırma tekniklerinin uygulanmasını gerektirirken, hidrodinamik bileşen akifer birimlerin karakterizasyonu, beslenme ve boşalım rejimlerinin tanımlanması amacıyla hidroloji, hidrojeoloji, hidrojeokimya ve izotop tekniklerinden yararlanır (Ekmekçi 2002). Hidrojeolojik kavramsallaştırma çalışmalarının belirsizlik içeren önemli parametrelerinden biri olan beslenme alanının belirlenmesinde duraylı izotop tekniklerinin kullanılması bu doğrultuda sağlıklı sonuçlar vermektedir (Clark and Fritz, 1997). Analiz teknolojisinin

gelişmesine paralel olarak analiz maliyetlerinin ve sürelerinin önemli oranda düşmesi sonucunda izotop tekniklerinin hidrojeolojik kavramsallaştırma çalışmalarında kullanılması da yaygınlaşmaktadır. Hidrojeolojik kavramsallaştırma çalışmalarında önemli bir yer tutan beslenme alanının duraylı izotop teknikleriyle belirlenmesi, inceleme alanında hakim bölgesel yağışın izotop içeriğinin karakterizasyonunu gerektirmektedir. Bölgesel yağışların duraylı izotop içeriklerinin yükseltiye bağlı değişiminin ortaya konması bu tür çalışmaların temelinde yer alır (Blasch and Bryson, 2007).

Bu çalışmada, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarının çevresel duraylı izotop içeriği açısından karakterizasyonu amacıyla aşağıdaki bölümlerde açıklanan yaklaşım ve yöntemler izlenerek örnekleme ve analizler gerçekleştirilmiştir. Doğu Karadeniz Bölümü (DKB) yağışlarını ve yeraltısularını temsil etmek üzere batıdan doğuya doğru kuzey-güney doğrultulu üç farklı hat üzerinde farklı kotlarda boşalan kaynaklar örneklenmiş ve duraylı izotop içerikleri açısından analiz edilmiştir. Örnekleme hatlarının belirlenmesinde Doğu Karadeniz Bölümünün coğrafik özellikleri dikkate alınmıştır.

2. DOĞU KARADENİZ BÖLÜMÜNÜ TEMSİL EDEN ÖRNEKLEME HATLARI VE COĞRAFİ ÖZELLİKLERİ

Doğu Karadeniz Bölümü'nü temsil edecek şekilde Karadeniz kıyısından başlayarak güneyde yer alan yüksek alanlara doğru olacak şekilde 3 hat üzerinde su örnekleri toplanmış ve duraylı izotop analizleri gerçekleştirilmiştir. Batıdan doğuya doğru, birinci hat Trabzon Değirmendere-Zigana (Hat-1), ikinci hat Rize Ardeşen-Ayder (Hat-2) ve üçüncü hat Artvin Hopa-Ardanuç (Hat-3) arasında seçilmiştir. Çalışma kapsamında örnekleme yapılan hatları gösteren bulduru haritası Şekil 1'de gösterilmiştir. Ekim 2014 döneminde gerçekleştirilen arazi çalışmaları sırasında anılan hatlar üzerinde, farklı kotlarda boşalan toplam 37 adet mevsimlik kaynak ve akarsuda yerinde ölçüm ve örnekleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Doğu Karadeniz Bölümü sularını temsil eden örnekleme hatlarının konumu

Doğu Karadeniz Bölümünde yer alan çalışma alanında yükselti deniz seviyesinden başlayarak 3900 m'lere kadar ulaşmaktadır. Örneklemeler iklim özellikleri bakımından farklılık gösteren üç hat boyunca kuzeyden güneye doğru gerçekleştirilmiştir. Trabzon- Zigana (Hat-1) hattında 1800 m, Rize Ayder (Hat-2) hattında 1400 m ve Hopa-Ardanuç (Hat-3) hattında 1000 m yükseltisine kadar örnekleme yapılmıştır. Bölgede genel olarak her mevsim yağışlı, yazlar serin, kışları kıyılarda ılık, yükseklerde soğuk ve kar yağışlı olan Karadeniz İklimi hüküm sürmektedir. Ancak kıyı şeridinde doğudan batıya doğru yıllık yağış değerleri azalmakta, yıllık ortalama sıcaklık değerleri artmaktadır. Kuzeyden güneye doğru gidildikçe yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve kar yağışlı olan karasal iklim özellikleri görülmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan son 64 yıllın ortalamalarına göre Hat-1'de yıllık yağış yüksekliği kıyıda 807 mm (Trabzon), iç kesimlerde 449 mm (Gümüşhane), Hat-2'de Rize'de 2239 mm iken Ayder'de 1956 mm, Hat-3'de ise Hopa'da 2068 mm, Artvin'de 699 mm, Ardanuç'ta ise 446 mm'dir. Yıllık ortalama sıcaklıklar kıyı şeridinde batıdan doğuya, örnekleme

hatları boyunca kuzeyden güneye gidildikçe azalmakta olup; Hat-1'de 14,7°C'den 9.6°C'ye, Hat-2'de 14.2°C'den 12°C'ye, Hat-3'te 14.2°C'den 13°C'ye düşmektedir.

Doğu Karadeniz kıyı sıradağları yayının kuzey yamacında yer alan çalışma alanı dağlık ve engebelidir. Kıyı düzlüğünün hemen gerisinde yükselti 150-200 m'ye ulaşmaktadır. Bu kotlardan sonra arazi giderek daralan akarsu vadileri tarafından derin bir şekilde yarılmıştır. Yaklaşık 2000 m yükseklikten başlayan yüksek dağlık saha ve buzul topografyasının 3000-3200 m yüksekliğe kadar olan kısımlarında topografya basık sırtlar ve dik yamaçlı vadilerden oluşmaktadır. 3000 m'den sonra topoğrafyayı çıplak ve tamamen kayalık zirveler ile bunların arasındaki keskin ve yamaçları çok dik sırtlar oluşturur.

Doğu Karadeniz Bölümündeki önemli orman ekosistemlerinden biri Artvin ve Rize ilindeki Kaçkar Dağları'dır. Alandaki yağış, yükseklik ve sıcaklık farkları florada da büyük bir çeşitliliğin meydana gelmesine neden olmuştur. Bitki örtüsünde çok geniş adi gürgen, kestane, doğu kayını ve doğu ladini ormanları, çok büyük çeşitlilik içeren geniş yapraklı ve Rhododendron ağırlıklı çalı toplulukları, alpin mera ve çayırlıklar ve çok yüksek zirvelerde alpin göl, taşlık yamaç ve sarp kayalık bitki toplulukları bulunmaktadır.

3. BESLENME REJİMİNİN BELİRLENMESİNDE İZOTOP HİDROLOJİSİ

Hidrojeolojik sistemlerde yeraltısuyu potansiyelinin belirlenmesine yönelik hesaplamalarda belirsizlik kaynaklarının başında beslenme rejiminin belirlenmesi gelmektedir. Karmaşık fiziksel süreçler içeren beslenmenin belirlenmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiş olmasına karşın her yöntem ve yaklaşımın kendine özgü olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Elde edilmesi hedeflenen sonuçlardaki belirsizlik azaldıkça yöntem daha karmaşık hale gelmekte ve daha fazla sayıda ve yüksek hassasiyette veri gerektirmektedir. Bununla birlikte, yeraltısuyu potansiyelinin sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmesi için besenme miktarının yanı sıra seçilen yöntemden bağımsız olarak, beslenme alanının belirlenmesi gerekir. Beslenme alanlarının belirlenmesi çalışmalarında çevresel duraylı izotop teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevresel duraylı izotoplardan hidrojenin bir izotopu olan döteryum (δD, δ^2H) ve oksijenin ağır izotopu olan oksijen-18 (δ^{18}O) su molekülünü oluşturan elementlerin izotopları olup, yağış suyunda bulunma bollukları yağış oluşturan su buharının oluşum ve daha sonra yoğunlaşma ortamındaki nem ve sıcaklık koşulları ile yağış miktarına bağlıdır. Beslenme alanının belirlenmesi açısından bu koşullar, duraylı izotop içeriğini yağışın meydana geldiği enlem, deniz seviyesinden yükseklik ve uzaklık şeklinde etkilemektedir. Genellikle, yeraltısuyu içeren birimlerin yayılım gösterdiği ortalama yükseltiden daha yüksek alanlar kaplayan bir drenaj alanına sahip akarsular δD ve δ^{18}O açısından yeraltısularına göre daha fakirdir (Gat, 1996).

4. ÖRNEKLEME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bölüm 3'te açıklanan temel yaklaşımların uygulanabilmesi için, inceleme yapılan alandaki yağışın duraylı izotop içeriğinin alansal dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Beslenme alanının belirlenmesi bölgesel yağışın δ^{18}O ve δD içeriğinin özellikle yükseltiye bağlı değişimine ilişkin veriye dayanır. Bununla birlikte, yağışın izotop içeriğinin bu doğrultudaki karakterizasyonu, farklı yükseltilerde bulunan yağış istasyonlarından uzun süreli alınacak yağış sularının analizini gerektirir. Türkiye'de yağış istasyonlarının coğrafi dağılımı, yağışın yükseltiye bağlı değişimini ortaya koyabilecek durumda değildir. Bu nedenle, yağışların izotop içeriklerinin karakterizasyonunda yağış istasyonlarının kullanılamadığı durumlarda yıllık yağışlardan beslenen, mevsimsel, boşalım noktasına yakın kesimlerden beslenen kaynaklardan yararlanılması uygun olmaktadır. Farklı yükseltilerden boşalan bu tür kaynaklardan 4 veya 5 kaynak çekilme dönemi başlangıcında ve çekilme dönemi sonunda olmak üzere iki kez örneklendiğinde, kaynağın bulunduğu alandaki yıllık yağış ortalamasının temsil edildiği kabul edilebilir (Clark and Fritz, 1997). Bu tür bir çalışmada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, seçilen kaynağın boşalım noktasında örneklemenin yapılmasıdır. Boşalım noktasından farklı bir noktaya borularla isale edilen kaynakların isale edildikleri noktada (çeşme) değil mutlaka boşalım

noktasında örneklenmeleri gerekir. Benzer şekilde, kaynağın boşalım noktasındaki kaptaj durumu da izotop içeriğini etkileyebilmektedir. Kaynağın büyük bir hazne içine boşalımının söz konusu olduğu durumlarda örneklemenin hazne çıkışında değil, kaynağın boşalım ağzından yapılması sağlıklı sonuç alma açısından önemlidir. Hazne/depo içinde suyun buharlaşma etkisi altında kalacağı ve bu şekilde duraylı izotop içeriğinin değişikliğe uğrayacağı gözden kaçırılmamalıdır (Ekmekçi, 2002). Örneklemede 100 ml hacimli örnek şişeleri kullanılmıştır. Örnek şişeleri kaynak sularıyla şişe boynunda sıcaklık değişimine bağlı genleşmeyi dikkate alarak yaklaşık olarak 1-2 ml boşluk bırakacak şekilde doldurulmuştur. Örnekleme sırasında yerinde sıcaklık, T (°C), elektriksel iletkenlik, EC (µS/cm) ve pH parametreleri ölçülmüştür. Yerinde ölçüm ve örneklemeden sonra örnekler Hacettepe Üniversitesi Duraylı İzotop Laboratuvarı'na iletilmiştir. Örneklerde duraylı izotop içeriği, lazer spektroskopisi tekniğine dayanan Los Gatos Research Liquid Water Isotope Analyzer kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz hassasiyeti döteryum için ±‰ 2 ve oksijen-18 için ise ± ‰ 0.3 düzeyindedir.

5. DOĞU KARADENİZ BÖLÜMÜ SULARINDA DURAYLI İZOTOP İÇERİĞİ

Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarının ve yeraltısularının çevresel duraylı izotop içeriği açısından karakterizasyonu amacıyla batıdan doğuya 3 hat boyunca Karadeniz kıyı bölgesinden güneydeki dağlara doğru kaynaklarda yerinde ölçüm ve örneklemeler gerçekleştirilmiştir. Yapılan yerinde ölçüm sonuçları, en düşük (min), en yüksek (max), ortalama (ort), standart sapma (std) ve değişkenlik katsayısı (Cv) ile birlikte Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi yeraltısuyu sıcaklıkları 8.8 °C ile 21.1 °C; elektriksel iletkenlik değerleri 43 µS/cm ile 1457 µS/cm ve pH değerleri 7.5 ile 9.2 arasında değişmektedir. Değişkenlik katsayısı (Cv) değerlerine göre su noktalarının coğrafik dağılımının yeraltısuyu kalitesine etkisi büyük olup, fiziksel özellikleri açısından sular büyük farklılık göstermektedirler. Bu yüksek değişkenlik, doğal hidrolojik/hidrojeolojikyapıya bağlı olabileceği gibi insan faaliyetlerinin yeraltısularına etkisi sonucunda da oluşabilmektedir.

Çizelge 1. Örneklenen su noktalarında yerinde ölçüm sonuçları (Kısaltmalara ilişkin açıklamalar metin içerisindedir)

HAT-1	EC_{25}(uS/cm)	pH	T (ºC)	HAT-2	EC_{25}(uS/cm)	pH	T (ºC)	HAT-3	EC_{25}(uS/cm)	pH	T (ºC)
H1-1	1457	7.5	20	**H2-1**	178	9.05	16.7	**H3-1**	69.5	8	16
H1-2	300	9.2	14.6	**H2-2**	54	9.56	14.8	**H3-2**	348	7.92	13
H1-3	Su akmıyor			**H-2-2**	52	9.2	14	**H3-3**	111	8.44	12.2
H1-4	393	8.9	17.5	**H2-3**	49	9.13	16.2	**H3-4**	220	8.42	13
H1-5	386	8.9	13.8	**H2-4**	74	8.76	16.1	**H3-5**	141.5	8.3	10
H1-6	145	8.8	10.2	**H2-5**	84	8.6	15.6	**H3-6**	373	8.59	17
H1-7	411	8.6	13.1	**H2-6**	61	8.73	12.8	**H3-7**	490.7	8.5	16.2
H1-8	210	8.4	12.7	**H2-7**	165	8.3	15	**H3-8**	425.4	8.49	21.1
H1-8*	143	8.8	10.2	**H2-8**	84	8.6	12.6	**H3-9**	349	8.6	18.5
H1-9	151	8.9	13	**H2-9**	46	8.43	12.2	**H3-10**	347.2	8.45	12.7
H1-9*	76	8.7	12	**H2-10**	66	8.15	10.8	**H3-11**	435.5	8.43	17.4
H1-10	Su akmıyor			**H2-11**	43	8.1	8.8	**H3-12**	339	8.3	17
H1-10*	189	8.2	14.5	**H2-12**	44	8.16	9.7				
H1-11	307	7.6	12.4	**H2-13**	63	8.51	13.5				
H1-12	784	8.1	14.6								
MIN	76	7.5	10.2		43	8.1	8.8		69.5	7.92	10
MAX	1457	9.2	20		178	9.56	16.7		490.7	8.6	21.1
ORT	380.9	8.5	13.7		75.9	8.7	13.5		304.2	8.4	15.3
STD	371.7	0.5	2.7		42.7	0.4	2.5		136.3	0.2	3.2
CV (%)	97.6	6.1	19.6		56.3	5.1	18.4		44.8	2.5	20.6

Duraylı izotop içerikleri açısından kıyaslandıklarında ise durum daha farklıdır. Doğu Karadeniz Bölümünü temsil eden 3 hat boyunca toplanan su örneklerinin duraylı izotop analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, tüm su noktaları değerlendirildiğinde oksijen-18 içeriğinin ‰-8.48 ile ‰ -14.33 ve döteryumun ise ‰ -98.05 ile ‰ -53.80 arasında değiştiği görülmektedir. Döteryum ve oksijen-18 için ortalama değerler ise sırasıyla ‰ -67.20 ile ‰ -10.38 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte değişkenlik katsayılarının yüksek olması (D için %17, ^{18}O için % 14) ve örnekleme hatlarının ayrı ayrı değerlendirilmesinin daha uygun olacağını ortaya koymuştur. Örneklenen hatlar bazında genel bir değerlendirme Çizelge 3'te verilen istatistiklerden yapılabilmektedir. Doğu Karadeniz Bölümünün en batısında yer alan Hat-1 üzerinde örneklenen su noktalarında δD ve $\delta^{18}O$ ortalama değerleri sırasıyla ‰ -60.56 ve ‰ -9.36 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Örneklenen su noktalarının duraylı izotop analiz sonuçları

HAT-1	D	O-18	HAT-2	D	O-18	HAT-3	D	O-18
H1-1	-59.5	-8.8	**H2-1**	-54.8	-8.9	**H3-1**	-54.5	-9.3
H1-2	-60.5	-9.3	**H2-2**	-60.6	-9.4	**H3-2**	-61.9	-9.9
H1-3			**H-2-2**	-58.2	-9.1	**H3-3**	-56.7	-9.5
H1-4	-62.0	-9.4	**H2-3**	-60.0	-9.3	**H3-4**	-65.3	-10.0
H1-5	-53.8	-8.5	**H2-4**	-58.1	-9.3	**H3-5**	-68.7	-10.7
H1-6	-63.0	-9.5	**H2-5**	-63.7	-10.3	**H3-6**	-76.0	-11.3
H1-7	-66.8	-10.1	**H2-6**	-58.4	-10.4	**H3-7**	-81.9	-11.7
H1-8	-59.0	-9.3	**H2-7**	-70.1	-11.4	**H3-8**	-84.2	-12.9
H1-8*	-60.6	-9.2	**H2-8**	-62.8	-10.1	**H3-9**	-85.3	-12.4
H1-9	-59.6	-9.1	**H2-9**	-58.8	-9.4	**H3-10**	-98.1	-14.3
H1-9*	-58.8	-9.2	**H2-10**	-80.5	-12.1	**H3-11**	-94.8	-13.8
H1-10			**H2-11**	-83.0	-12.4	**H3-12**	-81.3	-11.8
H1-10*	-57.3	-9.2	**H2-12**	-81.9	-12.1			
H1-11	-65.8	-10.5						

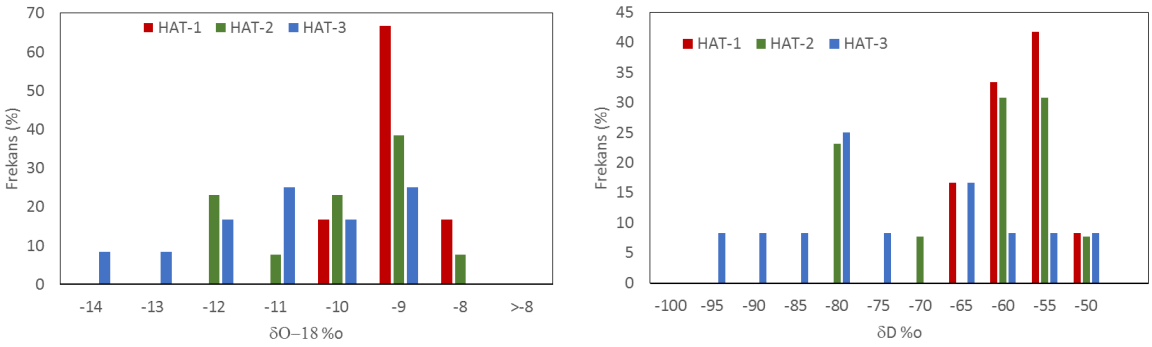
Döteryum fazlası ise ‰ 14.30 olarak bulunmuştur. Hat-1'de alınan sonuçların değişkenliği düşük olup duraylı izotop içeriklerinin diğer hatlara göre daha uniform bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Hat-2 örneklerinde ortalama δD ve $\delta^{18}O$ değerleri ‰ -65.46 ve ‰ -10.31, döteryum fazlası ise ‰ 17.06 olarak belirlenmiştir. Hat-3 üzerindeki su noktalarında döteryum fazlası ‰ 15.28, ortalama değerler ise δD ve $\delta^{18}O$ için sırasıyla ‰ -75.73 ve ‰ -11.47 olarak bulunmuştur. Hat-2 ve Hat-3 örneklerinin duraylı izotop içeriklerinin değişkenlikleri yüksek olup % 15 dolayındadır.

Çizelge 3. Örneklenen hatlarda duraylı izotop içeriklerine ait temel istatistikler

	HAT-1			HAT-2			HAT-3		
	δD ‰	**δO–18 ‰**	**DF**	**δD ‰**	**δO–18 ‰**	**DF**	**δD ‰**	**δO–18 ‰**	**DF**
Min	-66.85	-10.52	11.02	-83.03	-12.36	14.21	-98.05	-14.33	12.05
Max	-53.81	-8.48	18.38	-54.78	-8.92	24.90	-54.54	-9.27	19.62
Ort	-60.56	-9.36	14.30	-65.46	-10.31	17.06	-75.73	-11.47	16.03
Std	3.55	0.54	1.91	10.02	1.26	3.04	14.32	1.66	2.45
Cv	5.86	5.75	13.37	15.31	12.25	17.84	18.91	14.50	15.28

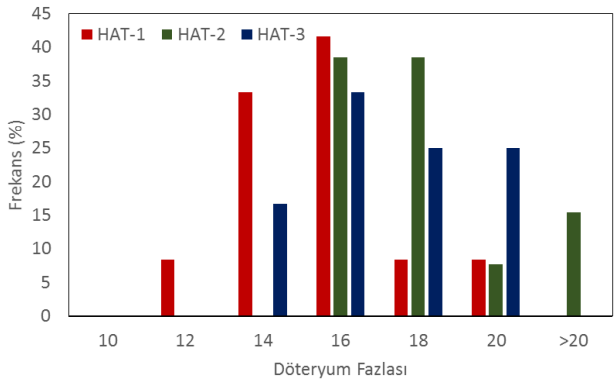
Şekil 2'de hatlar bazında döteryum, oksijen-18 ve Şekil 3'te döteryum fazlasına ait frekans dağılımları verilmiştir. Hatların ayrı ayrı değerlendirilmesi sonucunda D, ^{18}O ve döteryum fazlası değerlerine ait frekans dağılımları incelendiğinde, batıdan doğuya doğru gidildikçe ağır izotop içeriğinde genel bir azalış, döteryum fazlasında ise düzensiz de olsa bir artışın söz konusu olduğu ortaya konmuştur. Histogramlarda, Hat-1'den Hat-3'e doğru negatifleşme belirgin olarak görülmektedir.

Herhangi bir bölge üzerine düşen yağışların izotopik açıdan karakterizasyonu, "yerel meteorik doğru" olarak adlandırılan ve D ile ^{18}O arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir regresyon denklemiyle ortaya konabilmektedir. Bu ilişki ilk defa Craig (1969) tarafından $\delta D=8*\delta^{18}O+DF$ şeklinde tanımlanmıştır. Küresel yağışların ortalaması için döteryum fazlası DF=‰10 (Dünya Meteorik Doğrusu, DMD: $\delta D=8*\delta^{18}O+10$) olarak verilmektedir (Craig, 1961). Doğu Karadeniz Bölümü için yerel meteorik doğru karakterizasyonu için çizilen grafik ve elde edilen regresyon denklemleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bölge geneli için elde edilen doğru (Doğu Karadeniz Meteorik Doğrusu, DKMD) $\delta D=8*\delta^{18}O+16$ regresyon eşitliği ile temsil edilmektedir. Dünya meteorik doğrusunda döteryum fazlasını temsil eden değerden daha yüksek (DF=‰16) bir değer elde edilmesi Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarının kaynaklandığı denizel ortamda buharlaşmanın görece daha düşük nem içeriğine sahip (dünya ortalamasına göre daha kurak) bir ortamda gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Hatlar bazında izotop verilerinin eğimi 8 olan bir doğru üzerinde dizilmeye zorlandığında Hat-1 ve Hat-2 alt bölgelerine düşen yağışları temsil eden doğruların $\delta D=8*\delta^{18}O+18$ regresyon eşitliği ile ifade edilebileceği; Hat-3 için ise regresyon eşitliğinin $\delta D=8*\delta^{18}O+16$ şeklinde tanımlanabileceği ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, doğu kesimlerinin batı kesimlerinden farklı bir yağış rejimi etkisi altında kaldıkları şeklinde değerlendirilebilir.

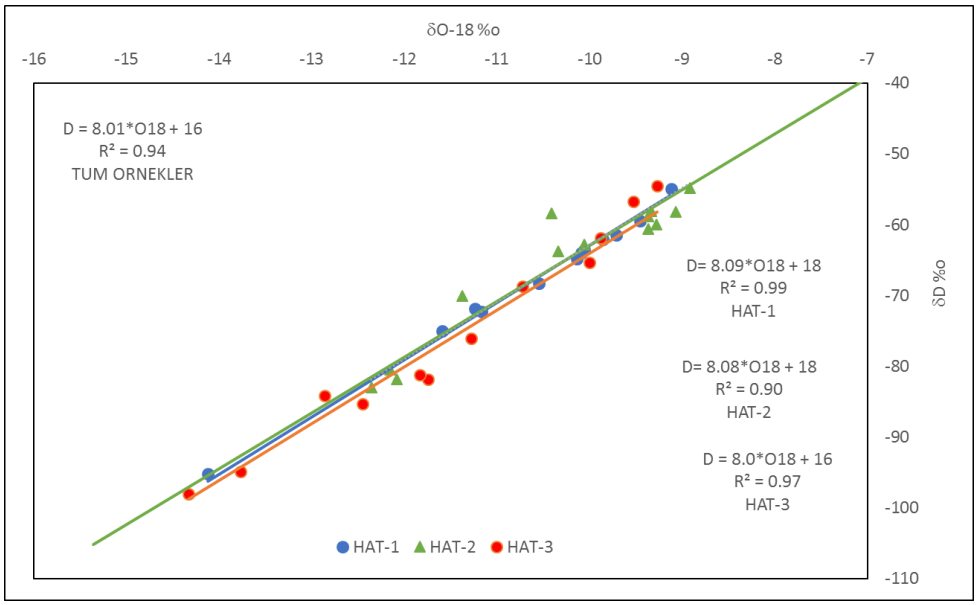


(a) (b)

Şekil 2. Doğu Karadeniz Bölümünü temsil eden hatlarda a) $\delta^{18}O$ ve b) δD frenaks dağılımları



Şekil 3. Doğu Karadeniz Bölümünü temsil eden hatlarda döteryum fazlası frenaks dağılımları

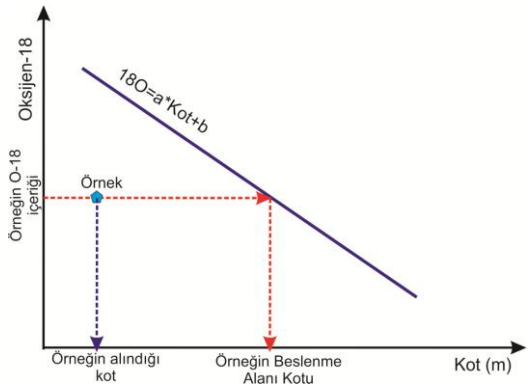


Şekil 4. Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarının karakteristik meteorik doğrusu

6. BESLENME ALANI YÜKSELTİSİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

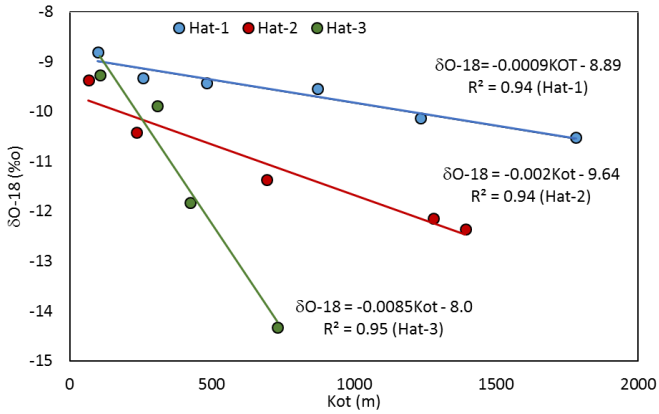
Hidrostratigrafik birimlerin yayılım ve kalınlıklarının belirlenmesi ile sistemin beslenme-dolaşım-depolama-boşalım ilişkilerinin kavramsal ve sayısal olarak tanımlanması hidrojeolojik kavramsallaştırmanın iki temel bileşenini oluşturmaktadır. İncelenen hidrojeolojik sistemin beslenme alan(ları)ının ve beslenme rejiminin belirlenmesi, konumsal ve zamansal değişkenlikler nedeniyle kavramsallaştırmanın en sorunlu çalışmalarındandır. Çevresel izotoplardan duraylı olan oksijen-18 ($\delta^{18}O$) ve döteryum ($\delta^{2}H$), hidrojeolojik kavramsallaştırma ve özellikle yeraltısuyu kaynaklarının beslenme alanlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan suyun bileşiminde olan iki izotoptur. Sıcaklık, enlem, miktar vb diğer faktörlerin yanı sıra denizden yükseklik (kot etkisi) ağır olan bu izotopların yağış sularındaki bileşimine önemli oranda etki eder. Kot etkisi kullanılarak, yeraltısuyu kaynaklarının beslenme alanlarının yükseltisi (kotu) tahmin edilebilmektedir. Bu bilgi, jeolojik ve hidrojeolojik yapı ile birlikte değerlendirilerek hidrojeolojik kavramsal modelin kurgulanmasında önemli bir bileşenin aydınlatılmasına yardımcı olmaktadır.

Herhangi bir alanda duraylı izotoplardan yararlanarak yeraltısuyu kaynağının (kaynak veya kuyudan alınan yeraltısuyunun) hangi kotlardan beslendiğinin belirlenebilmesi için öncelikle bölgesel yağışın izotop içeriğinin kota bağlı değişimini veren ilişkinin ortaya konması gerekmektedir. Sıcaklık ve dolayısıyla yükseltiye bağlı değişime daha duyarlı olması nedeniyle bu ilişki genellikle oksijen-18 kullanılarak elde edilmektedir. Söz konusu ilişki oksijen-18 izotopunun kota bağlı değişimini veren bir doğrunun denklemi olup $\delta^{18}O=a*Kot+b$ şeklinde ifade edilebilir. Bölgesel yağışların kota bağlı değişimini karakterize eden değer bu eşitlikteki doğru eğimi olan "a" katsayısıdır. "a" katsayısı bölgede deniz seviyesinden her bir birim yükselmeye karşı duraylı izotopta meydana gelen fakirleşmeyi ifade eder. Bu bilgiden yola çıkılarak, beslenme kotu bilinmeyen bir yeraltısuyu örneğinin duraylı izotop değerinin bu eşitlikte yerine konmasıyla beslenme alanı kotu belirlenebilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Kot-$\delta^{18}O$ ilişkisinden beslenme alanı kotunun belirlenmesi (Gat, 1980: Ekmekçi, 2002)

Doğu Karadeniz Bölümünde yağışların yükseltiyle değişimi, seçilen 3 alt havza temelinde incelenmiştir. Trabzon Değirmendere-Zigana hattının (Hat-1) temsil ettiği alt bölgede Kot-$\delta^{18}O$ ilişkisi Şekil 6.'da verilmiştir. Bu ilişkiden türetilen regresyon eşitliği $\delta^{18}O=0.0009*Kot-8.89$ olarak bulunmuştur. Buna göre Hat-1 alt bölgesinde her 100 m kot artışına bağlı olarak oksijen-18 içeriğinde ‰ 0.09 oranında fakirleşme meydana gelmektedir. Daha doğuda yeralan ve Rize Ardeşen-Ayder Hattı (Hat-2) için söz konusu eşitlik $\delta^{18}O=0.002*Kot-9.64$ şeklinde bulunmuştur. Bu eşitliğe göre, Hat-2'nin temsil ettiği alt bölgede topoğrafik olarak her 100 metre yükselme, oksijen-18 içeriğinde ‰ 0.2 oranında azalmaktadır. Artvin Hopa-Ardanuç Hattı (Hat-3) için oksijen-18'in kota bağlı değişimini ifade eden regresyon eşitliğinin $\delta^{18}O=0.0085*Kot-8.0$ olduğu belirlenmiştir. Buna göre en doğuda yer alan alt bölgede her 100 m kot artışına bağlı olarak oksijen-18 içeriğinde ‰ 0.85 oranında fakirleşme meydana gelmektedir.



Şekil 6. Doğu Karadeniz Bölümü için türetilen Kot-$\delta^{18}O$ ilişkileri

7. SONUÇLAR

Doğu Karadeniz Bölümü'nü temsil edecek şekilde Karadeniz kıyısından başlayarak güneyde yeralan yüksek alanlara doğru olacak şekilde 3 hat üzerinde su örnekleri toplanmış ve duraylı izotop analizleri gerçekleştirilmiştir. Batıdan doğuya doğru, birinci hat Trabzon Değirmendere-Zigana, ikinci hat Rize Ardeşen-Ayder ve üçüncü hat Artvin Hopa-Ardanuç arasında seçilmiştir. Farklı kotlarda boşalan toplam 37 adet mevsimlik kaynak ve akarsuda yerinde ölçüm ve örnekleme gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, Doğu Karadeniz Bölümü meteorik doğrusunun 16 döteryum fazlasıyla $-\delta=8*\delta O^{18}+16$ şeklinde yazılabileceği ortaya konmuştur. Doğu Karadeniz Bölümü yağışlarında duraylı izotop içeriğinin kota bağlı olarak değişimi ise batıdan doğruya doğru oransal olarak artmaktadır. Zigana hattında oksijen-18 her 100 m kot artışına bağlı olarak ‰ 0.09 olarak belirlenmiştir. Ardeşen hattı için bu değer ‰ 0.2 Hopa hattında ise ‰ 0.85 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, Doğu Karadeniz Bölümü'nde yağışları oluşturan bulutların genel olarak ortak bir kökene sahip olmasına karşın, yoğunlaşarak yeniden yağışa dönüşmeleri sırasında farklı süreçlerin etkisi altına girdikleri anlaşılmaktadır. Duraylı izotop içeriğinin kota bağlı olarak azalma oranının batıdan doğuya doğru yükseldiği ortaya konmuştur. Bu bulgular, Doğu Karadeniz Bölümü'nün doğu kesimlerine gidildikçe, çevresel duraylı izotop içeriklerinin beslenme alanlarının belirlenmesinde ve hidrojeolojik kavramsallaştırma çalışmalarında ayırdedici özelliklerinin daha yüksek olduğunu, batı kesimlerinde bu doğrultuda değerlendirmeler yapılırken bu durumun dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Beslenme alanı ve beslenme rejiminin daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konması için farklı mevsimlerde tekrarlanarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sunulan çalışmanın bu doğrultuda sürdürülmesi büyük bir yarar sağlayacaktır. Ayrıca, benzer çalışmaların Türkiye'nin her bölgesinde, olanakların elvermesi durumunda her havzada gerçekleştirilmesi, Türkiye'nin su kaynaklarının araştırılması ve yönetimi açısından büyük bir önem taşımaktadır.

8. KAYNAKLAR

Blasch, K.W., Bryson, J.R., 2007. Distinguishing sources of ground water recharge by using δ^2H.

Clark, I.D., Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrology; Lewis Publishers, New York.

Craig, H., 1961. Isotope variations in meteoric waters. Science, 133, 1702-1703.

Ekmekçi, M., 2002. Karst hidrojeolojisi ders notları. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Gat, J.R., 1980. The Isotopes of Hydrogen and Oxygen in Precipitation. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Elsevier, Amsterdam.

Gat, J.R., 1996. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 24, 225–262.

Kazı Alanlarında Yeraltısuyuna İlişkin Sorunların Çözümünde Hidrojeolojik Kavramsallaştırma ve Karakterizasyonun Önemi: Türkiye'den Örnekler

Role of Hydrogeological Conceptualization and Characterization in Solving Groundwater Problems in Excavations: Case Studies From Turkey

M. Ekmekçi*

*Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Araştırma Merkezi Beytepe, Ankara (*ekmekci@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Yerüstü ve yeraltı kazı çalışmalarında yeraltısuyunun varlığı, kazı sonucunda oluşan şevlerde duraysızlık ve kazı alanına su basması gibi sorunlara neden olabilmektedir. Bu tür sorunların çözümü için yapılması gereken susuzlaştırma işlemlerinin etkin bir şekilde yapılabilmesi kazı alanına gelebilecek yeraltısuyu akımının ve kazı aynası gerisinde gözenek suyu basıncının kazıyla birlikte zamansal ve konumsal değişiminin kestirilebilmesine bağlıdır. Bu amaçla yapılacak olan çalışmalar yeraltısuyu akımını benzeştiren kısmi diferansiyel denklemlerinin çözülmesini hedeflemektedir. Yeraltısuyu akım denklemlerinin özel çözümlerine yönelik çalışmaların ilk ve en önemli aşaması, problemin incelendiği alanda hidrojeolojik kavramsallaştırma ve karakterizasyonu kapsamaktadır. Sunulan bildiride, önemli kazı alanları oluşturan açık ocak linyit işletmelerinde karşılaşılan/karşılaşılabilecek yeraltısuyu sorunlarının tanımlanmasında ve çözümünde hidrojeolojik kavramsallaştırma ve karakterizasyona yönelik yapılan çalışmalar Türkiye'den örnekler üzerinde irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık ocak, boşluk suyu basıncı, Hidrojeoloji, Kazı, Yeraltısuyu

ABSTRACT: *Occurence of groundwater in excavated areas might cause instability of created slopesand water ingress problems. Effective dewatering is essential when exctavation continues below the water table to provide a secure the activities in terms of safe working environment and to increase the stability of slopes created by excavation. Dewatering is the primary method applied to decrease the pore-water pressure which in turn increases the stability of slopes. On the other hand, an effective dewatering requires the knowledge of the groundwater inflow rate into the excavation and of the spatial and temporal variation of the pore-water pressure behind the excavation face. The groundwater inflow and porewater distiribution are estimated by solution of the partial differential equations that simulated the groundwater flow under certain hydrogeological setting. Therefore, the first stage of these studies is to construct a representative conceptual hydrogeological model. In this study, the role of hydrogeological conceptualization and characterization in solving groundwater problems in excavations was discussed on the basis of case studies from Turkey.*

Keywords: *Open pit, Pore-water pressure, Hydrogeology, Excavation, Groundwater*

1 GİRİŞ

Başta maden işletmeleri olmak üzere yerüstü ve yeraltı kazı çalışmalarında yeraltı suyunun varlığı, duraysızlık ve drenaj gibi mühendislik sorunlarına neden olabilmektedir. Yeraltısuyu seviyesinin altına inen kazılarda uygun çalışma ortamı yaratmanın yanı sıra kazı nedeniyle oluşan şevlerin duraysızlığının sağlanmasına katkısı nedeniyle etkin susuzlaştırma gerekir. Susuzlaştırma işlemi bir yandan kazı alanına gelen suyun ortamdan uzaklaştırılması, diğer yandan şevlerde olası kayma düzlemi üzerindeki gözenek suyu basıncının düşürülerek duraylılığın arttırılması amacıyla uygulanması gereken yöntemlerin başında gelmektedir. Bu uygulamanın etkin bir şekilde yapılabilmesi kazı alanına gelebilecek yeraltısuyu akımının ve kazı aynası geresinde gözenek suyu basıncının kazıyla birlikte zamansal ve konumsal değişimini kestirilebilmesine bağlıdır. Bu hesaplamalar, kazının yapılacağı alanda hidrojeolojik yapının tanımlanarak yeraltısuyu akım

denkleminin tanımlanan yapı için çizilmesini gerektirir. Bu amaçlarla, çözümü gereken ve kısmi bir diferansiyel denklem olan yeraltısuyu akım denkleminin değişkenleri (hidrolik yük dağılımı) ve parametrelerinin (hidrolik iletkenlik ve depolama katsayıları) tanımlanan alan için belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, hidrojeolojik yapının hidrostratigrafik birimlerin yayılım ve birbirleriyle olan dokanak ilişkilerinin tanımlanması; sistemin beslenme-depolama-boşalım dinamiğinin ortaya konması ve hidrojeolojik sınır koşullarının tanımlanmasını gerektiren hidrojeolojik kavramsallaştırma ve birimlerin hidrolik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilmesi gereken hidrojeolojik karakterizasyon, yeraltısuyuna ilişkin susuzlaştırma ve duraysızlık sorunlarına etkin çözüm geliştirilmesinin temelini oluşturmaktadır.

Türkiye'de kazı alanlarında yeraltısuyuna ilişkin sorunlar genellikle sorunun gerçekleşmesinden sonra çözülmeye çalışılmaktadır. Yeraltısuyuna bağlı su basmaları ve şev kaymaları Türkiye' de son yıllarda sık karşılaşılan ve mal ve can kaybına neden olan sorunlardır. Özellikle yerüstü ve yeraltı maden işletmeleri ile tünel kazılarında olası yeraltısuyu sorunlarının tanımı, boyutlandırılması ve olumsuz etkilerinin giderilmesi ve denetim altına alınabilmesi için kazı öncesi yapılması gereken çalışmalar ya bulunmamakta veya eksik ve yetersiz düzeyde kalmaktadır. Uzmanlık gerektiren bu çalışmaların planlanması, gerçekleştirilmesi ve değerlendirilerek etkin çözüm önerileri geliştirilmesi her şeyden önce doğru bir hidrojeolojik kavramsallaştırma ve karakterizasyona bağlıdır.

2 KAZI ALANLARINDA YERALTISUYUNA İLİŞKİN SORUNLAR

Kazı alanlarında yeraltısuyu varlığının yarattığı sorunlar kazının yerüstü veya yeraltında olmasına bağlı olarak farklı boyutlarda ve niteliklerde gözlenmektedir. Galeri ve tünel gibi yeraltı açıklıklarında tahkimat tasarımı ile ilgili dayanım değerlendirmelerinde (ör: Q, RMR ve RMI sistemi) önemli bir parametre olan yeraltısuyu varlığı, su basması şeklinde gözlenen ve iş güvenliğini tehdit eden bir sorun yaratabilmektedir. Yerüstü kazı alanlarında is yeraltısuyunun varlığı işletmede çalışma zorluğu yaratan göllenmelere neden olmasına ek olarak kazı nedeniyle oluşan şevlerde önemli şev duraysızlıklarına neden olabilmektedir.

2.1 Duraysızlık Sorunları

Yerüstü kazı alanlarında yeraltısuyunun varlığı, ortamı oluşturan malzemenin makaslama dayanımını denetleyen parametrelerden biri olan gözenek suyu basıncında değişime neden olmaktadır. Gözenek suyunda meydana gelen değişim Terzaghi (1925) tarafından tanımlanan ilişkiye uygun olarak etkin gerilmede değişime neden olmaktadır. Bu ilişki, şevlerin duraylılığı analizlerinde önemli bir yere sahiptir. Doğal bir yamacın veya bir mühendislik şevinin duraylı olup olmadığını ifade eden güvenlik katsayısı (F), harekete karşı koyan kuvvetlerin harekete neden olan kuvvetlere oranı olarak tanımlanabilir. Potansiyel kayma yüzeylerinde denge koşulu olarak değerlendirilen güvenlik katsayısı genellikle makaslama dayanımının (τ_s) makaslama gerilmesine (τ) oranı şeklinde ifade edilebilir. Makaslama dayanımı aşağıda verilen Mohr-Coulomb yenilme ölçütünden hesaplanır(Read and Stacey,2009).

$$\tau_s = c' + (\sigma - u)\tan\varphi' \quad (1)$$

Eşitlik 2'de;$\tau_s$makaslama dayanımı (kPa), c' etkin kohezyon (kPa), σtoplam normal gerilme (kPa), u gözenek suyu basıncı (kPa) ve φ′ etkin sürtünme açısı (^{0}) olup, (σ–u) terimi ise etkin gerilmeye karşılık gelmektedir. Litolojik birimlerde yeraltısuyu taneler arası boşluklar ve/veya süreksizliklerin oluşturduğu açıklıklarda bulunur. Suya doygun ortamlarda depolanan yeraltısuyu miktarı birim hacimdeki boşluk hacmi olarak tanımlanan gözenekliliğe bağlıdır. Bununla birlikte, şev duraylılığını etkileyen ve etkin gerilmeye karşılık gelen terimde ana bileşenlerden biri olan gözenek suyu basıncının değeri ve ortamdaki dağılımı hidrostatik koşullarda gözeneklilikten bağımsızdır. Geçirimliliğin düşük veya yüksek olması, hidrostatik koşullarda gözenek suyu basıncına etki etmez. Hidrostatik koşullarda,ortamdaki herhangi bir noktada gözenek suyu basıncı, bu noktanın üzerindeki su sütününun ağırlığına eşittir. Gözenek suyu basıncı piyezometrelerle ölçülmelidir. Kuyubaşı kotu

800 m ve derinliği 120 m olan bir piyezometrede yeraltısuyu seviyesinin kuyubaşı kotundan itibaren 30 m olarak ölçüldüğü durumda, piyezometre tabanındaki noktada gözenek suyu basıncı

h=(800-30)-(800-120)=90 m veya h=(120-30)=90 m yüksekliğindeki su sütunu ağırlığına eşit olan

$u=\gamma h$ eşitliğinden $u=9810x90=882900$ kg/m.s^2 = 900 kP aolarak bulunur.

Yukarıdaki eşitlikte, h ölçüm noktası üzerinde su sütunu yüksekliği veγise suyun özgül ağırlığıdır. Basınç yükü olarak da bilinen h piyezometrik basınç olarak tanımlanmaktadır. Yeraltısuyu seviyesinin üzerinde gözenek suyu basıncı negatif olup duraysızlık açısından etkisi dikkate alınmamaktadır. Görüldüğü gibi, hidrostatik koşullarda gözenek suyu basıncı sadece ve doğrudan piyezometrik basınca (basınç yüküne) bağlı olup malzemenin özelliklerinden bağımsızdır. Bu nedenle, şev duraysızlığı analizlerinde piyezometrik basıncın doğru bir şekilde ölçülmesi hesaplamalar açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Kazının yeraltısuyu seviyesinin altına indiği andan itibaren kazı alanına doğru oluşan hidrolik gradyan sonucu kazıya doğru yeraltısuyu akımı gerçekleşir. Akımın düşey bileşene sahip olduğu hidrodinamik koşullar altında gözeneksuyu dağılımı değişime uğrar. Kazı alanına akım nedeniyle gözeneksuyu basıncında düşme gözlenmesine karşın kazı aynasının gerisinde bir gözenek suyu basıncı gardyanı oluşur ve bu basınç gradyanı kazı aynası topuğuna bir kuvvet uygular. Sızma kuvveti olarak adlandırılan bu kuvvet gözenek suyu basıncının daha düşük olduğu kesimlere doğru olup ortamı oluşturan katı tanelerini yeraltısuyu akım yönünde hareket ettirme eğilimindedir. Kazı ilerledikçe hidrolik gradyanın da artması sonucunda sızma kuvveti büyür ve kazı şevinin duraylılığı azalır. Hidrodinamik koşullarda gözenek suyu basıncını dağılımını denetleyen faktörler ortamın hidrolik iletkenliği ve hidrolik gradyandır. Bu nedenle, hidrodinamik koşullarda şev duraylılığı analizleri için sadece piyezometrik basıncın ölçülmesi yeterli olmayıp aynı zamanda hidrojeolojik sistemin kavramsallaştırılması (beslenme ve boşalım (kazı aynası) kesimlerinde hidrolik yük ölçümü) ve karakterizasyon (hidrolik iletkenlik ve depolama katsayıları) gerekmektedir.

Sızma kuvvetleri, benzer şekilde galeri ve tünel gibi yeraltı kazılarında da benzer duraysızlık sorunlarına neden olabilmektedir. Yeraltı açıklıklarının oluşturduğu yüzeylerden meydana gelen yeraltısuyu akımının oluşturduğu hidrodinamik koşullar bu yüzeylerde sızma kuvvetlerinin etkili olmasına neden olabilmektedir. Tahkimat açısından önemli olan bu durum, ortamın hidrolik karakteristikleri ve hidrolik sınır koşulları tarafından denetlenmektedir. Dolayısıyla, yeraltı açıklıklarının kazısı sırasında karşılaşılabilecek bu tür sorunların çözümünün temelinde, benzer şekilde, hidrojeolojik sistemin kavaramsal modelinin oluşturulması ve ortamın karakterizasyonu ilk aşamada gerçekleştirilmesi gereken çalışmaların kapsamında yer alır.

2.2 Drenaj Sorunları

İşletme güvenliğini tehdit eden en önemli usur olan duraysızlık sorunlarının yanı sıra yeraltısuyunun kazı alanlarına doğru akımı, kazı alanında göllenmelere ve bataklaşmaya neden olarak işletme güçlüğü yaratmaktadır. Kazı alanına gelen suyun belirli noktalarda toplanarak ortamdan uzaklaştırılmasıyla kazı alanında bu olumsuz etki belirli bir oranda azaltılsa da işletme maliyetinin artışı ve atılan suyun kalitesi önemli çevresel sorunlara neden olabilmektedir. Sunulan çalışmada kalite sorunlarına değinilmemiş, kazı alanlarına gelebilecek yeraltısuyu miktarının hesaplanmasına yönelik yaklaşım ve yöntemler üzerinde durulmuştur.

Kazı alanlarına gelebilecek yeraltısuyu miktarının hesaplanması için kullanılan analitik ve nümerik çözümler, incelenen alandaki hidrojeolojik koşullara uygun yeraltısuyu akım denklemlerinin çözülmesiyle elde edilmektedir. Söz konusu denklemler, akım alanındaki hidrolik yük dağılımını benzeştiren kısmi diferansiyel denklemler olup duraysızlık sorunlarının çözümünde ihtiyaç duyulan gözenek suyu basıncı değerlerinin konumsal ve zamansal dağılımının da kestirilmesinde kullanılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, yeraltısuyu akım miktarının hesaplanmasını gerektiren "drenaj sorunları"yla gözenek suyu basınıcının kestirilmesini gerektiren "duraysızlık sorunları"na ilişkin çözümler aynı denklemlerin analitik veya nümerik çözümleri ile mümkün olabilmektedir.

3 KAZI ALANLARINA YERALTISUYU AKIMI DENKLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ

Gözenek suyu basıncının konumsal ve zamansal değişiminin kestirilmesinde kullanılan aşağıda verilen yeraltısuyu akım denklemi analitik ve/veya nümerik yöntemlerle çözülmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Bu denklemde, Kx, Ky, Kz : x,y,z yönünde hidrolik iletkenlik katsayısı (L/T), S_s: özgül depolama katsayısı (L^{-1}), h: hidrolik yük (L)

Hidrolik yüke (h) bağlı gözenek suyu basıncının, (u=ρgh) konumsal ve zamansal değişiminin belirlenebilmesi için Eşitlik 2'nin çözümü gerekir. Çözüm, a) denklemin parametreleri olan hidrostratigrafik birimlerin hidrolik karakteristikleri (K ve S_s) ve b) denklemin problemin tanımlandığı akım alanına özgü özel çözümünü elde edebilmek üzere başlangıç ve sınır koşulları; başlangıç koşulu denklemin bağımlı değişkeni olan hidrolik yükün (h) t=0 anındaki değerini, sınır koşulları ise akım alanının sınırındaki akım veya yük koşullarının tanımlanması anlamına gelmektedir.

3.1 Açık Kazı Alanlarına Yeraltısuyu Akımı

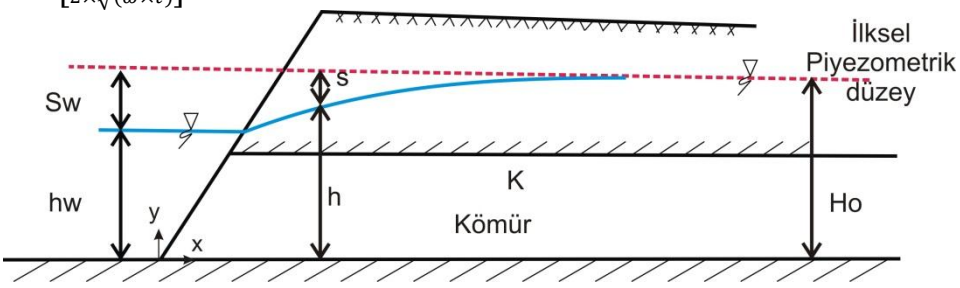
3.1.1 Basınçlı akım koşulları

Denklem, şev duraylılığı analizlerinde kullanılmak üzere şev gerisine doğru alınan boyuna kesitte basınçlı akım koşulları için düşüm (s) cinsinden

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{1}{\omega}\frac{\partial s}{\partial t} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ω, hidrolik difüzyon katsayısı olarak adlandırılır. Burada; sdüşüm, S akiferin depolama katsayısı, T akiferin iletimlilik katsayısı ve t ise zamandır. Denklemde, hidrolik difüzyon

$\omega = \frac{T}{S}$şeklinde tanımlanmıştır.Denklemin analitik çözümü Şekil 1'de verilen sınır koşulları için $s = S_w \times erfc\left[\frac{x}{2\times\sqrt{(\omega\times t)}}\right]$eşitliği ile ifade edilmektedir (Nguyen and Raudkivi, 1982). (4)

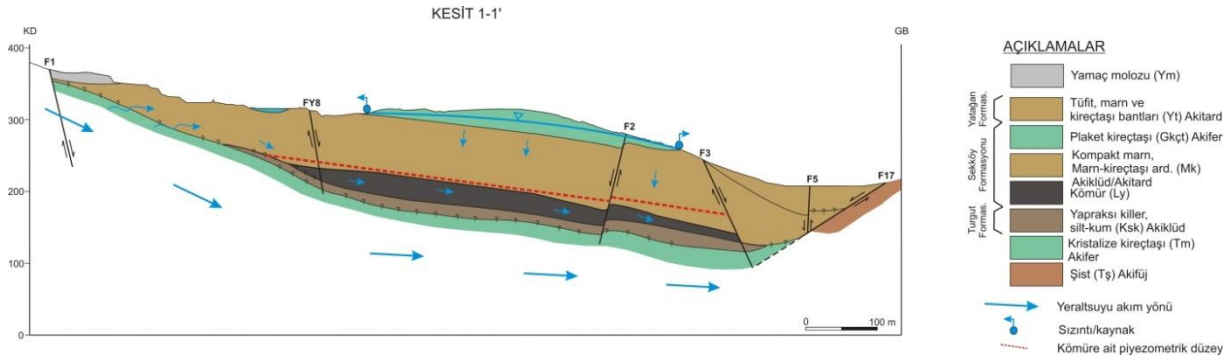


Şekil1 . Eşitlik 4 çözümü Basınçlı akım koşullarında yarı sonsuz bir akiferde kazı alanına yeraltısuyu akımı nedeniyle kavramsal model (Nguyen and Raudkivi, 1982).

Bu kavramsal model için kazı alanına gelebilecek yeraltısuyu miktarı (q) aşağıdaki denklem türetilmiştir.

$$s = \frac{q\times\sqrt{\omega}}{T} \times \left\{2\sqrt{t/\pi} \times \exp(-\frac{x^2}{4\omega t}) - x/\sqrt{\omega} \times erfc(\frac{x}{2\sqrt{\omega\times t}}\right\} \quad (5)$$

Şekil 2'de, TKİ Ege Linyitleri İşletmesi Işıkdere linyit işletmesi açık ocağı için oluşturulan hidrojeolojik kavramsal model gösterilmiştir. Kavramsal modelden de görüldüğü gibi iki geçirimsiz arasında bulunan linyit horizonu bir akifer konumundadır. Kazının kömür horizonunu kesmesiyle birlikte kazı aynası gerisinde piyezometrik düzeyinin zamana göre değişimi Nguyen and Raudkivi (1982)'ye göre hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen değerler Şekil 3'te verilen eğri takımı şeklinde gösterilmiştir. Uygulama alanında oluşabilecek her durum için ayrı ayrı çözülen denklem, bu amaçla çizilen jeolojik kesitlerden alınan sınır koşullarında piyezometrik seviyenin değişimini vermiştir. Şekilde, 10 metre kalınlığındaki linyit horizonunun üzerinde bulunan 20 m yüksekliğe sahip piyezometrik seviyenin farklı zamanlarda (gün) kazı aynasından geriye doğru uzaklıkla değişimi (h(x,t)) görülmektedir.



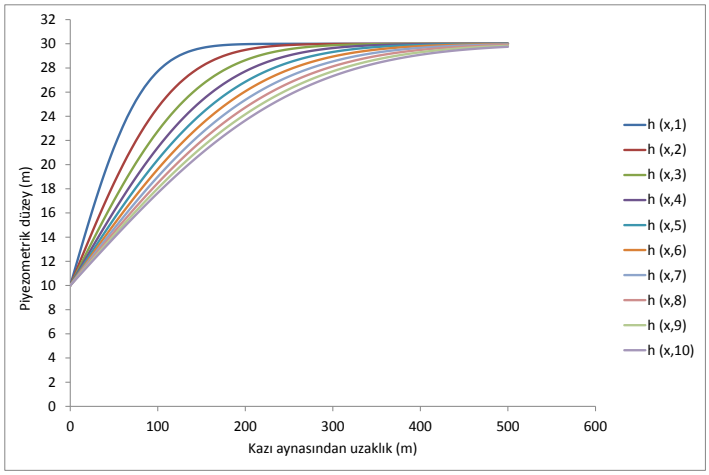
Şekil 2. Işıkdere (Milas) işletmesinde hidrojeolojik kavramsal model (Ulusay vd, 2012)

3.1.2 Basınçlı akım koşulları

Kazı aynasının yeraltısuyu seviyesini kestiği kesimlerde, şev duraylılığına ilişkin geriye dönük analizlerde kullanılmak üzere belirli zaman dilimlerinde, kazı aynasında ve ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesinin konumunun bilinmesine gerek duyulmuştur. Bu çalışma kapsamında, yeraltısuyu seviyesinin konumu, serbest akiferlerde kararsız akım koşullarını ifade eden ve izotrop ve homojen ortamlar için,

$$\frac{\partial}{\partial x}(h\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(h\frac{\partial h}{\partial y})=\frac{S_y}{K}\frac{\partial h}{\partial t} \tag{6}$$

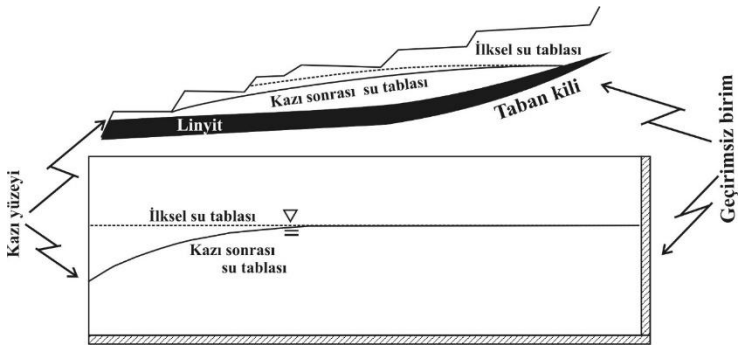
kısmi diferansiyel denkleminin İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından türetilen analitik çözümü kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Kazı aynasına olan boşalım sonucu şev gerisinde piyezometrik seviyenin zamana göre değişimi (Ulusay vd, 2012).

Problemi tanımlayan kısmi diferansiyel denklemin doğrusal olmaması nedeniyle, araştırıcılar çözümü olanaklı kılmak için çeşitli basitleştirmeler ve varsayımlar yapmışlardır. Yöntemin belirli bir alanda uygulanabilirliği, yöntemin dayandığı varsayımların uygulama alanında da geçerli olabilmesine bağlıdır. Yöntem; (1) kazı aynasının düşey olduğunu, (2) analizin yapıldığı düşey yüzeyin bir anda ortaya çıktığı, sızmanın kazı tamamlandıktan sonra başladığı, dolayısıyla kazı aynası ortaya çıktığında yeraltısuyunun statik seviyesinde bulunduğunu, (3) sistemin sınır koşullarının Şekil 4'te verildiği gibi, (4) ortamın homojen ve izotrop ve kazının daireselden çok uzunlamasına geliştiği, dolayısıyla kartezyen koordinatların geçerli olduğunu varsaymaktadır (İbrahim ve Brutsaert, 1965; Freeze ve Cherry, 1979)

Kazı aynasının yeraltısuyunu kestiği andan itibaren kazı alanına doğru meydana gelen akımın kararsız olması nedeniyle, gerek kazı aynasında gerekse ayna gerisinde yeraltısuyu seviyesi zamanla değişmektedir. İbrahim ve Brutsaert (1965) elde ettikleri çözümün laboratuvar model boyutlarından bağımsız hale getirilmesi amacıyla hidrolik yük, uzaklık, zaman ve akım gibi parametreleri uyarlamış ve boyutsuzlaştırmışlardır. Bu şekilde, elde ettikleri çözüm, yukarıdaki varsayımları gerçekleyen her özel problemde kullanılabilir hale gelmiştir.



Şekil 4. Yarı sonsuz serbest akifer koşullarında kazı aynasına olan boşalımın çözümünde kullanılan kavramsal model (İbrahim and Brutseart,1965; Ulusay vd, 1998).

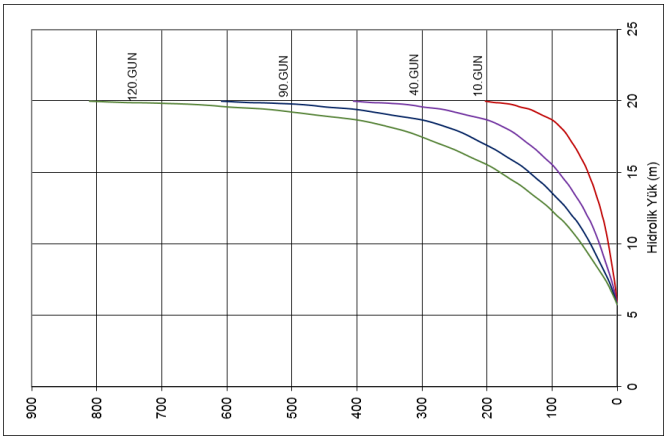
Çözümün boyutsuz parametrelerle ifade edilmesi durumunda, akım alanındaki herhangi bir noktanın kazı aynasından uzaklığı (x) yerine U=x/L şeklinde ve bu noktadaki hidrolik yük (h) yerine Y=h/H şeklinde verilebilmektedir. Boyutsuz olarak verilen U ve Y parametrelerinin değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, zaman parametresi de akiferde bir su molekülünün L uzaklığını alabilmesi için gereken süreye göre normalleştirilerek boyutsuzlaştırılmıştır. İbrahim ve Brutsaert (1965) tarafından kazı aynalarından meydana gelen serbest drenaj problemini tanımlayan diferansiyel denklemin analitik çözümü abaklara dönüştürülerek varsayımları sağlayan her özel durum için kullanılabilir hale getirilmiştir. Abakların kullanılabilmesi için boyutsuz zaman (τ) ve boyutsuz debi (γ) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmalıdır. Bolu Göynük Himmetoğlu linyit açık ocağı için İbrahim and Brutseart (1965) çözümünden elde edilen yük değişimi Şekil 6'da verilmiştir.

$$\tau = \frac{K \times H}{S_y \times L^2} \times t \text{ ve} \gamma = \frac{S_y \times L}{K \times H^2} \times q \tag{7}$$

Serbest akifer koşullarında kazı alanlarına gelebilecek akım miktarı ve kazı aynası gerisinde oluşabilecek piyezometrik basınç dağılımı için geliştirilen diğer bir çözüm Niccoli and Marinelli (1990) tarafından önerilmiştir. Bu çözümde dikkate alınan kavramsal model ve sınır koşulları Şekil 5'te gösterilmiştir. Yeraltısuyu sisteminin iki bölgeye ayrıldığı bu çözümde birinci ve ikinci bölgeden kazı alanına gelebilecek yeraltısuyu akımı sırasıyla

$$Q_1 = W \times \pi \times ({r_0}^2 - {r_p}^2) \text{ve} \quad Q_2 = 4 \times r_p \times \frac{K_{h1}}{m_2} \times (h_0 - d) \tag{8}$$

eşitlikleriyle hesaplanabilmektedir.



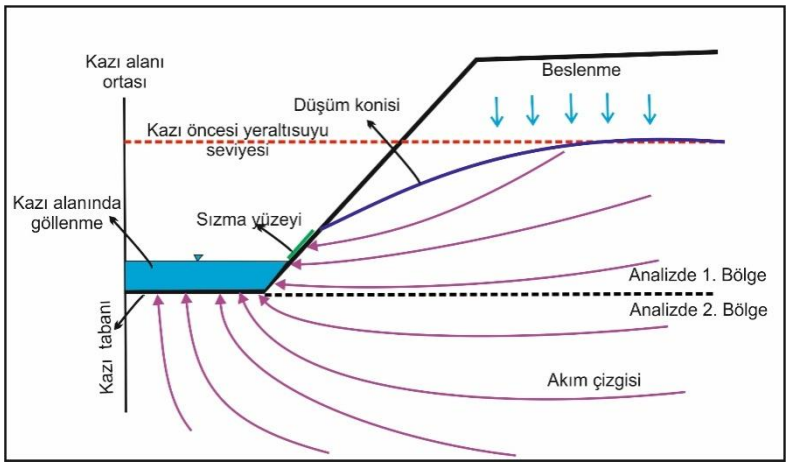
Şekil 6. Serbest akifer koşullarında kazı aynasına olan boşalım sonucu şev gerisinde piyezometrik seviyenin zamana göre değişimi (Ulusay vd, 1998).

Çözümün, şevlerde gözenek suyu basıncının hesaplanmasına yönelik olarak verdiği hidrolik yük dağılımı eşitlikleri birinci ve ikinci bölge için sırasıyla

$$H_{1(r)} = H_0 - h_0 + \sqrt{\left\{{h_p}^2 + \frac{w}{K_{h_1}} \times \left[({r_0}^2 \times \ln\left(\frac{r}{r_p}\right) - \frac{({r_0}^2 - {r_p}^2)}{2}\right]\right\}} \quad \text{ve}$$

$$H_{2(r,z)} = H_0 - \frac{2(h_0 - d)}{\pi} sin^{-1}\left\{\frac{2r_p}{\sqrt{(r-r_p)^2+(m_2 z)^2}+\sqrt{(r+r_p)^2+(m_2 z)^2}}\right\} \qquad (9)$$

Eşitliklerdeki simgelerde 1 ve 2 sırasıyla birinci ve ikinci bölgeye ait değerler olduğunu göstermektedir. H (r) kazı alanından r uzaklıktaki hidrolik yük; H_0 ilksel hidrolik yük, r_p, kazı aynasının kazı alanı orta yerinden uzaklığı, K_h ve K_v yatay ve düşey yöndeki hidrolik iletkenlik ve $m_2 = \sqrt{\frac{K_{h_2}}{K_{V_2}}}$ olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5. Marinelli and Niccoli (1990) çözümünün dayandığı kavramsal model

4 ETKİN ÇÖZÜM İÇİN YAPILMASI GEREKEN HİDROJEOLOJİK ÇALIŞMALAR

4.1. Hidrojeolojik Kavramsal Modelin Oluşturulması

Yukarıda analitik çözümlere örnek olarak verilen eşitliklerin uygulanabilmesi için arazide gerçekleştirilmesi gereken hidrojeoloji amaçlı çalışmalar, öncelikle hidrojeolojik kavramsal modelin doğru bir şekilde ortaya konmasını kapsamalıdır. Hidrojeolojik kavramsal model, kazı yapılacak alanın bağlı olduğu hidrojeolojik sistemde akım alanını oluşturan hidrostratigrafik birimlerin yayılım ve kalınlıklarının belirlenmesini gerektirmektedir Bu amaçla, öncelikle uygun ölçekte jeoloji haritalarından ve bu haritalardan yararlanarak kazı yapılacak alanı farklı doğrultularda kesen jeolojik kesitler hazırlanmalıdır. Alana ait jeofizik çalışmalarından farklı amaçlarla açılan sondaj kuyularından alınan litolojik loglardan da yararlanılarak jeolojik yapı, yapısal unsurlar da dikkate alınarak ve litostratigrafik birimlerin birbirleriyle olan dokanak ilişkilerini de gösterecek şekilde ortaya konmalıdır. İkinci aşamada, litostratigrafik birimlerin gözeneklilik ve geçirimlilik özelliklerine göre hidrostratigrafik birimlere dönüştürülmesi ve jeolojik yapıyı tanımlayan kesitler temel alınarak yeraltısuyu oluşumunu ve akımını denetleyen hidrojeolojik yapı, akım alanının geometrisiyle birlikteye ortaya konmalıdır. Jeolojik/hidrojeolojik yapının tanımlanmasından sonra yapılması gereken çalışmalar hidrolojik/hidrojeolojik özelliklere yöneliktir. Bu kapsamda, yeraltısuyu seviyelerinin kot olarak akım alanındaki hidrolik yük (piyezometrik basınç/gözenek suyu basıncı) dağılımının haritalanması büyük bir önem taşımaktadır. Hidrostratigrafik yapı üzerine yeraltısuyu seviyesi, ile beslenme ve boşalım alanlarının tanımlanması; uzun yıllar ortalamaları dikkate alınarak bir hidrolojik bütçe oluşturulmasıyla kavramsallaştırma ile ilgili ilk model oluşturulmuş olacaktır. Bu çalışmalar, çalışma alanındaki hidrojeolojik yapının yukarıda verilen çözümlerin dayandığı kavramsal modellerden hangisi ile uyumlu olabileceğini gösterecek ve böylece en uygun çözüm yönteminin seçilmesini sağlayacaktır.

4.2. Hidrojeolojik Karakterizasyon

İnceleme alanındaki hidrojeolojik yapıya uygun bir analitik çözümün uygulanabilmesi için ilgili eşitlikte yeralan parametrelerin sayısal olarak ve alanı temsil edecek şekilde elde edilmesi amacıyla laboratuvar ve arazi testlerinden yararlanılmaktadır. Çözüm için belirlenmesi gereken parametrelerin başında hidrolik iletkenlik ve depolama katsayıları gelir. Bu parametrelerin belirlenmesi amacıyla öncelikle akifer (pompa) testlerinin gözlem kuyuları da kullanılarak yapılması zorunludur. Bu olanakların bulunamaması durumunda, jeoteknik sondaj kuyularında basınçlı su testlerinin bu doğrultuda değerlendirilmesi gerekir. Karakterizasyon amacıyla yapılacak arazi deneylerinin eksik yapılması veya yapılamaması, çözümde önemli belirsizliklere yol açacağından, etkin bir çözüm elde edilebilmesi mümkün olamayacaktır. Bu nedenle, bu tür çalışmalarda, hidrojeolojik kavramsallaştırma ve karakterizasyona yönelik sondaj kuyusu açma ve arazi testlerinin yapılmasının bir zorunluluk olduğu anlaşılmalıdır.

5 KAYNAKLAR

Freeze R. A., and Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604p.

Ibrahim, H.A., and Brutsaert, W., 1965, Inflow hydrographs from large unconfined aquifers. J. Irr.Drain. Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 91, pp. 21-38

Marinelli, F, and Niccoli, W.L., 2000, Simple analyticalequations for estimating ground water inflow to a minepit: Groundwater, v. 38, no. 2, p. 311-314.

Nguyen, V.U., and Raudkivi, A. J., 1982. Transient two-dimensional groundwater flow. Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques, 4 (12), 427-438.

Read, J and Stacey, P., 2009. Guidelines for Open Pit Design. CSIRO Publishin, CRC. China 487.

Ulusay, R., Ekmekçi, M., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Tuncay, E. ve Erdoğan, S., 1998. TKI Himmetoglu (Göynük-Bolu) Linyit Açık işletmesi Şev Duraylılığı Projesi

Ulusay, R., Ekmekçi, M., Tuncay, E. ve Hasançebi, N., 2012. TKİ Işıkdere (Milas-Muğla) linyit sektörü açık işletme şevlerinin duraylılığının ve drenaj koşullarının araştırılması. Ankara, 224 s.

Jeotermal Enerji

Savcılı-Büyükoba (Kırşehir-Kaman) Sıcak ve Mineralli Su Kaynağının Hidrojeokimyasal İncelemesi

Hydrogeochemical Investigation of Thermal and Mineral Water of Savcılı-Büyükoba (Kırşehir-Kaman)

C. Yurteri[1,*], Ş. Şimşek[1]

[1] *Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü 06800 Beytepe/Ankara*
*(*cyurteri@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Bu çalışmada Kırşehir (Kaman) Savcılı-Büyükoba jeotermal alanında yer alan sıcak ve mineralli suların kökenlerinin, kimyasal özelliklerinin belirlenmesi, soğuk su kaynakları ile olan ilişkilerinin aydınlatılması ve bağlı bulundukları jeotermal sistemin açıklanması amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma alanında jeoloji, hidrojeoloji, hidrojeokimya çalışmaları yapılmıştır. Çalışma alanı, Ankara'nın 150 km güneydoğusunda Hirfanlı Barajı'nın 5 km kuzeyinde Kırşehir ili Kaman ilçesi sınırlarında yer almaktadır. Alandaki sıcak ve mineralli su kaynağının sıcaklığı 30,01°C-34,6°C ve özgül elektriksel iletkenliği 513-565 µS/cm arasında değerler göstermektedir. İyon içeriklerine göre sıcak ve mineralli su kaynağı Na-Cl sular sınıfına girmektedir. Mineral doygunluk hesaplamalarına göre bölgedeki sıcak su kaynağının kalsedon, kuvars gibi silis mineralleri ile kalsit, dolomit, aragonit gibi karbonatlı minerallere doygun oldukları belirlenmiştir. Savcılı-Büyükoba jeotermal alanının rezervuar sıcaklığı silis jeotermometresi ile 69-72°C aralığında hesaplanmıştır. Bölgedeki sıcak su kaynağının yerel meteorik su doğrusu üzerinde yer alması ve düşük ^{3}H değerine sahip olması, derin ve uzun süreli yer altı dolaşımlı meteorik kökenli su olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak ve Mineralli Sular, Jeotermal, Hidrojeokimya, Kaman, Kırşehir

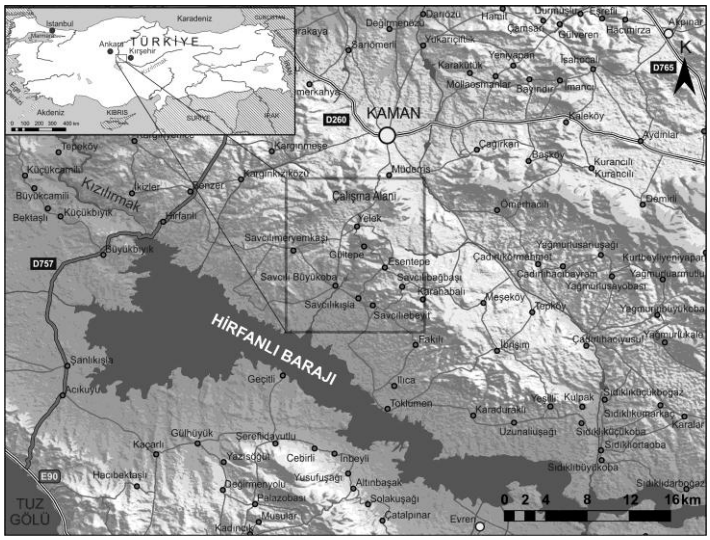
ABSTRACT: *The aim of this study is to clarify the origin of thermal and mineral waters, connected with geothermal system and the relationship between cold and thermal waters in Savcılı (Kırşehir) and its vicinity. Accordingly geological, hydrogeological and hydrogeochemical studies are carried out in the study area. The study area is located in Kaman province of Kırşehir city in Central Anatolia which is about 150 km southeast of Ankara and 5 km north of Hirfanlı Dam. Temperature of thermal waters in the field changes between 30,01-34,6°C and electrical conductivity values change between 513-565 (µS/cm). According to ionic content, the hydrochemical facies of the thermal waters Na-Cl type. According to the mineral saturation calculations, hot water springs are saturated with respect to quartz, chalcedony, calcite, aragonite and dolomite minerals. Temperature of reservoir was calculated as 69-72°C by silica geothermometry. Thermal waters located along the Local Meteoric Water Line (LMWL) and the low tritium content of thermal waters suggests that geothermal waters have a meteoric origin show that the thermal aquifer of Savcılı-Büyükoba geothermal area is recharged by groundwater having relatively long residence time which represents a deep groundwater circulation system.*

Keywords: *Thermal and Mineral Waters, Hydrogeochemistry, Geothermal, Kaman, Kırşehir*

1. GİRİŞ

İnceleme alanı İç Anadolu'da Ankara ilinin 150 km güneydoğusunda, Hirfanlı Barajının 5 km kuzeyinde, Kırşehir ili Kaman ilçesine bağlı Savcılı kasabasında yer almaktadır. İncelenen sıcak su kaynağı Kaman'a 18 km, Savcılı'ya ise 2 km uzaklıkta Hamamözü deresi içerisinde yer almaktadır (Şekil 1). Bu çalışmada inceleme alanında yer alan sıcak su kaynaklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılarak rezervuar litolojileri, izotop verileri ile sıcak su rezervuarının beslenme alanı ve bölgedeki yeraltısuyu dolaşım sisteminin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerine ilişkin önceki çalışmalar incelenmiş olup saha çalışmalarıyla bu

çalışmalar birlikte değerlendirilerek bölgenin litolojik ve hidrojeolojik özellikleri belirtilmiştir. Saha çalışmalarında sıcak ve mineralli su kaynakları ile soğuk su kaynaklarından örnekleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanındaki sıcak su kaynaklarının rezervuar litolojileri su kimyası çalışmaları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Savcılı-Büyükoba jeotermal alanındaki hazne kayaç sıcaklıkları silis ve katyon jeotermometre eşitlikleri ile tahmin edilmiştir. İnceleme alanındaki kaynakların beslenme alanları duraylı izotoplar ile belirlenmiştir. Suların fiziksel ve kimyasal özellikleri izotop analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilerek bölgedeki yeraltısuyu dolaşım sistemi belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. İnceleme Alanı Yer Bulduru Haritası

2. BÖLGESEL JEOLOJİ

İncelenen alanda temelde, Kırşehir masifi olarak bilinen Paleozoyik yaşlı metamorfik birimleri gözlenir. Kırşehir masifinin metamorfik serileri Üst Kretase yaşlı pelajik çökellerle ara katkılı bazik volkanoklastik kayalardan oluşan ofiyolitli melanj birimleri tarafından tektonik olarak üzerlenmektedir. Bu birimler magmatik etkinliğe bağlı olarak yüzeyleyen Mesozoyik (Üst Kretase-Paleosen?) yaşlı monzonitli granitler tarafından kesilmektedir. Bu birimleri, uyumsuzlukla taban konglomerası ile başlayıp kumtaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı ile devam eden Eosen yaşlı (Lütesiyen) seri ile Miyosen-Pliyosen yaşlı Kızılırmak formasyonu örtü birimleri üzerlemektedir. En üstte ise gevşek çimentolu kum ve çakıllardan oluşan en çok Hamamözü dere yatağı ve çevresinde gözlenen Kuvaterner yaşlı alüvyon birimler görülmektedir (Kara ve Dönmez, 1990).

3. HİDROJEOLOJİ

3.1 Birimlerin Hidrojeolojik Özellikleri

İnceleme alanında bulunan litolojik birimler su taşıma özelliğine göre geçirimsiz, yarı geçirimli ve geçirimli birimler olarak belirlenmiştir. Birimlerin geçirimlilik özellikleri arazide yapılan gözlemler, açılan sondaj kuyularından elde edilen veriler ve doğal su boşalımları olup olmamasına göre değerlendirilmiştir. Çalışma alanında temeli oluşturan Paleozoyik yaşlı Kırşehir Masifinin gnays, şist, mermer, amfibolit seviyelerinin kırıklı çatlaklı, faylı zonları hidrojeolojik açıdan geçirimlidir. İnceleme alanında rezervuar oluşturan birimlerden biri olan Üst Kretase-Paleosen? yaşlı granit, granodiyoritleri içeren Baranadağ granitoyidlerinin altere kırıklı, çatlaklı zonları hidrojeolojik açıdan geçirimlidir. Eosen ve Miyosen-Pliyosen yaşlı örtü çökellerinin kireçtaşı seviyeleri yerel akifer oluşturabilme potansiyeline sahiptir. Hamamözü dere yatağında yer alan çakıl, kum ve kilden oluşan alüvyonlar geçirimli özellikte olup hem sıcak su hem soğuk su için önemli bir akiferdir. Bölgede çamurtaşı, kumtaşı, çakıltaşı, kireçtaşı ara düzeyli çamurtaşı ardalanmasından oluşan Eosen ve

Miyosen-Pliyosen yaşlı çökeller örtü kayaç niteliğindedir. Ayrıca temelde yer alan Paleozoyik yaşlı amfibol, şist, gnays ve kuvarsit gibi birimler ile Üst Kretase yaşlı diyabaz ve bazalt gibi volkanik kayaçların kırık çatlak içermeyen bölümleri de geçirimsiz özelliktedir.

3.2 Su Noktaları

İnceleme alanındaki su noktaları sıcak su kaynak ve kuyuları ile soğuk su kaynak çıkışları ile gölet ve barajdan oluşmaktadır. Çalışma alanında yer alan soğuk su kaynaklarının büyük çoğunluğunun geçirimli birimler ile geçirimsiz birim dokanakları ve kırık çatlak zonlarından çıkmakta olduğu gözlenmektedir. İnceleme alanındaki soğuk su kaynaklarının genellikle beslenme alanları sınırlı olup, düşük debilidirler. Savcılı-Büyükoba sıcak su kaynakları Kaman'a 18 km, Savcılı'ya ise 2 km uzaklıkta Hamamözü deresi içinde yeralmaktadır. Buradaki mevcut sıcak su Hamamözü deresi içinde alüvyonlardan yüzeylenmektedir (Ürgün,1979). Kırşehir-Kaman-Savcılı-Büyükoba kaplıcasında Savcılı Belediyesi tarafından yapılan SB-1 sıcak su sondajında suya rastlanamaması üzerine sıcaksu bulma imkanlarını araştırmak amacıyla 1986 yılında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından kaplıca çevresinde dört adet sığ sondaj (SB-2, SB-3, SB-4, SB-5) yapılmıştır. Açılan dört adet sığ kuyunun toplam metrajı 189,90 m.'dir. Açılan SB-2 kuyusundan artezyen halinde sıcak su gelişi olmaktadır. MTA verilerine göre çıkmakta olan suyun sıcaklığı 34,5°, debisi ise 5 l/s 'dir (Tekin ve Tekin, 1986). SB-2 kuyusu 55 metre, SB-3 kuyusu 57,70 metre, SB-4 kuyusu 40 metre, SB-5 kuyusu 37 metre derinliktedir. Kuyuların sıcaklık ve debileri ise SB-2 kuyusunda 34,5°C, debisi 5 l/s SB-3 kuyusu 25°C, debisi 0,3 l/s SB-4 kuyusu 19,0°C, debisi 0,1 l/s, SB-5 kuyusu ise 20°C, debisi 0,028 l/s'dir (Önder ve Tanıdır, 1986).

4. HİDROJEOKİMYA

4.1. Suların Kimyasal Özellikleri

Savcılı-Büyükoba jeotermal alanında bulunan sıcak ve mineralli suların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenip jeotermal sistem içinde geçirdikleri fizikokimyasal süreçlerin ortaya konulması amacıyla bölgedeki sıcak ve mineralli sulardan dönemsel örnekleme çalışmaları yapılmıştır. Yerel yeraltısuyu dolaşım sistemini temsil eden ve jeotermal sistemin beslenim alanında yeralması muhtemel soğuk su kaynaklarından, derelerden, gölet ve barajdan örnekler alınmış, kimyasal analizleri yapılmıştır. Suların sıcaklık, pH, elektriksel iletkenlik (EC) değerleri arazide yerinde ölçümlerle belirlenmiştir. Örneklenen sulara ait analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Kimyasal analiz sonucunda, Savcılı-Büyükoba sıcak su kaynağı Na-Cl su tipinde tuzlu sular sınıfına girmektedir. İnceleme alanındaki yeraltı sularının akım yönündeki hidrojeokimyasal evrimi Ca-HCO_3 su tipinden Na-Cl'li su tipine doğrudur. Savcılı-Büyükoba sıcaksu kaynağının yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre Mart 2014 ve Ağustos 2014 dönemlerindeki pH değeri 9,19-9,58, Elektriksel İletkenlik değeri (EC) 513-565 µS/cm ve sıcaklığı 30,01-34,6°C olarak ölçülmüştür. Kimyasal analizler olarak sadece Mart 2014 dönemi sonuçları verilmiştir. İnceleme alanında Schoeller diyagramına göre sıcak suların aynı kökenli olduğunu ve benzer akiferlerden beslenen sular olduğu görülmektedir. Piper diyagramında ise sıcak sular tuzlu sular olup, bölgedeki soğuk sulardan ayrı bir grup oluşturmaktadırlar. Bölgede yer alan sıcak ve mineralli sular ile soğuk su örnekleri Wilcox diyagramlarına göre incelendiğinde; KSBO-9a sıcak su kaynağı ve SB-3 sıcak su kuyusu şüpheli kullanılabilir, KSBO-9b, SB-2, SB-4, SB-5 sıcak su kaynak ve kuyuları ise şüpheli kullanılamaz bölümünde yer almaktadır. Bölgede yer alan diğer soğuk su kaynaklarının ise sulama için uygun olduğu belirlenmiştir. ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı sonuçlarına göre sıcak su kaynakları ve sıcak su kuyuları C_2-S_2 (Orta derecede tuzlu-orta sodyumlu sular) ve C_2-S_3 (Orta derecede- tuzlu-yüksek sodyumlu sular) grubunda yer almaktadır. Soğuk sular ise C_1-S_1 (az tuzlu-az sodyumlu), C_2-S_1 (orta tuzlu- az sodyumlu) ve C_3-S_1 (yüksek tuzlu-az sodyumlu) sular grubunda yer almaktadırlar.

Çizelge 1. İnceleme alanındaki su noktalarından alınan örneklerin kimyasal analiz çizelgesi (Mart-2014)

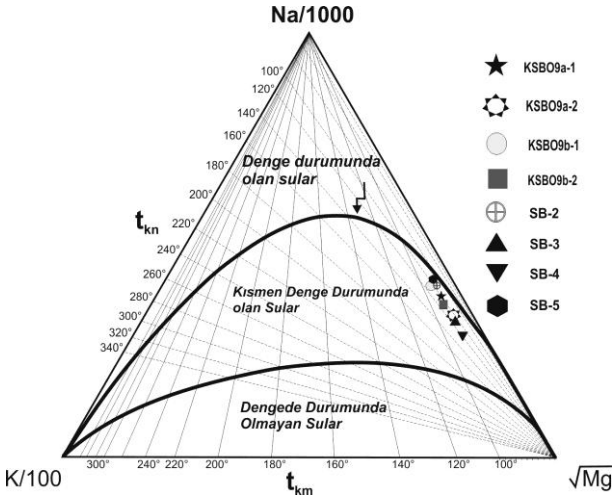
Örnek No	Tür	Tarih	T (ºC)	pH	EC (25°C) (µS/cm)	Na^{+} (ppm)	K^{+} (ppm)	Ca^{+2} (ppm)	Mg^{+2} (ppm)	Cl^{-} (ppm)	SO_4^{-2} (ppm)	HCO^{3-} (ppm)	CO_3^{-2} (ppm)	F (ppm)	Li (ppm)	SiO_2 (ppm)	B (ppm)
KSBO-1	Kaynak	14.03.2014	8,23	6,73	179	6,86	0,59	26,77	4,82	1,69	9,63	94,82	0,00	0,18	0,01	24,043	0,00
KSBO-2	Kaynak	14.03.2014	10,38	7,07	274	1,59	0,46	65,05	1,96	1,52	5,93	195,96	0,00	0,09	0,00	8,5475	0,00
KSBO-3	Kaynak	14.03.2014	7,49	7,11	267	2,39	1,47	58,31	3,32	1,72	6,87	177,00	0,00	0,10	0,00	14,411	0,00
KSBO-4	Kaynak	14.03.2014	11,96	6,91	454	8,15	0,45	89,07	7,86	2,14	22,88	246,54	0,00	0,41	0,01	20,85	0,02
KSBO-5	Değirmenözü Deresi	14.03.2014	7,25	7,31	576	19,59	0,51	105,15	15,50	13,69	47,20	328,27	0,00	0,38	0,02	18,494	0,00
KSBO-6	Hirfanlı Barajı	14.03.2014	8,04	7,71	1449	172,06	6,36	126,19	35,70	256,50	388,68	151,71	0,00	0,30	0,04	9,9609	0,12
KSBO-7	Kaynak	15.03.2014	13,61	7,00	796	34,55	12,36	125,22	21,18	31,81	70,55	379,29	0,00	0,36	0,02	28,597	0,05
KSBO-8	Savcılıbüyükoba Göleti	15.03.2014	8,52	7,37	409	18,96	1,32	63,02	15,65	11,66	31,85	233,89	0,00	0,37	0,02	11,165	0,03
KSBO-9a	Sıcak Su Kaynağı	15.03.2014	30,01	9,49	513	111,27	1,24	9,30	0,32	88,93	49,35	12,64	37,31	7,76	0,06	47,443	0,11
KSBO-9b	Sıcak Su Kaynağı	15.03.2014	33,58	9,58	527	111,88	1,38	9,15	0,14	88,27	48,96	31,61	37,31	7,70	0,07	47,076	0,11
KSBO-10	Kaynak	15.03.2014	12,62	6,96	535	28,99	0,59	84,65	13,27	13,20	66,95	227,57	0,00	0,54	0,01	14,254	0,06
KSBO-11	Yagmur+Kar	15.03.2014	16,52	7,59	289	6,06	2,41	58,76	3,49	3,63	14,89	177,00	0,00	0,16	0,00	10,223	0,01
SB-2	Kuyu	1986	34,5	8,5	500	106	1	4,4	0,2	78	45	61	12	7,9	*	51	*
SB-3	Kuyu	1986	25	8,5	478,3	104	1,1	13,0	0,4	75	59	73	12	7,3	*	47	*
SB-4	Kuyu	1986	19	8,82	483,7	114	1,3	5,6	0,5	81	63	61	12	7,9	*	50	*
SB-5	Kuyu	1986	20	8,83	478,3	106	1	4,4	0,2	78	45	61	12	<0,1	*	51	*

4.2 Jeotermometre Uygulamaları

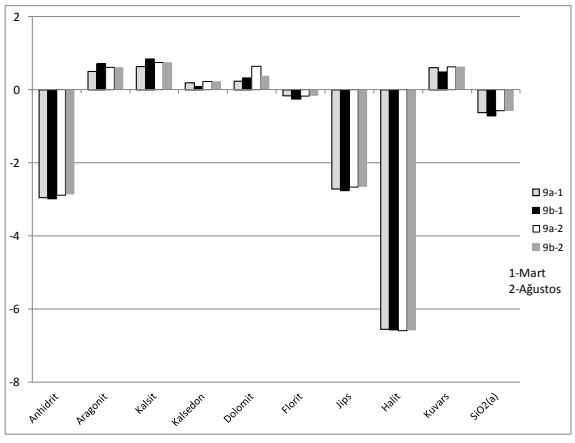
Jeotermal sular yeraltından yüzeye erişirlerken temas ettikleri kayaçlarla ısı alışverişi, soğuk yeraltı suları ile karışımı, örtü kayaçların çok ince oluşu veya bulunmayışı gibi süreçler nedeniyle soğurlar ve rezervuar içindeki sıcaklıklarından çok daha düşük sıcaklıklara sahip olurlar. Akifer içerisindeki akışkan sıcaklığının tahmin edilmesi amacıyla, kaynak ve kuyu başında yapılan kimyasal analizlerden yararlanılarak jeotermometre yöntemleri geliştirilmiştir. Na-K-Mg üçgen diyagramı sıcak suların katyon jeotermometrelerine göre hazne kaya sıcaklıklarının belirlenmesinde ve su ile kayaç arasındaki mineral denge ilişkilerinin incelemesinde kullanılan bir diyagramdır. Giggenbach (1988)'e göre "olgun olmayan (immature) (denge halinde olmayan)" seyrelmiş jeotermal sularda K-Na arasındaki denge sıcaklığı kullanılarak değerlendirme yapılmasının uygun olmadığını, "olgun olan (mature) (denge durumunda olan sular)" hattında ve üzerinde yer alan jeotermal sulara katyon jeotermometrelerinin uygulanmasının daha doğru sonuç vereceğini belirtmiştir. Giggenbach diyagramında Savcılı-Büyükoba sıcak su kaynağı ve sıcak su kuyuları dengede olmayan sular bölümünde yer aldığından katyon jeotermometreleri ile hesaplanan hazne kaya sıcaklıklarına şüpheli yaklaşmak gerekmektedir (Şekil 2). Kuvarsa dayalı jeotermometre eşitlikleri ile sıcak su kaynakları ve sıcak su kuyuları için 85-103°C aralığında rezervuar sıcaklıkları elde edilmiştir. Ancak rezervuar sıcaklığının 180°C'den daha düşük olması nedeniyle kuvars jeotermometresi yerine kalsedon jeotermometresinin uygulanması daha uygun görülmüştür. Kalsedon formuna dayalı jeotermometre eşitlikleri ile sıcak su kaynakları ve sıcak su kuyuları için 68-74°C aralığında rezervuar sıcaklıkları hesaplanmış olup daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

4.3 Suların Mineral Doygunlukları

Çalışma alanındaki sıcak ve soğuk su kaynaklarının anhidrit, aragonit, kalsit, kalsedon, dolomit, jips, halit, kuvars ve silis minerallerine göre doygunluk durumu incelenmiş ve PHREEQC (Parkhurst ve Appelo,1999) programı kullanılarak doygunluk indisi (SI) değerleri hesaplanmıştır. Suların mineral doygunluk durumlarının hesaplanması yeraltısularında oluşan kimyasal tepkimeler, hidrokimyasal ortam ile bu suların üretim ve iletimi aşamasında oluşabilecek kabuklaşma ve korozyon problemlerinin önceden tahmin edilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Yapılan doygunluk hesaplamalarına göre bölgedeki sıcak su kaynaklarının anhidrit, jips gibi sülfatlı mineraller ile halit ve silise doygun olmadıkları, ancak bu suların kalsedon, kuvars gibi silis mineralleri ile kalsit, dolomit, aragonit gibi karbonatlı minerallere doygun oldukları belirlenmiştir (Şekil 3). Elde edilen sonuçlar, yüzeye çıkan sıcak suların kabuklaşma yapıcı özellikte olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. Savcılı-Büyükoba sıcak su kaynaklarının Na-K-Mg üçgeninde denge durumları



Şekil 3. İnceleme alanındaki sıcak sulara ait mineral doygunluk diyagramı (Mart-Ağustos 2014)

4.4 İzotop Hidrojeolojisi

İnceleme alanında yer alan sıcak ve mineralli su kaynakları ile birlikte soğuk su kaynakları ve yüzey sularından duraylı izotop ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) örnekleme çalışmaları Mart-Ağustos 2014 tarihlerinde olmak üzere iki dönem halinde gerçekleştirilmiştir. Savcılı-Büyükoba sıcak sularının Dünya Meteorik Su Doğrusu (Craig, 1961) üzerinde yer alması jeotermal sistemin meteorik yağışlardan beslendiğini göstermektedir. Buna göre, Savcılı-Büyükoba sıcak ve mineralli suları meteorik kökenli olup, yağış suları çatlak, kırık ve faylar boyunca derinlere süzülmekte ve bu süreçte ısınarak fay veya etkili çatlaklar boyunca hazne kayaya ve sonrasında yeryüzüne kadar ulaşmaktadır. Bununla birlikte sıcak suların (KSBO-9a, KSBO-9b) $\delta^{18}O$ ve $\delta^{2}H$ değerleri kendi aralarında çok fazla bir değişim göstermemekle beraber $\delta^{18}O$ değerleri soğuk sulara göre daha negatif değerler sunmaktadır. Clark ve Fritz (1997)'e göre enlem ve yükseklik artıkça, $\delta^{18}O$ ve $\delta^{2}H$ değerleri düşmektedir. Bu durumda sıcak su kaynaklarının daha yüksek kotlara düşen yağışlardan beslenen derin dolaşımlı sular olduğu görülmektedir. Sıcak suların $\delta^{18}O$ değerlerinin birbirine yakın oluşu ve fazla sapma göstermemesi bu suların yaklaşık olarak aynı kotlardan, ortak bir bölgeden beslenmeye sahip olduklarını göstermektedir. İnceleme alanındaki soğuk su kaynakları, sıcak su kaynaklarına göre daha düşük kotlardan beslenmektedir. Ayrıca, trityum değerleri de göz önüne alındığında soğuk su kaynaklarının güncel yağışlardan beslenen sığ dolaşımlı kaynaklar olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR

Savcılı-Büyükoba jeotermal alanının hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış olan jeoloji, hidrojeoloji, hidroloji, jeokimyasal ve izotop çalışmalarının değerlendirilmesiyle aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Bölgedeki jeolojik, hidrojeolojik çalışmalar ve jeofizik rezistivite haritalarından yararlanılarak muhtemel gömülü faylar belirlenmiştir. Buna göre, sahada başlıca KD-GB, KB-GD doğrultularında basamaklı ve normal fay sistemine bağlı yapıların geliştiği görülmüştür.

İnceleme alanındaki birimlerin hidrojeolojik özellikleri incelendiğinde Eosen yaşlı kumtaşı tabakalarının içerisinde yer alan kireçtaşı birimlerinin yerel akifer oluşturma potansiyeline sahip olduğu ve Üst Kretase-Paleosen? yaşlı granitoyidin kırıklı çatlaklı zonlarının yoğun olduğu bölümlerin jeotermal rezervuar oluşturacak özellikte olduğu belirlenmiştir. Bölgede çamurtaşı, kumtaşı, çakıltaşı, kireçtaşı ara düzeyli çamurtaşı ardalanmasından oluşan Eosen ve Miyosen-Pliyosen yaşlı çökeller örtü kayaç niteliğindedir. Ayrıca, temelde yer alan Paleozoyik yaşlı amfibol şist, gnays, kuvarsit gibi birimler ile Üst Kretase yaşlı diyabaz, bazalt, radyolarit, çört gibi volkanik kayaçların kırık çatlak içermeyen bölümleri de geçirimsiz özelliktedir.

Çalışma alanında yer alan sıcak ve mineralli sular ile soğuk sular, Schoeller ve Piper diyagramları ile Wilcox ve ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramları kullanılarak kimyasal bileşim (tuzluluk) ve kalite yönlerinden incelenmiştir. Savcılı-Büyükoba sıcak ve mineralli su kaynağı Na-Cl tipli sular sınıfında yer almaktadır. İnceleme alanı ve yakın çevresindeki soğuk sular ise Ca-HCO_3 tipli suları oluşturmaktadırlar. Schoeller diyagramına göre sıcak suların aynı kökenli olduğunu ve benzer akiferlerden beslenen sular olduğunu göstermektedir. Piper diyagramına göre sıcak sular tuzlu sular olup, bölgedeki soğuk sulardan ayrı bir grup oluşturmaktadırlar. Bölgede yer alan sıcak ve mineralli sular ile soğuk su örnekleri Wilcox diyagramlarına göre incelendiğinde; Sıcak su kaynağı ve sıcak su kuyuları şüpheli kullanılabilir ve şüpheli kullanılamaz bölümünde yer almaktadır. Bölgede yer alan diğer soğuk su kaynaklarının ise sulama için uygun olduğu belirlenmiştir. ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramı sonuçlarına göre sıcak su kaynakları ve sıcak su kuyuları C_2-S_2 (Orta derecede tuzlu-orta sodyumlu sular) ve C_2-S_3 (Orta derecede- tuzlu- yüksek sodyumlu sular) grubunda yer almaktadır. Soğuk sular ise C_1-S_1 (az tuzlu-az sodyumlu), C_2-S_1 (orta tuzlu- az sodyumlu) ve C_3-S_1 (yüksek tuzlu-az sodyumlu) sular grubunda yer almaktadırlar. Bölgede yer alan sıcak ve mineralli suların gerek Wilcox, gerekse ABD Tuzluluk Laboratuvarı diyagramına göre doğrudan tarımda kullanılması uygun olmayacaktır.

Mineral doygunluk hesaplamalarına göre bölgedeki sıcak su kaynaklarının anhidrit, jips gibi sülfatlı mineraller ile halit ve silise doygun olmadıkları, ancak bu suların kalsedon, kuvars gibi silis mineralleri ile kalsit, dolomit, aragonit gibi karbonatlı minerallere doygun oldukları belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, yüzeye çıkan sıcak suların kabuklaşma yapıcı özellikte olabileceğini göstermektedir.

Sıcak ve mineralli suların rezervuar sıcaklıklarını tahmin etmek için silis ve katyon jeotermometrelerinden yararlanılmıştır. Savcılı-Büyükoba jeotermal alanı içerisindeki sıcak su kaynağı ve sıcak su kuyuları "kısmen dengede olan sular" bölümünde yer almasından dolayı katyon jeotermometrelerinin bu kaynaklarda uygulanması uygun görülmemiştir. Buna göre silis jeotermometreleri katyon jeotermometrelerine göre daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Kalsedon formuna dayalı jeotermometre eşitliklerinden rezervuar sıcaklıkları 69-72°C aralığında hesaplanmıştır.

Sıcak su kaynaklarının düşük trityum içeriği, kaynakların göreceli olarak uzun süreli geçiş zamanına sahip yer altı suları ile beslendiklerini göstermektedir. Oksijen 18 ($\delta^{18}O$) - Döteryum ($\delta^{2}H$) verilerine göre ise Savcılı-Büyükoba jeotermal alanında yer alan sıcak su kaynaklarının meteorik su doğrusu üzerinde bulunmaları nedeniyle bölgedeki jeotermal sistemin meteorik kökenli sular tarafından ve yüksek kotlardan beslendiği belirlenmiştir. Soğuk su kaynaklarının duraylı izotop içerikleri ile belirlenen ortalama beslenme alanı yükseltisi, Savcılı-Büyükoba sıcak su kaynağı için, inceleme alanının kuzeydoğusunda yer alan Baranadağ granitoyidinin yüksek kesimlerinden (1561-1568 m) beslendiğini göstermektedir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi desteğiyle gerçekleşmiştir. Yazarlar, Duraylı İzotop Analizleri için Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) Müdürü Prof. Dr. Mehmet Ekmekçi'ye, Su Kimyası ve Duraysız İzotop analizleri için Su Kimyası Laboratuvarı sorumlusu Prof. Dr. Serdar Bayarı'ya ve laboratuvar çalışanlarına, raporlarından yararlanılan MTA Genel Müdürlüğü'ne, İller Bankası Genel Müdürlüğüne ve Kırşehir Belediye Başkanlığı'na teşekkür eder.

7. KAYNAKLAR

Clark, I.D., Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, New York.

Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133.

Kara, H., Dönmez, M., 1990. 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları serisi No. 34, Kırşehir G17 paftası, MTA yayını.

Giggenbach, W.F., 1988, Geothermal solute equilibria, Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators, Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 2749-2765.

Parkhurst, D.L., Appelo C.A.J., 1999. User's guide to PHREEOC (Version 2) -a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, USGS Water Resources Investigation Report, 99, 4259, 312.

Ürgün, S., 1979, Kırşehir Kaman Savcılı-Büyükoba ılıcası hidrojeoloji etüt raporu, MTA Dergisi, Rap.No: 6629, Ankara,.

Tekin, A.G., Tekin, Z., 1986. Kırşehir Kaman Savcılı-Büyükoba sığ sıcaksu sondajları (SB-2, 3, 4, 5) kuyu bitirme raporu. MTA Dergisi, Rap. No: 8140, Ankara.

Önder, İ., Tanıdır, R., 1986. Kırşehir Kaman Savcılı-Büyükoba kaplıcası sıcak su aramaları rezisitivite etüt raporu, MTA Dergisi, Rap. No: 7992, Ankara.

Ilıca (Erzurum) Sıcak Su Kaynaklarının Hidrojeokimyasal Özellikleri

Hydrogeochemical Properties of Ilıca (Erzurum) Hot Water Springs

A. Fırat Ersoy[1,*], F. Gültekin[1], E. Hatipoğlu Temizel[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon*
*(*arzufirat@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Ilıca sıcak su kaynaklarının oluşum koşullarının ve rezervuar özelliklerinin belirlenmesi amacı ile hidrokimyasal örneklemeler yapılmıştır. Ilıca sıcak su kaynaklarının sıcaklığı 29-39 ^{0}C, pH değeri 6.5-7.7 ve elektriksel iletkenlik değeri ise 4000-7510 µS/cm arasında değişmektedir. Beslenme havzasına düşen kar ve yağmur sularının yeraltına süzülerek fay zonu boyunca derinlere inmesi, genç volkanik kayaçlar ile teması sonucunda ısınması ve fay zonu boyunca yeryüzüne ulaşması ile Ilıca jeotermal kaynakları meydana gelmektedir. İnceleme alanında yüzeylenen formasyonlar; bazalt, andezit ve aglomeralardan oluşan volkanik kayaçlar; sisteminin rezervuar kayacı tortul kayaçlara ait yüksek geçirgenliğe sahip çakıltaşı, kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşmaktadır. Örtü kayaçları ise kiltaşı, silttaşı ve marnlardan meydana gelmektedir. Sıcak sular Na-HCO_3-Cl su tipi sınıfında yer almaktadır. Sıcak su kaynaklarına uygulanan kimyasal jeotermometreler sonucunda maksimum rezervuar sıcaklığı 157 ^{0}C olarak hesaplanmıştır. Termal su kaynaklarının SiO_2 içerikleri 71-109 mg/l arasında değişmektedir. Entalpi-klorür karışım modeline göre, termal suyun soğuk su ile karışım oranı % 69-75 arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Sıcak Su Kaynağı, Hidrojeokimya, Ilıca (Erzurum)

ABSTRACT: *Hydrochemical properties of the Ilıca geothermal system (Erzurum,Turkey) located in the Eastern Anatolian Region were investigated to determine the reservoir properties. The thermal spring has a temperature of 29-39 ^{o}C, with electrical conductivity ranging between 4000 and 7510µS/cm. The thermal water of Ilıca is mainly recharged from infiltration of snowmelt and rain water along the fault zone, whichare , heated by young volcanic rocks, at great depths which in turn changed its chemical composition during its circulation within the fault zone and its rise to the surface along the fault zone. Geologic formations that crop out in the study area are mainly composed of volcanic rocks that consisted of basalt, andezite, tuff and agglomerate; sedimantary rocks consisted of gravelstone, sandstone, marl and lacustrine limestone and alluviums. Reservoir rocks of the Ilıca geothermal system are formed of high permeability gravelstone, sandstone and limestone belonging to the sedimantary rocks. The cap rock is formed of claystone, siltstone and marl belonging to the same sedimantary rocks. Thermal waters are of Na-HCO_3-Cl water type. The chemical geothermometers applied for the Ilıca geothermal waters yielded a maximum reservoir temperature of 157 ^{o}C. SiO_2 contents of the thermal springs are changing between 71-109 mg/l. According to the enthalpy chloride-mixing model, cold water to the thermal water-mixing ratio is changing between 69 and 75 %.*

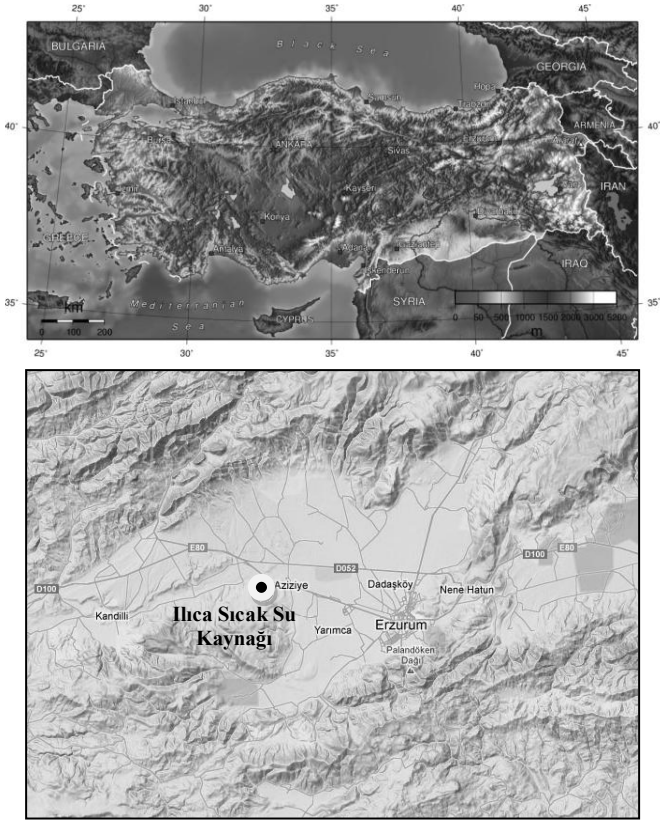
Keywords: *Hot Water Spring, Hydrogeochemistry, Ilıca (Erzurum)*

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji gelecekte tercih edilen temiz enerji kaynaklarından biri olacak potansiyele sahiptir. Bu durum özellikle ülkemiz gibi büyük boyutlarda enerjiye gereksinim duyan ülkelerde bir gerçeklik olarak karşımıza çıkmakta ve jeotermal enerji kaynaklarının büyümesi ve gelişmesi açısından önemli hale gelmektedir. Günümüzde jeotermal sistemlerin anlaşılmasında hidrojeokimyasal çalışmalar oldukça büyük ilerlemeler göstermiştir. Jeotermal kaynakların kimyasal bileşimleri, onların kökeni, beslenme alanı ve akış koşulları ile ilgili bilgiler edinmemizi sağlamaktadır. Termal kaynaklarda yapılan jeokimyasal çalışmalar, jeotermal sahaların potansiyeli ve enerji kaynağı olarak kullanılabilmeleri konusunda oldukça yararlı bilgiler vermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Ilıca jeotermal sistemini oluşturan sıcak su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerini araştırmak, rezervuar sıcaklığını belirlemek, köken ve beslenme koşullarını tanımlamaktır.

Ilıca jeotermal alanı Erzurum şehir merkezinin 15 km batısında yer almakta ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin en önemli jeotermal sahalarından biri olarak bilinmektedir. Ülkemizdeki birkaç önemli volkanik sahadan biri olan Doğu Anadolu volkanik sahası Pontid zonunda yer almaktadır. Sıcak su kaynaklarını içine alan çalışma alanı Erzurum kent merkezinin batısında yer almaktadır (Şekil 1). Bölgede, yazların sıcak ve kurak kışların ise çok soğuk olduğu karasal iklim şartları hüküm sürmektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 5.4 ^{o}C, yıllık toplam yağış 453 mm'dir.



Şekil 1. Ilıca (Erzurum) jeotermal alanının yer bulduru haritası

2. MATERYAL VE METOT

IK, HK, HM ve GGK olarak isimlendirilen 4 adet sıcak su örneği ile ID olarak isimlendirilen 1 adet soğuk su örneği Mayıs ve Ağustos 2012 dönemlerinde alınarak yağışlı ve kurak dönem örneklemeleri yapılmıştır. Su örnekleri üzerinde majör anyon ve katyon analizleri Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. Analizlerde uygulanan standartlar APHA(American Public Health Association), AWWA (American Water Work Association) ve WPCF (Water Pollution Control Federation) standartlarıdır. Ca, Mg, Na ve K analizleri atomik absorpsiyon spektrometresi ile; SO_4 içeriği spektrofotometre yöntemi ile alkalinite ise standart titrasyon yöntemi ile belirlenmiştir.

Sıcak su kaynaklarında bulunan minerallerin doygunluk indeksi değerleri PHREEQC (Parkhaust ve Appelo, 1999) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Su örneklerinin hidrojeokimyasal özelliklerini belirlemek için AquaChem (Calmbach, 1997) programı kullanılmıştır. Ilıca sıcak su kaynaklarına silis jeotermometreleri uygulanmıştır. Rezervuar sıcaklığını belirlemek için kuvars jeotermometreleri (Fournier, 1977) ile kalsedon jeotermometresi (Fournier ve Potter,1982) kullanılmıştır.

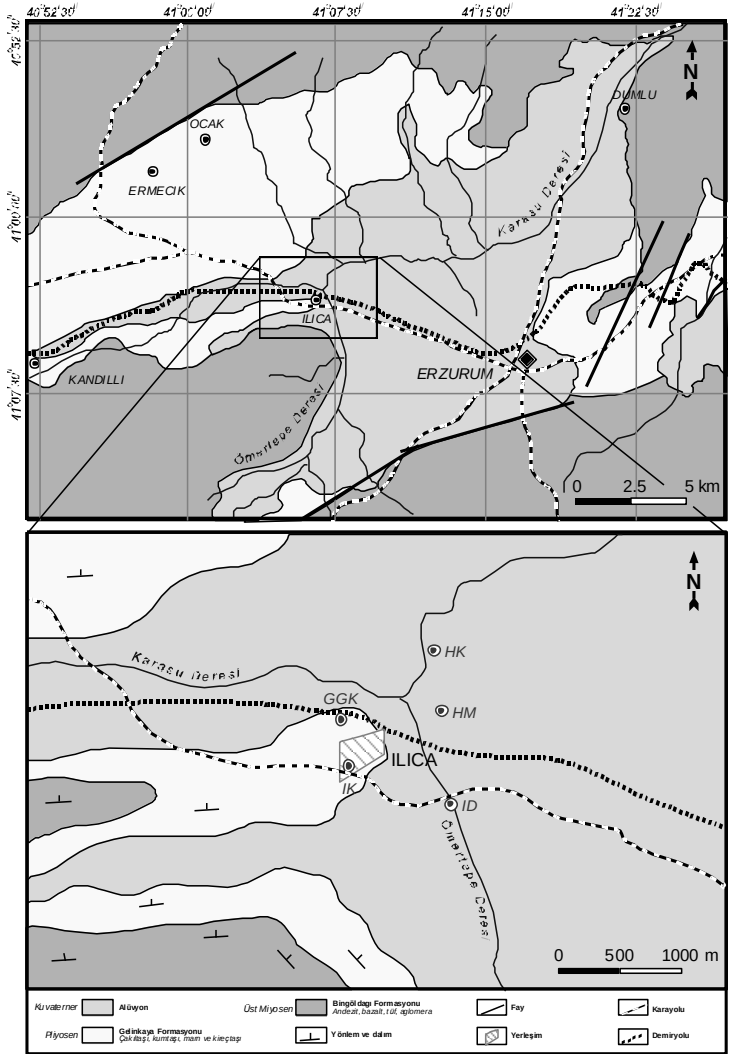
3. BULGULAR

3.1. Jeoloji ve Hidrojeoloji

Erzurum-Ilıca çevresinde yüzeylenen jeolojik birimler genellikle sedimanter özellikte ve Jura-Kuvaterner zaman aralığında oluşmuş kayaçlardan meydana gelmektedir. Bölgesel ölçekte Jura yaşlı kumtaşı, çakıltaşı, kireçtaşı ve kiltaşı; Kretase yaşlı kumtaşı ve kireçtaşı; Üst Kretase yaşlı kireçtaşı, marn ve Miyosen yaşlı kumtaşı ve kireçtaşlarından oluşan formasyonlar yüzeylenmektedir. Ilıca jeotermal sahası ve yakın çevresinde ise Üst Miyosen yaşlı volkanik kayaçlar, Pliyosen yaşlı sedimanter kayaçlar ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yer almaktadır (Şekil 2).

Doğu Anadolu Fay Zonu'nda yer alan Ilıca jeotermal kaynağının bulunduğu bölgede en önemli yüzey suyunu Karasu Deresi oluşturmaktadır. Ülkemizdeki diğer önemli jeotermal sistemler gibi Ilıca jeotermal sisteminde de sıcak sular fay ve kırık zonları boyunca hareket etmektedir. Erzurum Fay Zonu olarak adlandırılan ana fay zonu, jeotermal sistemi yapısal olarak kontrol etmektedir. 29,3-39,19 ^{o}C arasında sıcaklığa sahip olan termal su kaynaklarının toplam boşalım debisi 55 l/sn'dir.

Tortul kayaçlar sahip oldukları yüksek geçirgenlik nedeniyle hem sıcak hem de soğuk sular için rezervuar ve akifer olma özelliğine sahiptirler. Ilıca jeotermal kaynağında rezervuar kayaçlar Gelinkaya Formasyonu'na ait yüksek geçirgenlikli çakıltaşı, kumtaşı ve gölsel kireçtaşları oluşturmaktadır. Gelinkaya Formasyonu'nun kil, silt, marn ve tüffit seviyeleri ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlar termal sistemin örtü kayacını oluşturmaktadır. Jeotermal sistemin ısı kaynağını çalışma alanında yüzeyleme veren Bingöldağı volkaniklerine ait genç volkanik sokulumlar oluşturmaktadır. Ilıca jeotermal alanında IK, HM, HK ve GGK ile tanımlanan 4 adet sıcak su kaynağı bulunmaktadır. Bunlardan GGK kaynak şeklinde yeryüzüne çıkarken diğerleri sıcak su sondajı ile yüzeye ulaşmaktadır.



Şekil 2. Ilıca jeotermal alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Güven, 1993'ten değiştirilmiştir)

3.2. Su Kimyası

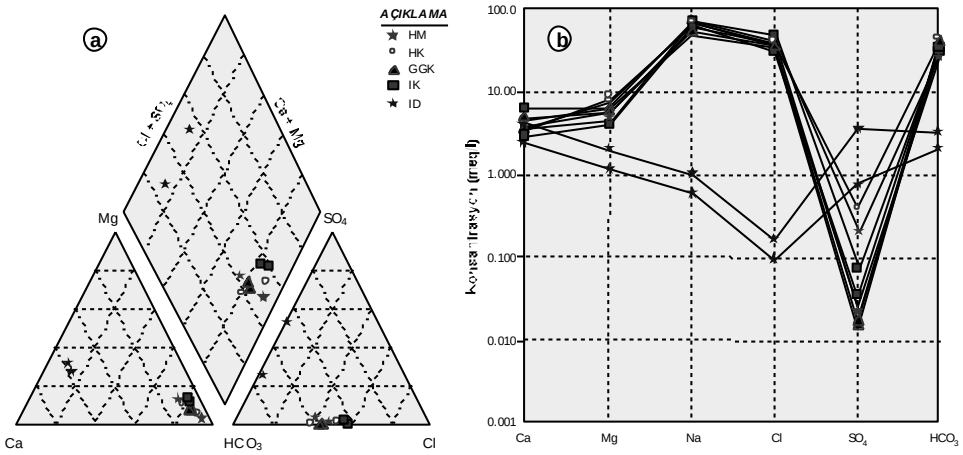
Ilıca jeotermal alanında bulunan IK, HK, HM ve GGK sıcak su kaynakları ile ID soğuk su kaynağına ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Su tipleri açısından değerlendirildiğinde IAH, 1979 tarafından tanımlanan sınıflamaya göre tüm sıcak su örneklerinin Na-HCO_3-Cl su tipinde olduğu görülmektedir. Sıcak su örneklerinin sıcaklığı 29,3 – 39,19 ^oC arasında; soğuk suyun sıcaklığı ise 17,92 – 24,4 ^oC arasındadır. Su örneklerinin pH değeri 6.59 – 8.24 arasında değişirken Elektriksel İletkenlik (EC) değerleri sıcak su örnekleri için 4000 – 7510 µS/cm, dere suyu örneği için ise 349 – 601 µS/cm arasındadır.

Ilıca jeotermal sahasında bulunan sıcak ve soğuk su örneklerine ait iyon dağılımı Piper Diyagramı'nda (Şekil 3a) gösterilmektedir (Piper, 1944). Diyagrama göre IK, HM, HK ve GGK termal su örnekleri Na-HCO_3-Cl su tipinde iken; ID soğuk su örneği (dere suyu) Ca-Mg-HCO_3-SO_4 su tipindedir. Schoeller yarı-logaritmik diyagramına göre (Şekil 3b) termal su örneklerinin benzer kimyasal özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcak su örneklerinin kimyasal bileşimlerinin soğuk suyun kimyasal bileşiminden oldukça farklı olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 3b'de görüldüğü gibi sıcak sular Na, Cl ve HCO_3'ce zenginleşirken SO_4 tüketilmektedir. Bu durum sıcak suların indirgen özellikte olması ve ortamda sülfatlı bileşiklerin düşük miktarlarda bulunması ile açıklanabilir.

Çizelge 1. Ilıca sıcak su kaynaklarına ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Örnek Adı	Örnek Türü	Örnek Tarihi	T (^oC)	pH	EC (µS/cm)	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO_3	SO_4	Cl	SiO_2	Su Tipi
IK	Sondaj	Mayıs-1999[a]	38	6.6	6600	5160	51	47	-	40	-	-	-	99	Na-HCO_3-Cl
		Mayıs-2012	37.08	-	6900	4330	119.69	66.66	1516.29	39.66	1939	1.74	1542.06	-	NaHCO_3-Cl
		Ağustos-2012	35.2	6.59	7510	4880	128.45	73.55	1535.31	44.89	1949.83	3.6	1526.72	-	Na-HCO_3-Cl
HK	Sondaj	Mayıs-1999[a]	38.5	7.1	6780	4340	48.5	47.9	1381	56.3	1910	18.5	1324	105	Na-HCO_3-Cl
		Mayıs-2012	39.19	-	6872	4465	123.55	91.51	1303.23	40.39	2558.1	1.68	1004.67	-	Na-HCO_3-Cl
		Ağustos-2012	36.9	6.82	6230	3980	125.42	91.33	1378.69	37.02	2539.09	1.17	988.96	-	Na-HCO_3-Cl
HM	Sondaj	Mayıs-1999[a]	39	6.95	5300	5350	49	50	1398	33	2300	-	1067	109	Na-HCO_3-Cl
		Mayıs-2012	34.1	-	4000	2590	127.47	88.26	1017.91	38.09	2161	0.99	922.43	-	Na-HCO_3-Cl
		Ağustos-2012	35.2	6.75	6210	5350	117.53	91.18	1320.62	37.34	2322.33	0.47	1016.49	-	Na-HCO_3-Cl
GGK	Termal Kaynak	Mayıs-1999[a]	36	7.7	5950	4436	28.1	33.9	1218	83	1933	10	1060	71	Na-HCO_3-Cl
		Mayıs-2012	30.16	-	6450	4229	123.84	84.32	1350.65	36.36	2389.4	0.74	1109.15	-	Na-HCO_3-Cl
		Ağustos-2012	29.3	6.68	6120	3970	120.51	75.11	1343.85	37.2	2229.44	2.2	1039.86	-	Na-HCO_3-Cl
ID	Ilıca Dere	Mayıs-2012	17.92	-	349	227	48.41	14.08	14.71	5.23	129.8	36.81	3.22	40	Ca-Mg-HCO_3-SO_4
		Ağustos-2012	24.4	8.24	601	391	80.74	26.67	21.11	7.32	185.79	168.35	5.55	-	Ca-Mg-SO_4-HCO_3

*IK: Ilıca Sondaj, HK: Harmanlar Sondaj, HM: Harmanlar Sondaj2, GGK: Gelingeldi Termal Kaynağı and ID: Ilıca Dere
**İyon Konsantrasyonu, TDS ve SiO_2 mg/l, (-) analiz edilemedi
*** [a] Akkuş et al. (2005)



Şekil 3. Sıcak su kaynaklarına ait Piper (a) ve Schoeller (b) diyagramları

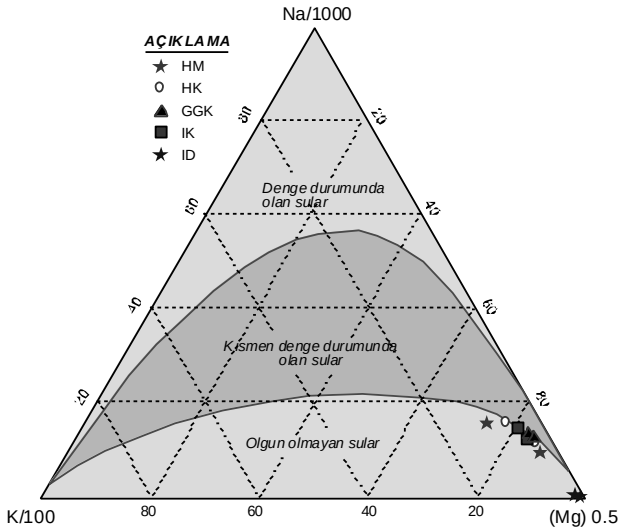
3.3. Jeotermometre Uygulamaları

Ilıca jeotermal alanında bulunan sıcak su örneklerine ait hazırlanan Giggenbach (1988) diyagramı incelendiğinde termal su kaynaklarının tamamen dengeye ulaşmamış suları işaret eden "olgunlaşmamış sular" bölgesinde yer aldığı görülmektedir (Şekil 4). Bu nedenle, sıcak suların soğuk su ile karışım özelliklerini belirlemek amacı ile silis jeotermometreleri kullanılmıştır. Ilıca jeotermal kaynaklarının rezervuar sıcaklığını belirlemek için kullanılan silis jeotermometre sonuçları Çizelge 2'de verilmektedir. Çalışma alanında rezervuar sıcaklık değerleri kalsedon jeotermometresine göre (Fournier ve Potter, 1982) 116-133 ^{o}C; kuvars jeotermometresine göre ise (Fournier, 1979) 142-157 ^{o}C olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2. Ilıca sıcak su kaynaklarına uygulanan silis jeotermometrden hesaplanan sıcaklık değerleri

Jeotermometreler	**IK**	**HK**	**HM**	**GGK**
T (^{o}C) Çıkış Sıcaklığı	38	38.5	39	36
SiO_2 (Kalsedon)[a]	116	128	133	123
SiO_2 (Kuvars)[b]	142	152	157	149
Kuvars Buhar Kaybı	137	145	149	142
SiO_2 (Kalsedon-Konduktif Soğuma)[c]	114	125	129	121

[a] Fournier and Potter (1982); [b]Fournier (1977); [c] Arnorsson et al. (1983)



Şekil 4. Ilıca termal su kaynakları için hazırlanan Giggenbach diyagramı

3.4 Mineral Doygunluğu

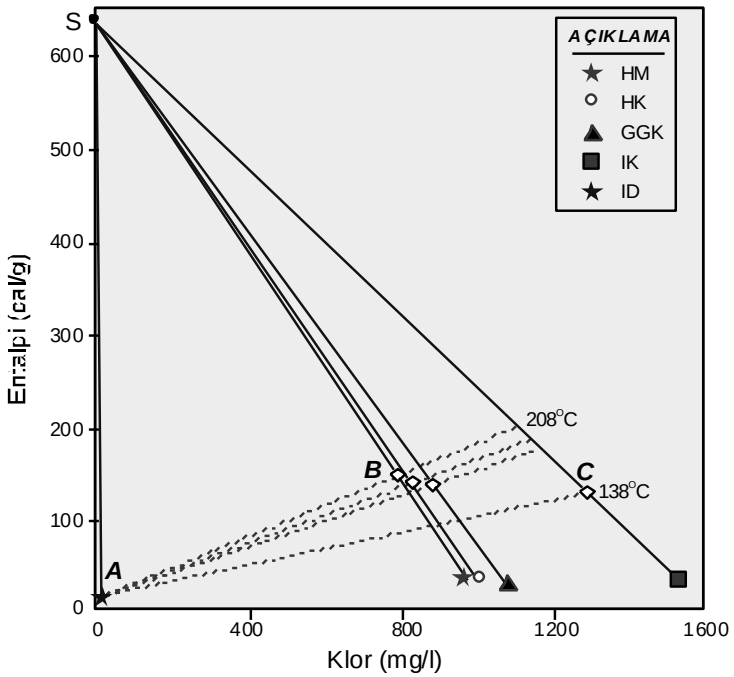
Ilıca sıcak su kaynaklarında mineral doygunluk indisi değerleri, sıcak suyun pH değeri ve yeryüzüne çıkış sıcaklık değeri kullanılarak PHREEQC Interactive 2.8 (Parkhurst ve Appelo, 1999) bilgisayar yazılımı ile hesaplanmıştır. Karbonat, sülfat ve silis minerallerine ait doygunluk indisi değerleri Çizelge 3'te gösterilmektedir. Termal su kaynakları için kalsit, dolomit, anhidrit, halit ve kuvars mineralleri için doygunluk indisi değerleri sıfır olarak hesaplanmıştır. Aragonit, jips ve kalsedon için ise sıfırdan daha düşük değerler bulunmuştur. Bu sonuçlara göre Ilıca jeotermal alanında yer alan sıcak su kaynaklarının kalsit, dolomit, anhidrit, halit ve kuvars ile dengede olduğu, aragonit, jips ve kalsedona göre ise doygun olmadığı görülmektedir.

Çizelge 3. Ilıca sıcak su kaynaklarına ait doygunluk indisi (SI) değerleri

	Kalsit	Aragonit	Dolomit	Jips	Anhidrit	Halit	Kuvars	Kalsedon
IK Mayıs-2012	0	-0.14	0	-0.06	0	0	0	-0.39
IK Ağustos-2012	0	-0.14	0	-0.05	0	0	0	-0.40
HK Mayıs-2012	0	-0.13	0	-0.08	0	0	0	-0.39
HK Ağustos-2012	0	-0.14	0	-0.06	0	0	0	-0.39
HM Mayıs-2012	0	-0.14	0	-0.05	0	0	0	-0.40
HM Ağustos-2012	0	-0.14	0	-0.05	0	0	0	-0.40
GGK Mayıs-2012	0	-0.14	0	-0.02	0	0	0	-0.41
GGK Ağustos-2012	0	-0.14	0	0	0	0	0	-0.42

3.5 Entalpi-Klorür Karışım Modeli

Ilıca jeotermal alanındaki sıcak suların entalpi ve klorür değerleri diyagrama işaretlenerek elde edilen noktalar buhar noktası ile birleştirilmiştir (Şekil 5). Bu doğru üzerine her bir sıcak su örneğinin kuvars buhar kaybı jeotermometresi (Çizelge 2) ile hesaplanan hazne sıcaklıkları işaretlenmiştir (B noktaları). Karışım çizgisi üzerindeki AB ve AC doğru parçaları kullanılarak sıcak suların soğuk su ile yaptığı karışım oranları bulunmaktadır. Burada AB/AC oranı karışımdaki sıcak su değerini vermektedir (Şekil 5). Ilıca jeotermal alanında minimum hazne sıcaklığı 138 ^{o}C, maksimum hazne sıcaklığı ise 208 ^{o}C olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sıcak su kaynağının soğuk su ile olan karışım oranı % 69.8-75.0 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Ilıca termal su kaynakları için hazırlanan entalpi-klorür karışım modeli (Fournier,1979)

4. SONUÇLAR

Ilıca jeotermal alanında bulunan sıcak su kaynakları, "düşük ısılı jeotermal kaynaklar" (yaklaşık 38 ^{o}C) olarak tanımlanmakta ve Na-HCO_3-Cl su sınıfında bulunmaktadır. Sıcak su örneklerinde en çok bulunan anyon HCO_3 (1910-2558 mg/l), en az bulunan anyon SO_4 (0.74-10mg/l)'tür. Ilıca jeotermal alanında bulunan sıcak su örnekleri Na-K-Mg üçgen diyagramında değerlendirildiğinde "olgunlaşmamış sular" sınıfında bulundukları görülmektedir. Jeotermometre çalışmaları sonucunda jeotermal sistemin rezervuar sıcaklığının 116-157 ^{o}C arasında hesaplanmış olup hidrojeokimyasal çalışmalar sonucunda ise sıcak suların soğuk su ile karışım oranının %69.8-75.0 arasında olduğu görülmektedir. Tüm termal sular doygunluk indisi değerine göre aragonit, jips ve kalsedon için "doygun olmayan sular"; kalsit, dolomit, anhidrit, halit ve kuvars için ise "dengede olan sular" sınıfındadır.

4. KATKI BELİRTME

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 8701 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Akkuş İ, Akıllı H vd, 2005. Türkiye Jeotermal Kaynakları Envanteri, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Envanter Serisi-201, Ankara (in Turkish).

Arnorson S, Gunlausson E, Svavarsoon H, 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmochmica Acta, 47: 567-577.

Calmbach, L, 1997. AquaChem Computer code-version 3.7.42. Waterloo Hydrogeologic, Waterloo, ON.

Fournier R O, 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics 5: 41-50.

Fournier R O, 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: Rybach, L., Muffler, L.J.P. (Eds.), Geothermal Systems: Principles and Case Histories. John Wiley & Sons Ltd., pp 109-141.

Fournier R O, Potter R W, 1982. An equation correlating the solubility of quartz in water from 25 to 900 ^{o}C at pressures up to 10.0000 bars. Geochim Cosmochim Acta, 46:1969-1973.

Giggenbach W F, 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochim Cosmoshim Acta, 52:2749-2765.

Parkhurst D, Appelo C A J, 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. USGS Water Resources Investigation Report, 99-4259.

Jeotermal Rezervuar Simülasyonu Kalibrasyonunun Önemi ve Gerekli Ölçümler

Importance of Geothermal Reservoir Simulation Calibration and Required Measurement

E. Y. Turalı[1,*]

[1] *Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji (Hidrojeoloji) Müh. Böl., Beytepe, Ankara*
(**elifylmz@hacettepe.edu.tr)*

ÖZ: Jeotermal sahalarda sayısal simülasyon için sahanın kavramsal modelinin geliştirilmesinin ardından doğal durum modeli, üretim aşamasının modellenmesi ve gelecek performansının modellenmesi fazlarını içeren bir yöntem uygulanmaktadır. Simülasyon çalışmalarının doğruluğu kalibrasyon işleminin tutarlılığı ve hassaslığı ile sağlanmaktadır. Kalibrasyon işlemi arazi gözlemlerinin model sonuçları ile benzeşimi sağlanarak yapılmaktadır. Bu amaçla, genellikle sahadaki üretim öncesi statik koşulların doğal durum modellemesi ve işletmeye açıldıktan sonraki dinamik yapıyı yansıtan tarihsel çakıştırma modellemesi sırasında kalibrasyon uygulanmaktadır. Jeotermal sahalarda kalibrasyon genellikle sahaya ait sıcaklık ve basınç verileriyle yapılmaktadır. Kalibrasyon sağlandıktan sonra sahanın geleceğe dönük üretim/reenjeksiyon uygulamaları daha hassas bir şekilde modellenebilmektedir. Ülkemizde üretimin yapıldığı tüm jeotermal sahalarda yapılması gerekli olan fakat ihmal edilen kuyu içi basınç ve sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi, yapılacak simülasyon çalışmalarında model kalibrasyonunun güvenirliliğinin ve rezervuarın sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Simülasyon, Kalibrasyon, Üretim, Kuyu, Basınç, Sıcaklık

ABSTRACT: *A general methodology for numerical simulation of geothermal field has emerged, which involves the three modeling phases that natural state model, production process model and future performance model after the development of conceptual model. The accuracy of the simulation studies is achieved by consistency and sensitivity of the calibration process.The calibration process is carried out by comparing the model results with field observations. For this purpose, calibration is applied during natural state model which is a pre-production model of the static conditions in the field and history matching modeling is a post-production model that reflects the dynamic strucutre. Calibration is usually done with temperature and pressure data in the geothermal field. After the calibration, future production/reinjection applications of the field can be modeled more accurately. In all the geothermal exploited field in our country, measurement of borehole changes which are necessary to be done but neglected, are very important for reliability of the model calibration and sustainability of the reservoir.*

Keywords: *Geothermal simulation, Calibration, Production, Borehole, Pressure, Temperature*

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji yenilenebilir bir enerji kaynağı olmakla birlikte ısının ve akışkanın yenilenme süreci uzun bir dönemi kapsamaktadır. Yeraltısuyu sistemi, geliştirme öncesi koşullar altında uzun süreli dengededir ve sahanın geliştirilmesi durumunda pompajla yapılan çekim sonucunda rezervuarın denge koşulları değişmektedir. Simülasyon model çalışmaları rezervuarın yapısının ve davranışının anlaşılmasında, sahanın geliştirilme planlamalarında ve üretim performanslarının belirlenmesinde oldukça kullanışlı ve gerekli bir araç olarak tercih edilmektedir (Kneafseyvd, 2002).İşletmenin olduğu jeotermal sahalarda rezervuarın sürdürülebilir kullanımı amacıyla ve modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere üretim boyunca sıcaklık, basınç, debi ve su kimyası değişimlerinin izlenmesi ve kayıt altına alınması oldukça önemlidir.

Modelleme çalışması esas olarak bir rezervuarın veya incelenecek akım sisteminin matematiksel modelinin kurulması ve bu model için sayısal çözümlerin elde edilmesine dayanmaktadır (Pruess, 2002).Jeotermal sistemler kırık çatlak akışı, faz değişimleri, kimyasal reaksiyonlar ve sıcaklık koşulları gibi sebeplere bağlı olarak oldukça karmaşıktır. Modellerin karmaşıklığı da sistemin heterojenliğine, verilerin ulaşılabilirliğine ve çalışmanın hedefine bağlı olarak değişmektedir. Modelleme için bir dizi farklı yöntem mevcut olup bunlar saha çalışmalarından elde edilen verilerin miktarı ve kalitesi ile çalışmanın amaçları dikkate alınarak tercih edilmelidir. Günümüzde varolan simülatörler ile gözenekli ve kırık-çatlaklı ortamdaki çok-boyutlu, çok-fazlı ve çok bileşenli karışımlar için kütle ve ısı taşınımı tanımlanabilmektedir (Pruess, 1999). Bu amaçla geliştirilmiş programlar arasında TOUGH2, TETRAD, STAR gibi programlar yeralmaktadır.

Jeotermal sahaların üretim öncesi ve üretim sonrası koşullarının modellenmesinde doğal durum modeli ile tarihsel çakıştırma yöntemi oldukça uygun ve önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ülkemizdeki bir çok saha için uygulanabilir olan bu yöntem için gerekli verilerin elde edilmesi ve çalışmaların bu verileri elde edecek şekilde planlanması oldukça önemlidir.

2. JEOTERMAL REZERVUAR SİMÜLASYONUNU

Jeotermal sahaların sayısal simülasyonu için öncelikle sahanın kavramsal modelinin geliştirilmesi gerekmektedir. Kavramsal model simülasyon modeline aktarılırkenrezervuarın geometrisi, sınır koşulları (kütle ve ısı akımı, basınç, sıcaklık), kaynak ve çıkış noktaları, sıcaklık ve basınç ilksel koşulları ve formasyonlara ait parametrelerin (gözeneklilik, geçirgenlik, termal iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı) tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla, jeoloji, jeofizik, hidrojeoloji, hidrojeokimya çalışmaları ile birlikte kuyulara ait test sonuçları, litoloji verileri, derinliğe bağlı sıcaklık ve basınç dağılımları da incelenmeli ve birlikte yorumlanmalıdır.

Jeoloji, hidrojeoloji ve jeofizik çalışmalarıbirlikte değerlendirilerek örtü ve rezervuar kaya, kaynak çıkışları, fay ve kırık çatlak sistemleri belirlenirken hidrojeokimya çalışmaları ile sahadaki dolaşım ve beslenim mekanizması tanımlanabilmektedir.Sahadaki sondaj verileri derlenerek, pompa testleri, girişim testleri ve kuyu içi statik/dinamik sıcaklık ve basınç test sonuçları ile başlangıç ve sınır koşulları yorumlanmalıdır. Modelde sınır koşulları sıcaklık ve basınç olarak tanımlandığı gibi akım olarak da tanımlanabilir.Sahadaki formasyonlara ait permeabilite, gözeneklilik, yoğunluk, termal iletkenlik, özgül ısı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla labaratuvarda veya sahada testler yapılmalıdır.Rezervuara ait geçirgenlik değerleri genellikle sahadaenjeksiyon ve basınç düşüm testlerinin analizi sonucunda elde edillir. Bu verilerin elde edilmesi ve yorumlanması kavramsal modelin doğruluğu ve tutarlılığı ve dolayısıyla doğru bir simülasyon modeli içinde oldukça önemlidir. Formasyonlara ait parametrelerin belirlenebilmesine rağmen kuyuda her aşamada karot alınamaması, rezervuar birimleri dışında geçirgenliğin ölçülmemesi gibi kısıtlı veriler nedeniyle bunların sahadaki uzanımı ve derinliğe bağlı dağılımının kesin olarak bilinmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle de simülasyon modellerinin başında girilen formasyon parametreleri, özellikle geçirgenlik ve gözeneklilik dağılımı ve değerleri, kalibrasyonun sağlanması amacıyla yeniden gözden geçirilerek ayarlanabilmektedir.

Kavramsal modelin oluşturulmasının ardından rezervuarınsimülasyonu için üç aşamadan oluşan bir yöntem uygulanmaktadır. Bunlar, doğal durum modellemesi, üretim aşamasının modellenmesi ve gelecek performansının modellenmesidir(Pruess, 2002). Doğal durum modeli, rezervuarın işletmeye açılmadan önceki durumunun modellenmesidir. İşletme olmadığı durumda termodinamik özelliklerin değişiminin minimum olduğu düşünülürse sistemin uzun jeolojik zaman boyunca sözde-kararlı hale ulaştığı kabul edilmektedir (Swenson, 2003). Bu model ile sahanın kavramsal modeli test edilebilir ve sistemin kütle ve ısı akısı tahminleri yapılabilir. Ayrıca, üretim için uygun başlangıç koşullarının belirlenmesi sağlanır ve bu koşullar tarihsel çakıştırma simülasyonu için ilksel koşulları oluşturur. Üretim aşaması modellemesinde (tarihsel çakıştırma), işletilen bir sahadaki kuyulardan elde edilen uzun süreli debi, sıcaklık (entalpi) ve basınç (su seviyesi) verileri modele aktarılır.Model sonuçlarının

ölçülmüşüretim verileri ile zamana bağlı benzeşimi yapılır. Bu aşamada daha duyarlı ve hassas bir benzeşimin sağlanmasında sahaya ait uzun süreli gözlemlere ihtiyaç vardır. Üretim aşamasının hassas bir kalibrasyonu sağlandıktan sonra sahaya ait öngörü senaryoları geliştirilerek gelecek performanslarının tahmini yapılabilir. Simülasyonun bu aşamasında mevcut kuyularda olabilecek düşümler, açılacak kuyuların sisteme etkisi, üretilebilirlik ve sürdürülebilirlik tahminlerinin yapılması sağlanmaktadır.

3. KALİBRASYON

Kalibrasyon,bağımlı değişkenin gözlenen değerleri ile hesaplanan değerlerinin karşılaştırılması işlemidir. Sahanın kavramsal modeli,başlangıç ve sınır koşulları ile model parametrelerinin test edilmesinde ve üretim nedeniyle sahanın bugün ve gelecekte nasıl etkilendiğinin daha hassas şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır. Model kalibrasyonuevrik modelleme teknikleri veya deneme-yanılma yöntemleri kullanılarak yapılabilmektedir.

Jeotermal bir sahanınsimülasyon modeli geliştirilirken oluşturulan doğal durum modellemesi ve tarihsel çakıştırma aşamalarında kalibrasyon yapılmaktadır. İlk olarak doğal durum modelinin kalibrasyonu için model sonuçları, genellikle sahanın ölçülmüş sıcaklık ve basınç dağılımı ile benzeştirilir. Burada kullanılan ölçümler, sahadaki kuyularda yapılan derinliğe bağlı statik sıcaklık ve basınç testleri ile belirlenmektedir. O'Sullivan vd. (2001)' de belirtildiği gibi bu aşamada, uygun bir benzeşim sağlamak içinmodelin sıcaklık dağılımı ve varsa yüzey akışkan çıkışları ölçülmüş saha verileri ile karşılaştırılır ve modelin geçirgenlik yapısı tatmin edici bir benzeşimin sağlanması için ayarlanır.Ayrıca, derindeki ısı akısının konumu ve büyüklüğünün de ayarlanması gerekebilir. Doğal durum modeli kalibrasyonu, saha verileri ile iyi bir benzeşimin sağlanmasından önce bir çok kez tekrarlanabilir (O'Sullivan vd., 2001).

Sahada üretimin olduğu durumda kuyulardan yapılan üretim/reenjeksiyon miktarları ve üretim boyunca su seviyesindeki ve sıcaklıklardaki değişimler kaydedilir. Uygun benzeşimin elde edildiği doğal durum modeli zamana bağlı kuyu verileri kullanılaraktekrar çalıştırılır. Bu aşama tarihsel çakıştırma olarak bilinir ve kalibrasyonumodel sonuçları ile üretim boyunca ölçülmüş saha verilerilerinin benzeştirilmesine dayanır. Bu benzeşimin sağlanmasında da gerekirse geçirgenlik ve gözeneklilik ayarları yapılabilir.

Modelin bu şekilde kalibre edilmesinde sahaya ait ölçülmüş basınç ve sıcaklık verilerinin olması gerektiği oldukça açıktır. Bu veriler, jeotermal sahalarda işletme öncesinde açılmış ve açılacak olan kuyularda yapılacak test çalışmaları ile ve işletme sonrasında sahanın dinamik koşullarını yansıtan kuyulardaki üretime bağlı debi, sıcaklık ve basınç (veya kuyu su seviyesi) verilerinin düzenli ölçülmesi ile elde edilebilmektedir. Son yıllarda izleme testi sonuçları ve kimyasal değişimlerde model kalibrasyonunda kullanılmaktadır.

4. JEOTERMAL SİMÜLASYON ve KALİBRASYON AŞAMALARI

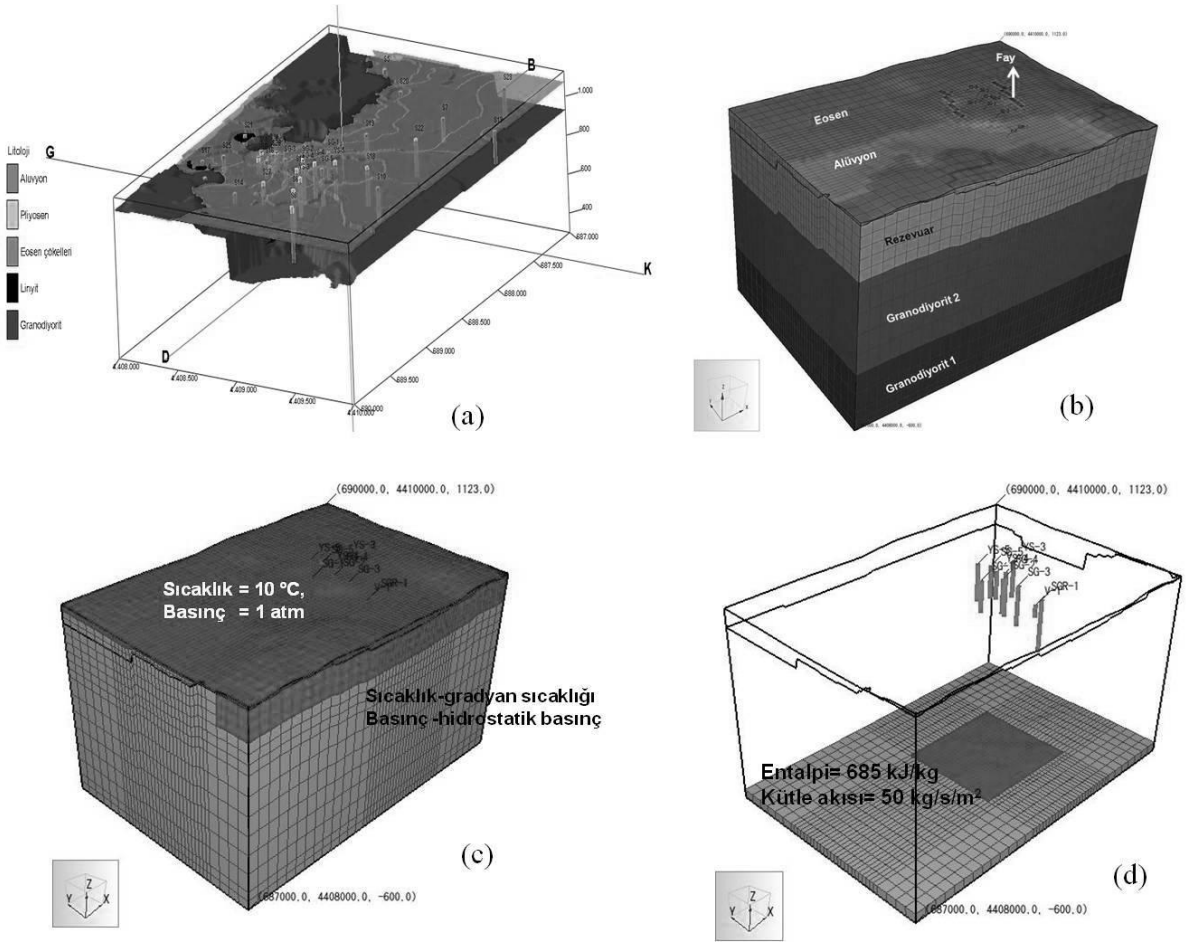
Simülasyon çalışmalarının aşamalarını gerçekleştirmek için TOUGH2 kodu ile çalışan Petrasim grafik ara yüz programı oldukça hızlı ve pratik bir yöntemdir (Pruess, 1999,Petrasim, 2015). Kalibrasyon çalışmalarında izlenen yöntemin aşamaları bu program ile Sorgun (Yozgat) jeotermal sahası verileri kullanılarak aşağıda anlatılmıştır.

4.1 Modelin Kurulumu

Simülasyon programında öncelikle kavramsal modelin doğal durum modeline aktarılması gerekmektedir. Doğal durum modeli oluşturulurken sahanın geometrisi tanımlanır. Geometri tanımlanırken çalışılacak alan x, y ve z eksenleri boyunca maksimum ve minimum olarak konumlandırılmalıdır. Tanımlanan alan içinde farklı formasyon özelliklerini temsil ettiği düşünülen

katmanlar oluşturulur. Katmanlar jeoloji, jeofizik çalışmaları ile kuyu litoloji verileri dikkate alınarak belirlenmektedir. Katmanlar bazı programlar aracılığla oluşturulup simülasyona veri aktarımı yoluyla veya simülasyon programında manuel olarak oluşturulabilir.

Sorgun (Yozgat) jeotermal sahası için yapılmış olan simülasyon çalışmasının aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir (Yılmaz Turalı, 2015).Sorgun sahasında jeotermal ve kömür arama amaçlı açılmış olan 46 adet kuyu verisi ile Rockworks15 programı kullanılarak sahanın litolojik modelioluşturulmuştur (Şekil 1a). Şekil 1b' de bu modelin Petrasimsimülasyon programına aktarılmış hali ve 11 adet jeotermal kuyu görülmektedir. Burada x 3 km ve y 2 km olmak üzere 6 km^2lik bir alan kullanılmıştır. Modelin derinliği 1700 m olup, toplam gridsayısı 26775 dir ve 17 katmandan oluşmaktadır. Ayrıca, bu katmanlar içinde farklı geçirgenlik değerine sahip alanlar ve fay zonları her bir grid için tanımlanmıştır.



Şekil 1. Sorgun jeotermal sahasına ait simülasyon modeli aşamaları (a) sahaya ait litolojik model, (b) litolojik modelin simülasyon programında tanımlanmış katmanları, (c) grid oluşturma ve sınır koşulları, (d) taban sınır koşulu

4.2 Grid Oluşturma

Model alanı belirlenip katmanlar oluşturulduktan sonra sayısal gridlerin oluşturulması rezervuar modelinin gerçekçiliği, doğruluğu ve potansiyel yararlılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Şekil 1c). Grid oluşturmadaki esas temel, iki grid bloğu arasındaki bir arayüz boyunca ısı, akışkan ve kütle akımını hesaplayabilmektir. Sahadaki kuyular ve kaynak çıkışları bir grid alanı içinde temsil edilmelidir. Model sonuçlarında kuyu verileri bu grid boyunca incelenmektedir.

4.3 Formasyon Parametrelerinin Tanımlanması

Katmanlar oluşturulduktan sonra her katmanın formasyon parametrelerinin (material data) tanımlanması gerekmektedir. Formasyon parametreleri tanımlanırken kayaca ait yoğunluk, gözeneklilik, geçirgenlik, ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerinin girilmesi istenir. İstenen bu veriler sahadaki kuyu testleri sonucunda veya laboratuvar çalışmalarıyla belirlenebileceği gibi bu testler yapılamamışsa literatür verileri ile de tanımlanabilmektedir. Sorgun jeotermal sahası için, kayaç yoğunlukları 2400-2650 kg/m^3, gözeneklilik değerleri 0.05- 0.2, geçirgenlik $1x10^{-14}$ – $1x10^{-11}$ m^2, ısıl iletkenlik 2.0-2.3 W/m/°C aralığında, özgül ısı ise 1000 J/kg/°C olarak belirlenmiştir (Yılmaz Turalı, 2015).

4.4 Sınır Koşulları

Gridler oluşturulduktan sonra model alanının tavan, taban ve yanal sınırlarındaki basınç ve sıcaklık koşulları her blok için tanımlanmalıdır Jeotermal sistemlerde genellikle akım sınır koşulu yerine sabit basınç ve sıcaklık sınır koşulu kullanılmaktadır. Yanal sınırlarda bir akım varsa burdaki basınç ve sıcaklık koşulları da tanımlanmalıdır. Bu sınır koşulları sahadaki kuyulardan elde edilen derinliğe bağlı statik sıcaklık ve basınç verileri kullanılarak sisteme girilebilir. Model alanının tabanında ısı akısı tanımlanarak debisi ve entalpisi belirlenmelidir. Isı akısı, sahaya özgü sıcaklık gradyanı ve termal iletkenlik değerleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Isı akısı ve entalpi değeri kullanılarak da kütle akısı hesaplanabilir. Bu hesaplanan değerler genellikle bir yaklaşım olarak modelleme çalışmalarının başlangıcında kullanılmakta ve model kalibrasyonu sırasında da ayarlanabilmektedir. Sorgun sahası model alanının yüzeyi olan 1. katman için, 1 atm basınç ve 10°C sıcaklık sabit durum (fixedstate) olarak tanımlanmıştır (Şekil 1c). Sahada kuyuların olduğu alanda statik su seviyesi 63 m civarında olduğundan, alanda bu derinliğe kadar basıncın 1 atm olduğu varsayılmıştır.Sahanın güneyinden bir beslenim olduğu varsayılmış ve model alanının güneyinde 6 katman boyunca sabit basınç sınır koşulu tanımlanmıştır (Şekil 1c). Model alanının tabanında 50 kg/s ve 160 °C sıcaklıkta (685 kj/kg) sabit (constantflux) ısı akısı tanımlanmıştır(Şekil 1d).Model alanının diğer yanlarında herhangi bir kütle ve ısı akısı tanımlanmamıştır.

4.5 Doğal Durum Modeli ve Kalibrasyonu

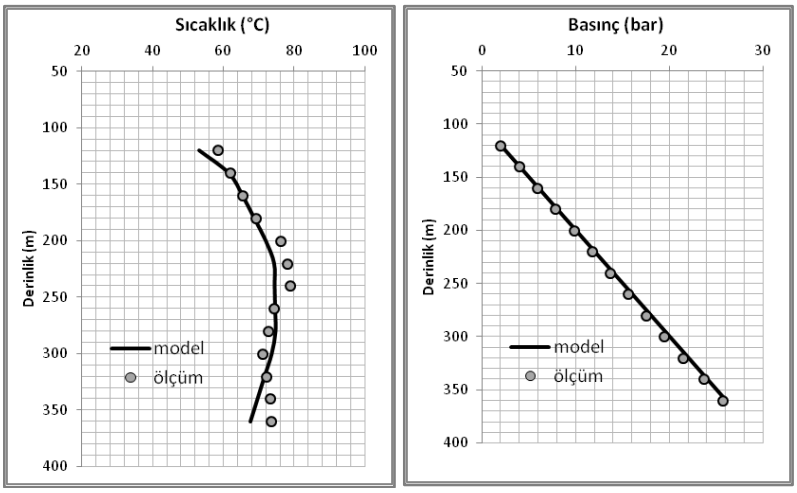
Doğal durum modeli, gridlerin oluşturulması ve bu gridler için parametrelerin, basınç ve sıcaklık koşullarının tanımlanmasının ardından modelyarı kararlı duruma ulaşana kadar binlerce yıllık jeolojik zaman için çalıştırılır. Burada önemli olan modelinseçilen zaman aralığında yarı kararlı duruma ulaşmasıdır.Programda bu zaman sonsuz olarak da seçilebilmektedir. Kuyuların olduğu gridler boyunca derinliğe bağlı sıcaklık ve basınç dağılımı her kuyudaki ölçülmüş değerler ile karşılaştırılır. Uygun benzeşimin her kuyu için sağlanması önemlidir. Hesaplanan sonuçlar ölçülmüş basınç ve sıcaklık verileriyle uyumlu ise doğal durum modeli kalibrasyonu yapılmış olur.

Şekil 2'de verilen örnek de Sorgun jeotermal sahasındaki SG-2 noluüretim kuyusu statik sıcaklık ve basınç ölçümlerinindoğal durum modeli ileyapılan karşılaştırma işlemi görülmektedir. Bu karşılaştırma işlemi sahada verisi olan 6 adet kuyu için yapılmış ve uygun benzeşimler elde edilerek doğal durum modeli kalibrasyonu tamamlanmıştır.

4.6 Üretim Aşamasının Modellenmesi ve Kalibrasyonu

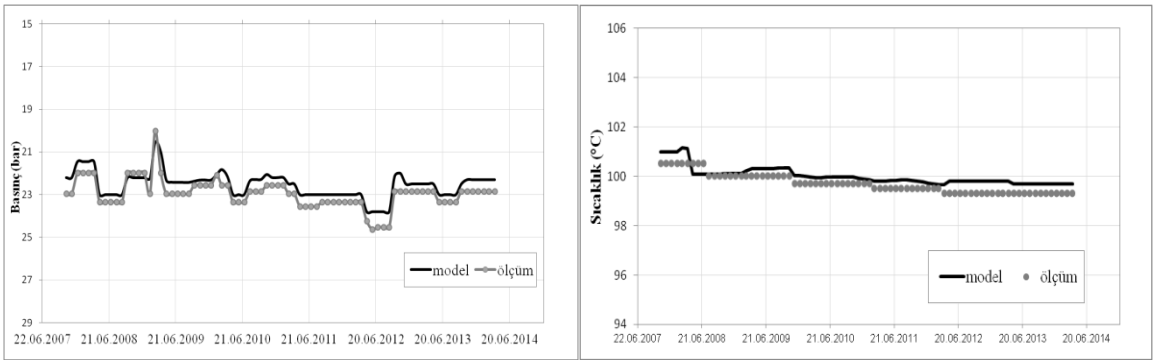
Doğal durum modelinde uygun benzeşim sağlandıktan sonra tarihsel çakıştırma aşaması ile model kalibrasyonu yapılır. Bu aşamada sahada üretimin yapıldığı dönem boyunca kuyularda uzun süreli basınç (su seviyesi), sıcaklık ve debi ölçüm verilerinin olması gerekmektedir. Kuyulardan yapılan üretim/reenjeksiyon debileri ve sıcaklıkları modele girilerek üretim süresi boyunca model çalıştırılır. Model sonuçlarındaki zamana bağlı kuyu dibi sıcaklık ve basınçlar, ölçülmüş kuyu verileri ile benzeştirilerek kalibrasyon işlemi yapılır. Uygun bir benzeşimin elde edilmesiyle modelin sahadaki

koşulları temsil ettiği düşünülerek geleceğe dönük uygulamaların sistem üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılır. Sahada üretim boyunca ölçülen verilerin eksik ve/veya sağlıksız olması veya üretim geçmişinin az olması modelin hassas şekilde kalibre edilememesine neden olacaktır.



Şekil 2. Sorgun SG-2 jeotermal kuyusunda derinliğe bağlı ölçülmüş sıcaklık ve başınç verilerinin model sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 3'te Sorgun jeotermal sahasındaki YS-3 gözlem kuyusunda 7 yıl boyunca ölçülmüş saha verilerinin model sonuçlarıyla karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu kuyuda uygun bir benzeşim elde edilmiştir. Ancak, sahada zamana bağlı su seviye değişimleri (basınç) ve sıcaklık ölçümleri olmayan üretim ve reenjeksiyon kuyularındamodel verileri ile bir eşleşme yapılamamıştır. Üretim aşaması kalibrasyonunun hassasiyeti için sahadaki kuyular arası mesafe ve girişimler ile fay sistemlerinin dağılımı dikkate alınarak daha fazla kuyudan ölçüm alınması önemlidir. Bu aşamanın kalibrasyonunundoğruluğu özellikle sahadaki işletmenin geleceğe dönük uygulamalarındagereklidir.



Şekil 3. Sorgun YS-3 gözlem kuyusunda 7 yıllık üretim boyunca ölçülmüş basınç ve sıcaklık değişimlerinin model sonuçları ile karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Ülkemizde, jeotermal sahalarda kavramsal model oluşturma ve sahanın potansiyelinin belirlenmesi çalışmaları uzun yıllardır yapılmaktadır. Jeotermal sahaların simülasyonmodel çalışmaları ise çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bunun en temel nedenlerinden biri üretim yapılan sahaya özgüyeterli veri olmamasıdır. Simülasyon programlarında kalibrasyon için veri olarak üretim öncesi ve sonrası sahaya ait basınç ve sıcaklık dağılımları ile kuyulardaki debi ve entalpi değişimlerinin mutlaka bilinmesi gerekmektedir. Bu ölçülmüş değerler kullanılarak yapılan kalibrasyon aşamasında eksik

parametrelerin tanımlanması ve kavramsal modelin test edilmesi mümkün olmaktadır. Bu amaçla, üretim yapılan jeotermal sahalardaki üretim/reenjeksiyon kuyuları, debi, basınç ve sıcaklık değişimlerini ölçen otomatik ölçüm cihazlarının kullanımına olanak verecek şekilde dizayn edilmelidir.Bu sistemlerin olmadığı mevcut sahalarda ise mutlaka gözlem kuyularında düzenliolarak su seviye ve sıcaklık ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Gerekli veriler kullanılarak uygun benzeşimin elde edileceği kalibrasyon aşamasının ardından sahadaki üretim/reenjeksiyonu ygulamalarının sistem üzerindeki geleceğe dönük olası etkilerinin belirlenmesini sağlayacak rezervuar simülasyonları yapılabilecektir.

6. KAYNAKLAR

Kneafsey, T.J.,Pruess, K., O'Sullivan, M.J., Bodvarsson, G.S., 2002. Geothermal reservoir sımulation to enhance confidence in predictions for nuclear waste disposal. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, 48124.

O'Sullivan, M.J.,Pruess,K., Lippmann, M.J.,2001. State of theart of geothermal reservoir simulation.Geothermics, 30(4), 395-429.

Petrasim, 2015.PetraSim User Manual. Thunderhead, Manhattan, USA.

Pruess, K.,Oldenburg, C., Moridis, G., 1999. TOUGH2 User's Guide. Version 2.0, Lawrence Berkeley University Press, California.

Pruess, K., 2002. Mathematical modeling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems-an introduction in fivelectures. United Nations University Geothermal Training Programme, Report 3.

Swenson, D.,Hardeman, B., Persson, C., Thornton C., 2003. Using petrasimtocreate, execute, and post-process tough2 models. TOUGH Symposium, Lawrence Berkeley NationalLaboratory, Berkeley, California.

Yılmaz T.E., 2015. Sorgun (Yozgat) hidrotermal sisteminin modellenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sisteminin Akım Modelinin Oluşturulması

Flow Modelling of Pasinler (Erzurum) Geothermal System

E. Hatipoğlu Temizel[1,*], F. Gültekin[1], A. Fırat Ersoy[1]

[1] *Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Trabzon*
*(*hatipogluesra@gmail.com)*

ÖZ: Pasinler (Erzurum) jeotermal alanında jeotermal kaynakların sıcaklıkları 22.5-51°C, pH'ı5.1-7.6, EC değerleri 970-6233 µS/cm, TDS değerleri 2538-4392 mg/l arasındadır. Sahada akışkan akımının modellenmesini amaçlayan çalışmada jeolojik, hidrojeolojik ve hidrojeokimyasal veriler kullanılarak yeraltısuyu akımı ve ısı taşınımını birlikte çözebilen SHEMAT yazılımı kullanılmıştır. Model yaklaşık doğu-batı yönlü kararlı akım koşullarında iki boyutlu kesit model olarak hazırlanmıştır. Akım ve ısı taşınım modeli birlikte değerlendirildiğinde havza ortasında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Havzanın doğu kısmında ısı taşınımından yoksun akım modeline benzer akım yolları oluşmuştur. Havzanın batısında ise akım yolları değişerek örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir. Model alanında hesaplanan sıcaklık yatay yönde homojen, düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermiştir. Sıcaklık, temel kayada ve örtü kayada fay zonları boyunca yükselmiştir. Hazne kaya boyunca sıcaklığın değişken olması soğuk su akiferinden su karışımının fazla olduğunu gösterir. Jeotermal kuyularının boşalım sıcaklıkları ve kuyularda ölçülen sıcaklık-derinlik logları ile model kalibre edilmiştir.

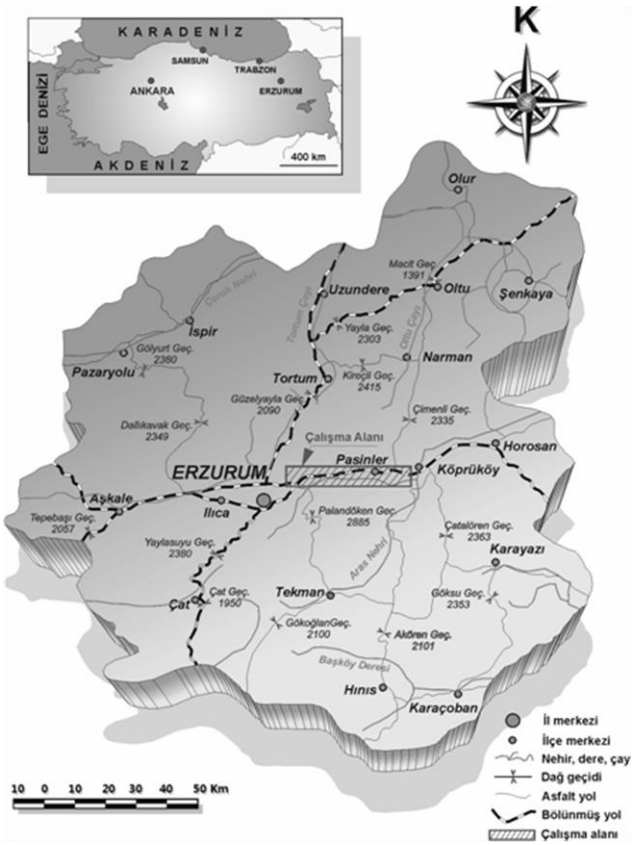
Anahtar Kelimeler: Pasinler Jeotermal Sahası, Sayısal Modelleme, SHEMAT

ABSTRACT:*. The geothermal waters have a temperature of 22.5-51°C, pH values of 5.17-7.6, EC values of 970-6233 µS/cm, and TDS values of 2538-4392 mg/lin the Pasinler Geothermal field. In order to model the fluid flow of the SHEMAT software, which simulates both ground water flow and heat transport using geological, hydro-geological and hydro-chemical data, was used in this study. The model was constructed as a 2D section from east to west under steady flow conditions. When both flow and heat transport conditions are considered, it is seen that the water splits to east and west at the center of the basin. To the east of the basin, some flow paths are formed similar to the transport-free flow model, while to the west they are orientated from the cap rock to the reservoir rock. In the model area, the calculated temperatures are homogeneous horizontally and increase with depth vertically related to the geothermal gradient. The temperaturehas increased along the fault zones in the bedrockandcap rock.The variable temperature in the reservoir rocks indicates a significant mixing with the cold water. The model was calibrated with discharge temperatures and the temperature-depth logs of the wells.*

Keywords*: Pasinler Geothermal Area, Numerical Modeling, SHEMAT*

1.GİRİŞ

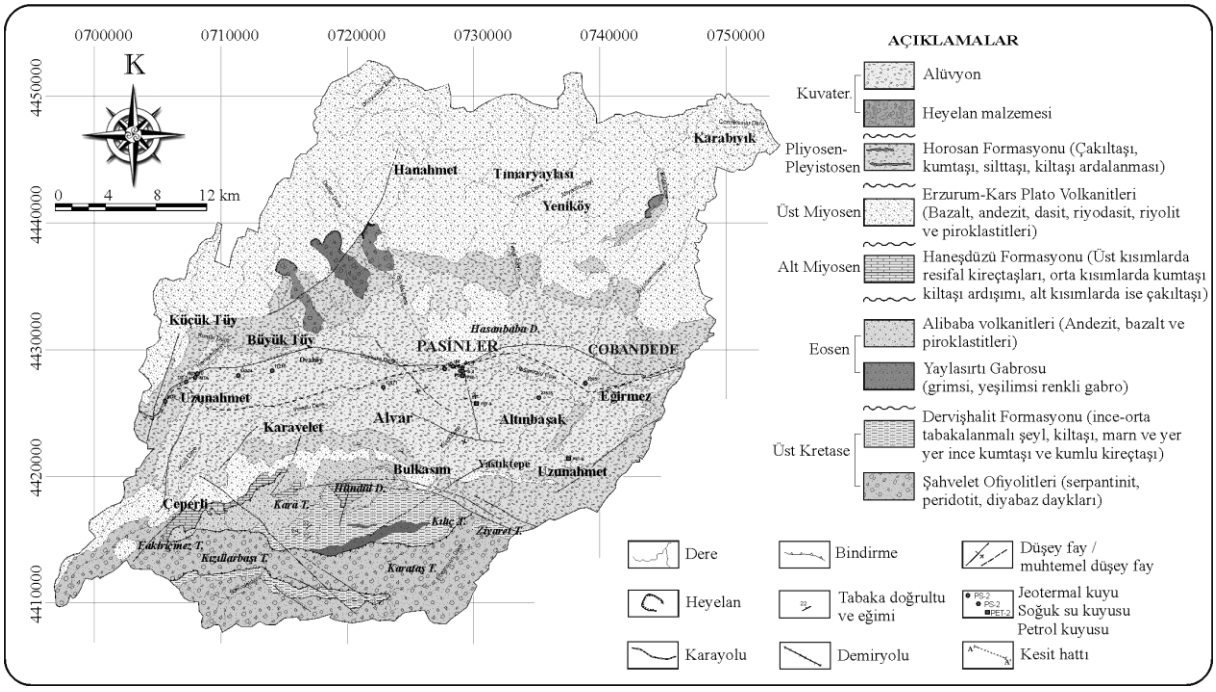
Ülkemiz fayların, volkanik alanların, aktif deprem kuşaklarının bulunduğu bir hat üzerindedir ve termal sular bakımından oldukça zengindir. Termal kaynakların sayısı 1500'den fazladır, ancak 200 kadarı kaplıca olarak işletilmektedir. Erzurum-Pasinler jeotermal alanı Doğu Anadolu'da Erzurum İli'nin 40 km doğusunda Pasinler İlçesinde yer almaktadır (Şekil 1).Bu çalışmanın amacı, ülkemizin önemli jeotermal alanlarından biri olan Erzurum-Pasinler jeotermal sahasında sıcak su dolaşım sistemini açıklamak ve ısı taşınım modelini ortaya koymaktır.



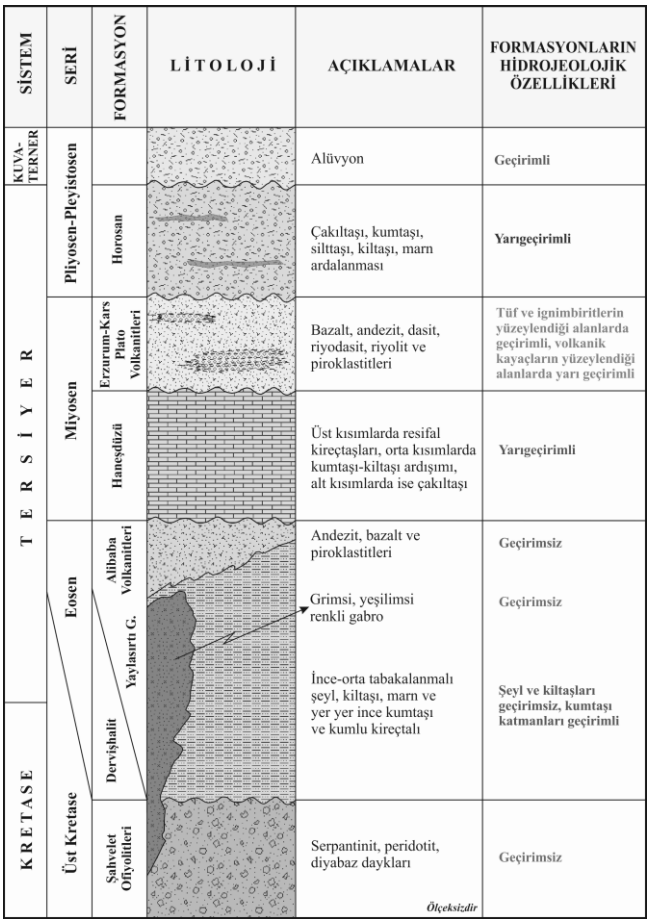
Şekil 1. Çalışma alanının konumu

2.JEOLOJİ ve HİDROJEOLOJİ

İnceleme alanında yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Şahvelet Ofiyolitleri ve Derviş Halit Formasyonu, Eosen yaşlı Yaylasırtı Gabrosu ve AlibabaVolkanitleri, Erken Miyosen yaşlı Haneşdüzü Formasyonu, Geç Miyosen yaşlı Erzurum-Kars Plato Volkanitleri, Geç Pliyosen- Erken Pleyistosen yaşlı Horosan Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyon yüzeylenmektedir (Şekil 2).Pasinler Havzası'nın güneyinde serpantinit, peridotit gibi ultramafik kayaçlar ile andezit türü volkanik kayaçlar, orta kesimlerinde marn ardalanmalı çakıltaşı ve kumtaşları ile alüvyonlar, kuzeyinde ise bazalt, andezit, dasit, riyodasit ve riyolit gibi volkanik kayaçlar yüzeylenmektedir. Bu kayaçların hidrojeoloji özellikleri dikkate alınarak birimler geçirimli, yarı geçirimli ve geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Pasinler (Erzurum) Havzasının Jeoloji Haritası (Yılmaz vd., 1989'dan değiştirilerek)



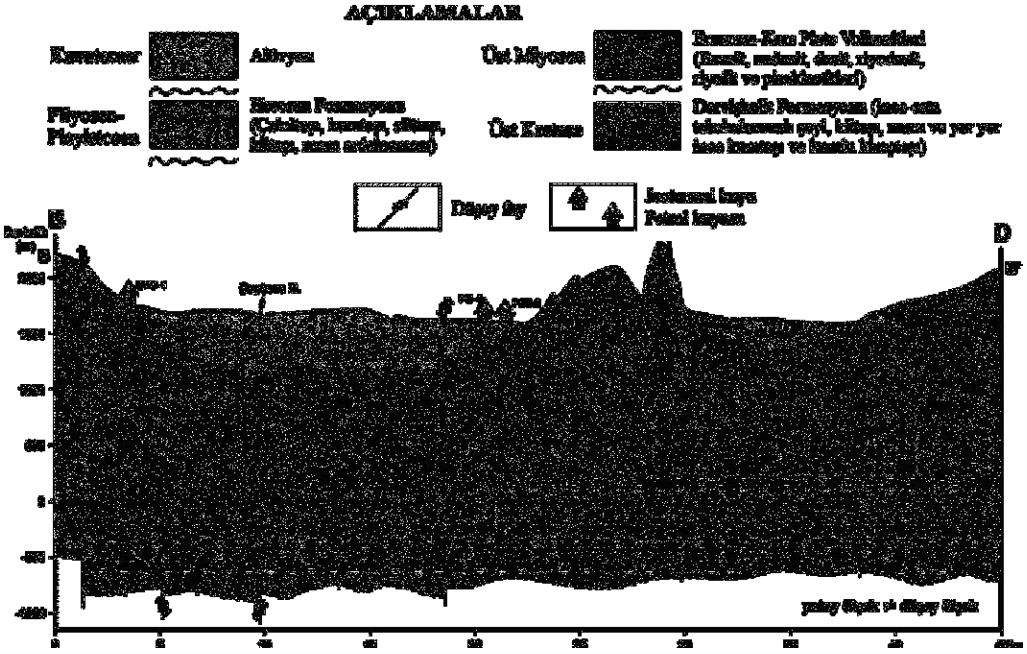
Şekil 3. Pasinler (Erzurum) ve yakın çevresindeki formasyonların hidrojeolojik özellikleri

3. HİDROJEOKİMYA

Pasinler jeotermal alanındaki jeotermal kaynakların sıcaklıkları 22.5-51°C, pH'ı 5.17-7.6, EC değerleri 970-6233 µS/cm, TDS değerleri 2538-4392 mg/l arasındadır. IAH (1979) sınıflamasına göre Pasinler jeotermal alanındaki termal suların su tipi incelendiğinde;genel olarakjeotermal kuyularNa-Cl-HCO_3, jeotermal kaynak ise Na-Ca-Mg-HCO_3-Cl sınıfındadır. Alandaki soğuk su kaynağı, yüzey suları ve yeraltı suları ise Mg-Ca-HCO_3 su sınıfındadır.

4. PASİNLER JEOTERMAL ALANINDA YERALTI SUYU AKIMI VE ISI TAŞINIM MODELİ

Erzurum (Pasinler) jeotermal sahasında jeotermal sistemin rezervuar sıcaklık dağılımı, yeraltı suyu akımı gibi mevcut durumunun belirlenmesi ve sistemi etkileyen tüm parametreleri, bu parametrelerin sistem üzerinde oluşturduğu tüm etkileri ve sistemin vereceği tepkileri belirlemek amacıyla Pasinler jeotermal alanı SHEMAT (Clauser, 2003) programı ile modellenmiştir.Modelleme işleminde kullanılmak üzere alana ait kavramsal model, jeotermal akifere ait hidrolik ve termal parametreler belirlenmiştir. Hazırlanan kavramsal modele göre temel kayayı GeçKretase yaşlı kumtaşı, kiltaşı, silttaşı ve şeyl ardalanmasından oluşan Derviş Halit Formasyonu oluşturur. Hazne kayanın yapılan sondajlardan altta bazalt-andezit şeklinde, üste ise çoğunlukla tüfler daha az miktarda da riyolitlerden oluştuğu belirlenmiştir. Örtü kayayı ise çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı ve marnlardan oluşan Horosan Formasyonu oluşturmaktadır. Jeoloji haritası kullanılarak jeotermal sistemi temsil edecek şekilde yaklaşık D-B doğrultusunda bir kesit hattı belirlenmiş (Şekil 2) ve iki boyutlu kesit bir model hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. SHEMAT programında kullanılan enine jeolojik kesit

Kesit hattının derinliği ve yeraltı litolojisi belirlenirken bölgede daha önce MTA tarafından açılmış PS-3 (200 m), PS-4 (500 m) ve EHD-1 (700 m)'lik jeotermal kuyulardan ve Pasinler-1 (1280 m), Pasinler–2 (2100 m) ve Pasinler-3 (3400 m) adlı petrol kuyularından yararlanılmıştır.Jeotermalsisteme ait hidrolik ve termal parametrelerin bir kısmı önceki çalışmalardan yaralanılarak hesaplanmış bir kısmı ise literatürden alınmıştır (Çizelge 1).

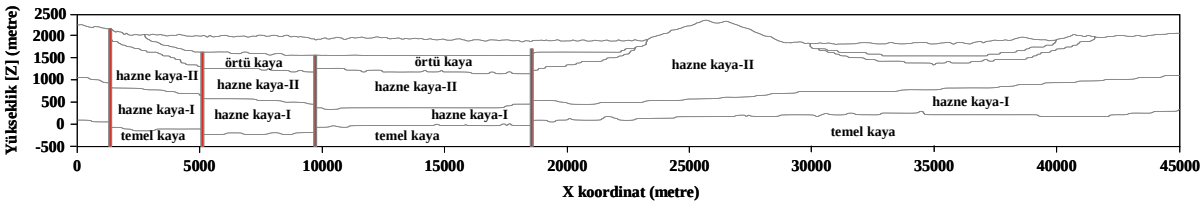
Çizelge1. Sayısal modelde kullanılan hidrolik ve termal parametreler

		Litoloji	Permeabilite (m/sn)	Porozite	Isı iletkenliği ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Isı kapasitesi ($\mu J/m^3K$)	Isı üretim oranı (μWm^{-3})
Alüvyon		Çakıl	$1.15*10^{-5}$ ila $1.78*10^{-5}$ arasında10*	0.25-0.50 2*	2.44±0.8 3*	2.30 7*	1.30 9*
		Kum		0.20-0.35 2*			
		Kil		0.33-0.60 2*			
		Silt		0.35-0.50 2*			
Horosan Fm	Örtü Kaya	Çakıltaşı	$2.5*10^{-5}$10*	0.05-0.35 1*	2.4±0.85*		
		Kumtaşı			3.7±1.26*	2.05 7*	0.84 8*
		Silttaşı			2.7 6*	2.44 7*	1.8 8*
		Marn			2.1±0.75*	2.58 7*	
Plato Voolk.	Hazne Kaya	Tüf	10^{-7}-10^{-5} 1*	0.15-0.40 1*	1.7 3*	3.0 7*	1.75 9*
		Bazalt	10^{-13}-10^{-5}1*	0-0.10 1*	1.7 3*	2.58 7*	1.1 9*
		Andezit			1.35-4.86 4*	2.17 7*	1.13 8*
		Riyolit			1.58-4.33 4*		2.6 9*
Derviş Halit Fm.	Temel Kaya	Şeyl	10^{-13}-10^{-9}1*	0-0.10 1*	1.5±0.55*	2.16 7*	1.8 8*
		Kiltaşı			2.7±0.95*		1.8 8*
		Marn			2.1±0.75*	2.58 7*	
		Kumtaşı	10^{-10}-10^{-5}1*	0.05-0.35 1*	2.8 5*	2.05 7*	0.84 8*
		Kireçtaşı	10^{-7}-10^{-6}1*	0.01-0.25 1*	2.9±0.95*	2.43 7*	0.62 8*

1* Freeze ve Cherry (1979), Back vd. (1988); 2* Davis (1969); 3* Raznjevic (1976); 4*Clark (1966), Nathensonvd. (1982);5* Majorowicz ve Jessop(1981);6* Reiter ve Jessop (1985);7*Waples ve Waples, J. (2004); 8* CermakveRyback (1982);9* bu çalışmada hesaplanan değerler; 10* Dilek (1973).

4.1. Pasinler (Erzurum) Jeotermal Sahasının Akım Modeli

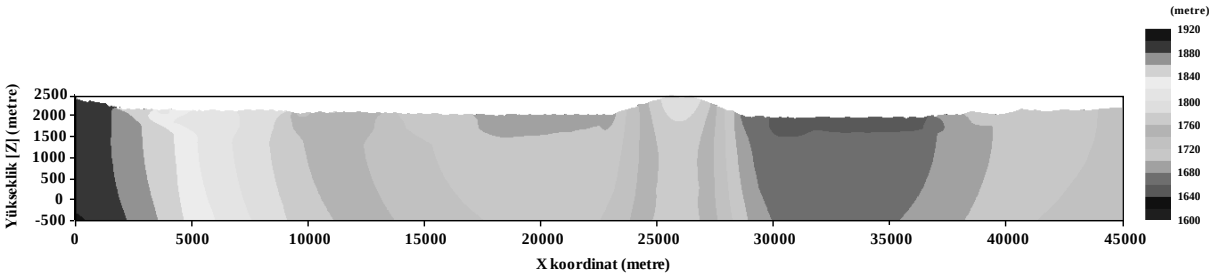
Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasının sayısal akım modeli yaklaşık doğu-batı yönlü kararlı akım koşullarında iki boyutlu kesit bir model olarak hazırlanmıştır (Şekil 5). Kesit hattının yüzeyden itibaren derinliği 2.7 km, uzunluğu 45 km olarak seçilmiştir. Kesit hattı boyunca jeotermal alanının elemanları olan temel kaya, hazne kaya, örtü kaya ve fay hatları belirlenmiştir. Model alanının ölçüleri sonlu farklar yöntemine göre 700 x 2250 olmak üzere toplamda 303750 düğüm noktasından (hücreden) oluşmaktadır. Hücrelerin boyutları tüm modelleme alanında jeolojik ve hidrojeolojik parametrelerin dar alanda değişim gösterdiği kabul edilerek 400 (20x20) m^2 olarak ayarlanmıştır. Modelleme alanı jeolojik birimler, jeotermal sistemin elemanları faylar ve hava da dikkate alınarak toplam yedi zona ayrılmıştır (Şekil 5).Tüm stratigrafik birimler kendi içlerinde hidrolik iletkenlik, porozite, ısı iletkenliği, ısı kapasitesi ve ısı üretim oranı gibi fiziksel özelliklerinden dolayı homojen olarak düşünülmüş ve fay zonlarıizotrop olarak atanmıştır.



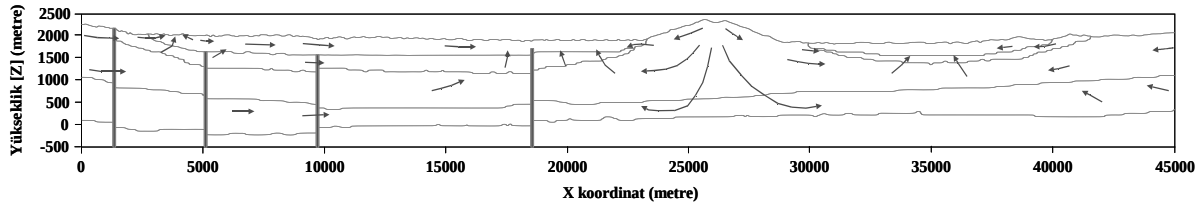
Şekil 5. Seçilen kesit hattı boyunca Pasinler jeotermal alanının elemanları

4.2.Akım Sınır Koşullarının Oluşturulmasıve Akım Modelinin Değerlendirilmesi

Pasinler jeotermal alanının yanal sınırları 1. tip sınır geçirimsiz sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Kesit modelin yüzey kısmında hidrolik yükler 3. tip sabit sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Hidrolik koşulları denetlemek amacıyla model alanınakım parametreleri ve Çizelge 1'deki veriler kullanılarak ısı taşınımından yoksun çalıştırılan model sonucu Şekil 6'daverilmiştir. Şekil 7.'de ise kararlı akım koşullarında oluşturulmuş olan akım doğrultuları görülmektedir.



Şekil 6. Model alanında hesaplanan hidrolik yük dağılımı

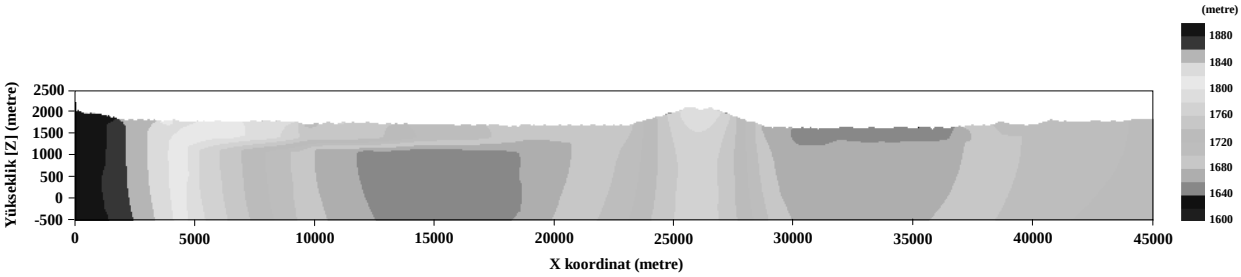


Şekil 7. Akım modeli sonucunda meydana gelen akım doğrultuları

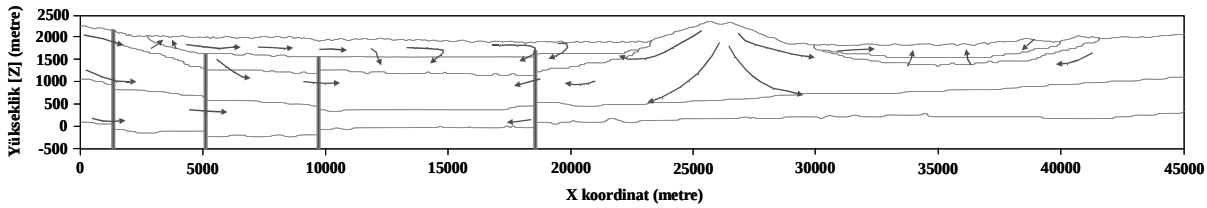
Model alanında yeraltı suyu akımının havza sınırlarından topografik eğime benzer şekilde merkeze doğru olduğu, havza tabanında ise akımın yeryüzüne doğru olduğu görülmektedir. Havza ortasında topografik yükseltinin altında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Hazne kayanın üst kısımlarında akım yatay iken alt kısımlarında kısmen örtü kayaya doğru yönelmektedir. Riyolit-riyolitik tüf gibi gözenekli ve geçirimli olan hazne kayadaki düşey fayların yeraltı suyu akımı üzerinde bir etkisi olmamıştır. Bu sonuç modele girilen hazne kaya ve fay zonlarına ait porozite ve hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

4.3.Sıcaklık Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Akım ve Isı Taşınım Modelinin Birlikte Değerlendirilmesi

Daha önce hazırlanmış olan akım modeli üzerine, sınır koşulları ve termal parametreler tanımlanarak akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırılmıştır.Isı taşınım modeli oluşturulurken kesit modelin yanal sınırları ısı taşınımı için geçirimsiz sınır kabul edilmiştir. Modelin tabanına 2. tip değişken sınır koşulu, yüzeyine 3. tip sabit sınır koşulu tanımlanmıştır. Modelin yüzey kısmına meteorolojik verilerden yararlanılarak Pasinler İlçesi'nin yıllık ortalama hava sıcaklığı olan 5 °C atanmıştır. Model için bölgedeki jeotermal gradyandan yararlanılarak ısı akısı değeri q= 0.103 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Alandaki PS-1, PS-2 ve EHD-1 kuyularında ölçülmüş olan sıcaklık-derinlik grafiklerinden yararlanılarak model tabanı için 140 °C sıcaklık hesaplanmıştır. Akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırıldığında, model kesit boyunca meydana gelen hidrolik yükler Şekil 8'de, akım yolları Şekil 9'da, oluşan sıcaklık dağılımı ise Şekil 10'da görülmektedir.

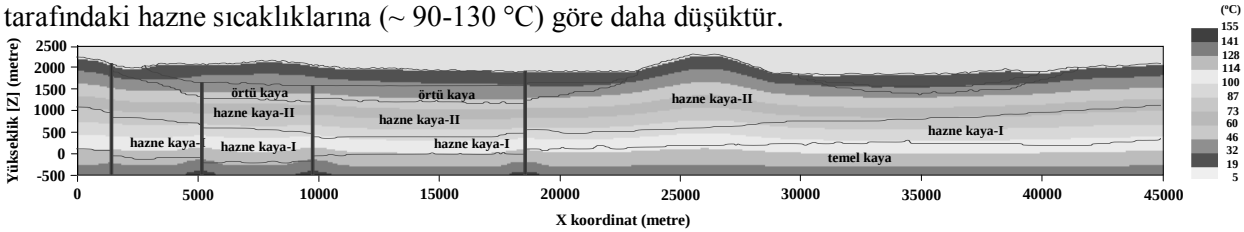


Şekil 8. Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan hidrolik yükler



Şekil 9. Akım ve ısı taşınımının birlikte değerlendirilmesi ile oluşan yeraltı suyu akım yolları

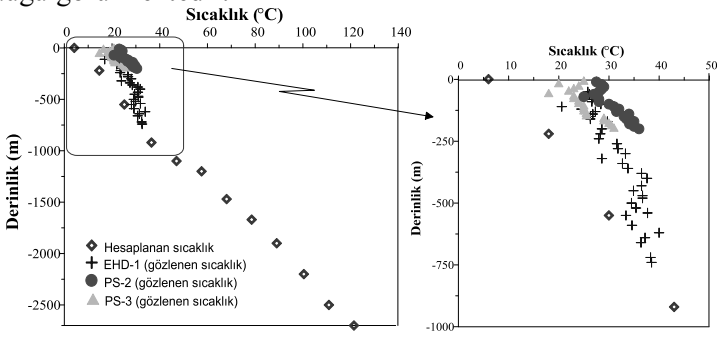
Isı taşınımından yoksun çalıştırılan modelde olduğu gibi, havza ortasında topografik yükseltinin altında kesitin doğu ve batı tarafına olmak üzere su bölümü gerçekleşmiştir. Havzanın doğu kısmında ısı taşınımından yoksun akım modeline benzer akım yolları oluşmuştur. Havzanın batı kısmında ise akım yolları değişerek örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir.Model alanında hesaplanan sıcaklık yatay yönde homojen dağılmıştır. Düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermektedir. Sıcaklık, temel kayada ve örtü kayada fay zonları boyunca yükselmiştir. Rezervuar kayada fay zonlarının ısı taşınımında etkisiz olması bu zonlarda modele girilen hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine son derece yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeye yakın derinliklerde (~500 m) 40-50 °C, 700-1200 m'de ~ 55-79 °C, 1200-1600 m'de ~80-90 °C lik sıcaklıklar hesaplanmıştır. Modelin doğu kısmında hazne kayadaki sıcaklıklar (~80-116 °C) batı tarafındaki hazne sıcaklıklarına (~ 90-130 °C) göre daha düşüktür.



Şekil 10. Seçilen model kesite göre jeotermal elemanların sıcaklık değişimleri

4.4.Modelin Kalibrasyonu

Pasinler jeotermal alanının ısı taşınım modelinin kalibrasyonu için; PS1-A, PS-2, PS-3 ve EHD-1 jeotermal kuyularının boşalım sıcaklıkları ve bu kuyularda MTA tarafından ölçülen sıcaklık-derinlik logları kullanılmıştır. Ancak bu sıcaklıklar sondaj esnasında çamur sıcaklığının ölçülmesiyle elde edilmiştir. İnceleme alanında gece-gündüz arasındaki sıcaklık farkının fazla olması ölçümlerin hassasiyetini önemli ölçüde etkilemiştir. Kuyularda ölçülen çamur sıcaklıkları 20-40°C, jeotermal kuyuların boşalım sıcaklıkları ise 40-51°C arasında değişmektedir. Kuyuların derinlikleri ise 200-750 m arasında değişmektedir.Model sonucunda derinliğe göre hesaplanan sıcaklıklar Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde 500-700 m'lerdeki hesaplanan sıcaklığın, mevcut kuyuların sıcaklığına uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Modelin kalibrasyonu sonucunda derinliğe göre hesaplanan sıcaklık dağılımı

5. SONUÇLAR

Pasinler (Erzurum) jeotermal sahasımodel alanında yeraltı suyu akımının genel olarak topografya denetimli olduğu belirlenmiştir. Hazne kayanın üst kısımlarında alüvyon akiferdeki soğuk su karışımından dolayı akım yatay, alt kısımlarda ise kısmen örtü kayaya doğrudur. Hazne kaya ve fay

zonlarınınporozite ve hidrolik iletkenlik değerlerinin birbirine yakın olmasıgözenekli ve geçirimli olan hazne kayadaki düşey fayların yeraltı suyu akımı üzerindeki etkisini azaltmıştır. Akım ve ısı taşınım modeli birlikte çalıştırıldığında havzanın doğu kısmında ısı taşınımdan yoksun akım modeline benzer akım yolları oluşmuştur. Batı kısmında ise akım yolları değişerek örtü kayadan hazne kayaya doğru gerçekleşmiştir.Isı taşınım modeline göre sıcaklık hazne kaya içerisinde doğu-batı yününde genel olarak homojen dağılırken, temel kayada ve örtü kayada fay zonları boyunca yükselmiştir. Isı taşınımı düşey yönde ise jeotermal gradyana bağlı olarak derinlikle artış göstermiştir. Yüzeye yakın derinliklerde 40-50 °C, hazne kayada ise ~80-90 °C'lik sıcaklıklar hesaplanmıştır. Isı taşınım modelinin kalibrasyonu jeotermal kuyuların boşalım sıcaklıkları ve bu kuyularda ölçülen sıcaklık-derinlik logları kullanılarak yapılmıştır. Gözlenen ve hesaplanan sıcaklıklar incelendiğinde 500-700 m'lerdeki hesaplanan sıcaklığın mevcut kuyuların sıcaklığına uygun olduğu görülmüştür. Ancak bu iki akifer arasındaki sınırın hidrojeolojik niteliğine ilişkin yeterli bilgi elde edilememiştir. Bu nedenle sayısal modelde, bu sınır geçirimsiz sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Benzer şekilde model alanının tabanını oluşturan sınır koşulu gerek akım gerekse ısı tasınımı açısından gözleme dayalı bir şekilde tanımlanabilecek veri bulunmadığından akım için geçirimsiz, ısı transferi için ise sabit sıcaklık sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Az sayıda sondaj noktasının jeotermal sistemin belirli kesimlerinde yoğunlaşması, temsil edici veri alımını güçleştirmiş bunun sonucunda modelin kalibrasyonunda belirsizliklerin artmasına neden olmuştur. Bu güçlüklerin aşılması ve modelin alandaki hidrojeotermal sistemi temsil edebilmesi için modelin akım ve ısı taşınımına ilişkin sınır koşullarını ortaya koyabilecek şekilde derin kuyuların açılması ve özellikle girişim testlerinin yapılmasında büyük yarar görülmektedir. Jeotermal sahalarda uygulanan bu tür matematiksel modeller bu alanlarda geleceğe yönelik planlamalarda bir alt yapı oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

Back, W.,Rosenshein, J.,S. ve Seaber, P., R., 1988. Hydrogeology, Thegeology of North America, O-2, TheGeologicalSociety of North AmericaBoulder, Colorado.

Cermak, V. ve Ryback, L.,1982. ThermalConductivityandSpecificHeat of MineralsandRock, in Numerical Data andFunctionalRelationships in ScienceandTechnology, edsAngenheister G, New Series, Group V, vol. 16, Springer-Verlag, Berlin.

Clark, S., P., Jr., 1966. ThermalConductivity. In: S. P. Clark, Jr. (Ed.), Handbook of PhysicalConstants, Geol. Soc. Am. Mem, 97, 459–482.

Clauser, C., 2003. NumericalSimulation of ReactiveFlow in Hot Aquifers. SHEMAT andProcessing SHEMAT, Springer, Berlin, 1–333.

Davis, S., N., 1969. PorosityandPermeability in Natural MeterialsInFlow Through Porus Media, ed. R.J. M. DeWiestAcademicPress, 53,89. New York.

Dilek R., 1973. Akiferlerin Matematiksel Modellenmesi, Pasinler (Erzurum) ve Çamlıbel (Tokat) Ovalarına Uygulamalar, DoktoraTezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Freze, R., A. ve Cherry, J., A., 1979. Groundwater, Prentice- Hail, USA, 604.

Majorowicz, J., A. andJessop, A., M., 1981. RegionalHeatFlowPatterns in the Western CanadianSedimentaryBasin. *Tectonophysics*, 74, 109–238.

Nathenson, M.,Guffanti, M., Sass, J., H. andMunroe, R., J., 1982. RegionalHeatFlowandTemperatureGradients. In: M. J. Reed (Ed.), Assessment of Low-TemperatureGeothermalResources of the United States, U.S. Geol. Surv. Circ., 892, 9-16.

Raznjevic, K., 1976. *Handbook of ThermodynamicTablesandCharts*, Washington DC, Hemisphere Publishing Corporation.

Reiter, M., A. ve Jessop, A., M., 1985. Estimates of TerrestrialHeatFlow in OffshoreEasternCanada. *CanadianJournal of Earth Sciences*, 22, 1503-17

Waples, D., W. ve Waples, J., S., 2004. A Reviewand Evaluation of SpecificHeatCapacities of Rocks, Minerals, andSubsurfaceFluids, Part 1: MineralsandNonporousRocks: Natural ResourcesResearch, 13, 2, 97-122.

Kızıldere (Denizli) Jeotermal Alanındaki Kabuklaşma Probleminin Hidrojeolojik ve Jeokimyasal İncelenmesi

Hydrogeological and Geochemical Study of the Scaling Problem in Kızıldere Geothermal Field, Denizli

G. Tarcan[1,*], T. Özen[2], Ü. Gemici[1], M. Çolak[1], İ. H. Karamanderesi[3]

[1] *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Jeoloji Mühendisliği Bölümü 35370 Buca İzmir*
[2] *Atatürk Üniversitesi Oltu Yer Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Oltu Erzurum*
[3] *MTA-Emekli, Adres: EVKA-3 Mah. 126 Sokak No:1 D:6 35050 Bornova/İzmir Türkiye*
*(*gultekin.tarcan@deu.edu.tr-gultekin.tarcan@gmail.com)*

ÖZ: Bu çalışmada, Denizli Kızıldere Jeotermal alanında karşılaşılan kabuklaşma problemi ile bu alanın hidrojeolojik ve jeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Alanda üç ayrı hazne bulunmakta, üstten altta doğru Sazak Formasyonu'na ait Neojen gölsel kireçtaşları 1. hazneyi, Menderes Masifi'ne ait mermerler 2. hazneyi, kuvarsit ve gnayslar ise 3. hazneyi oluştururlar. Örtü kaya ise kısmen mika şistler ve çoğunlukla Neojen ardalanmalı serinin killi düzeyleridir. Alanda bugüne kadar derinlikleri 350-2872 m arasında değişen toplam 45 derin kuyu açılmıştır. En yüksek sıcaklık R-1 kuyusunda 242^{o}C olarak kaydedilmiştir. Jeotermal akiferlerden gelen sular Na-HCO_3 ve Na-HCO_3-SO_4 su tiplerini yansıtmaktadır. PhreeqCi programıyla örnekleme sıcaklığında yapılan mineral doygunluk hesaplamaları göstermektedir ki; kalsit, aragonit, stronsiyanit, dolomit, amorf silis çoğunlukla, anhidrit, sölestin ve barit kısmen kabuklaşma oluşturabilecek minerallerdir. Sonuçlar çoğunlukla kabuklaşma örneklerinin jeokimyasal ve X Işını Yansıması (XRD) analizleriyle de desteklenmektedir. Her kuyu akışkanı için geri basım sıcaklığının belirlenmesi bu çalışmanın en önemli sonuçlarındandır. Birleşik yorum olarak geri basım kuyularındaki kabuklaşmadan kaçınmak için soğuk (<50^{o}C) geri basım sıcaklığı önerilir.

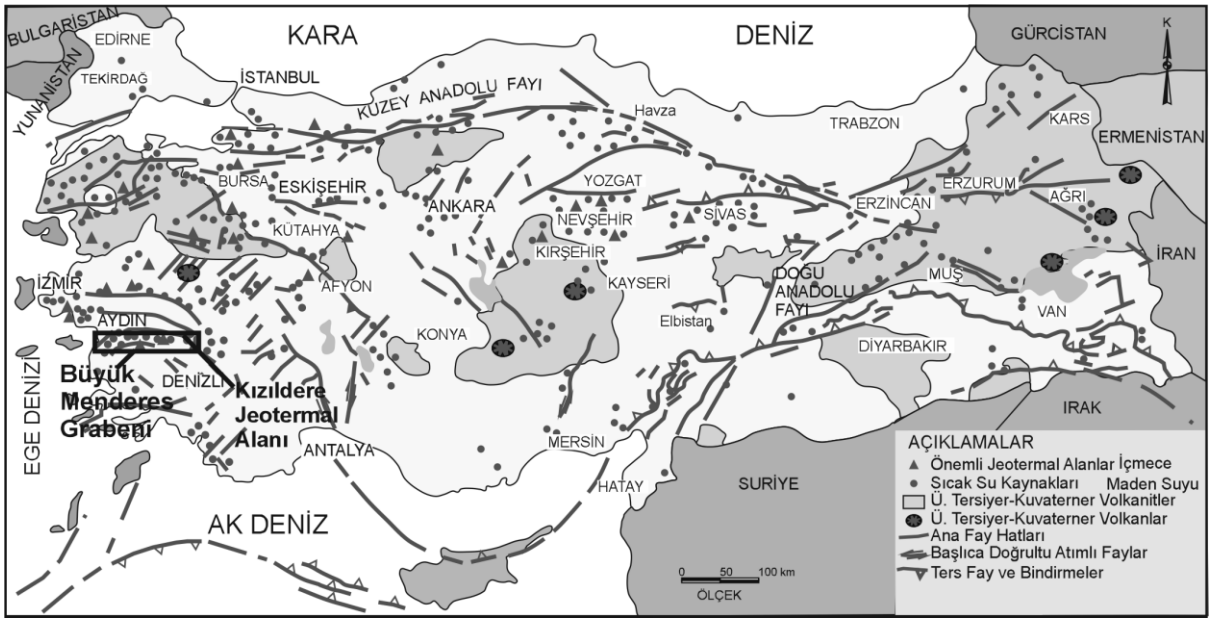
Anahtar Kelimeler: Kızıldere Jeotermal Alanı, Kabuklaşma Problemi, Hidrojeoloji, Jeokimya

ABSTRACT: *In this study the scaling problem in Kızıldere geothermal field and hydrogeological and geochemical properties of this field was investigated. Three reservoirs are situated in the field that are, from shallow to deep, (1) Pliocene lacustrine limestones of Sazak Formation, (2) Palaeozoic to Mesozoic marbles of Menderes Massif, (3) quartz schists and gneiss of Menderes Massif. Cap rock of the system is clayey levels of the Neogene intercalated sediments and partly mica schists. Totally 45 wells whose depths are between 350-2872m were drilled so far. Mineral saturations at measured sampling temperature, calculated by using PhreeqCi code suggest that calcite, aragonite, strontianite, dolomite, amorphous silica, and barite are the likely to be precipitated as scales. These results are confirmed by the results of the geochemical and XRD (X-Ray Diffraction) analyses of the scale samples. Determinations of the scaling minerals and the safety temperatures to avoid or minimize the scaling problems are the most important parts of this study. It was concluded that cold injection (<50^{o}C) is favored if any mineral deposition is to be prevented or reduced in injection wells.*

Keywords: *Kızıldere Geothermal Field, Scaling Problem, Hydrogeology, Geochemistry*

1. GİRİŞ

Bu çalışma Kızıldere jeotermal alanında yapılan hidrojeolojik ve jeokimyasal çalışmaları kapsamaktadır. Bu kapsamda, 12 su noktasından alınan toplam 26 su örneğinin kimyasal analizleri ile kuyulardan alınan kabuklaşma örneklerinin (7 adet) jeokimyasal analizi ve XRD analizi (5 adet) gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda alandaki en önemli problemlerden birisi olan mineral kabuklaşması üzerine odaklanılmıştır. Türkiye jeolojik yapısı nedeniyle jeotermal enerji açısından oldukça zengindir. Jeotermal alanların önemli bir çoğunluğu Batı Anadolu'da özellikle de en yoğun biçimde Büyük Menderes Grabeni'nde bulunmaktadır. İnceleme alanını oluşturan Kızıldere jeotermal alanı da Büyük Menderes Grabeni'nin Doğu kesiminde yer alır (Şekil 1).



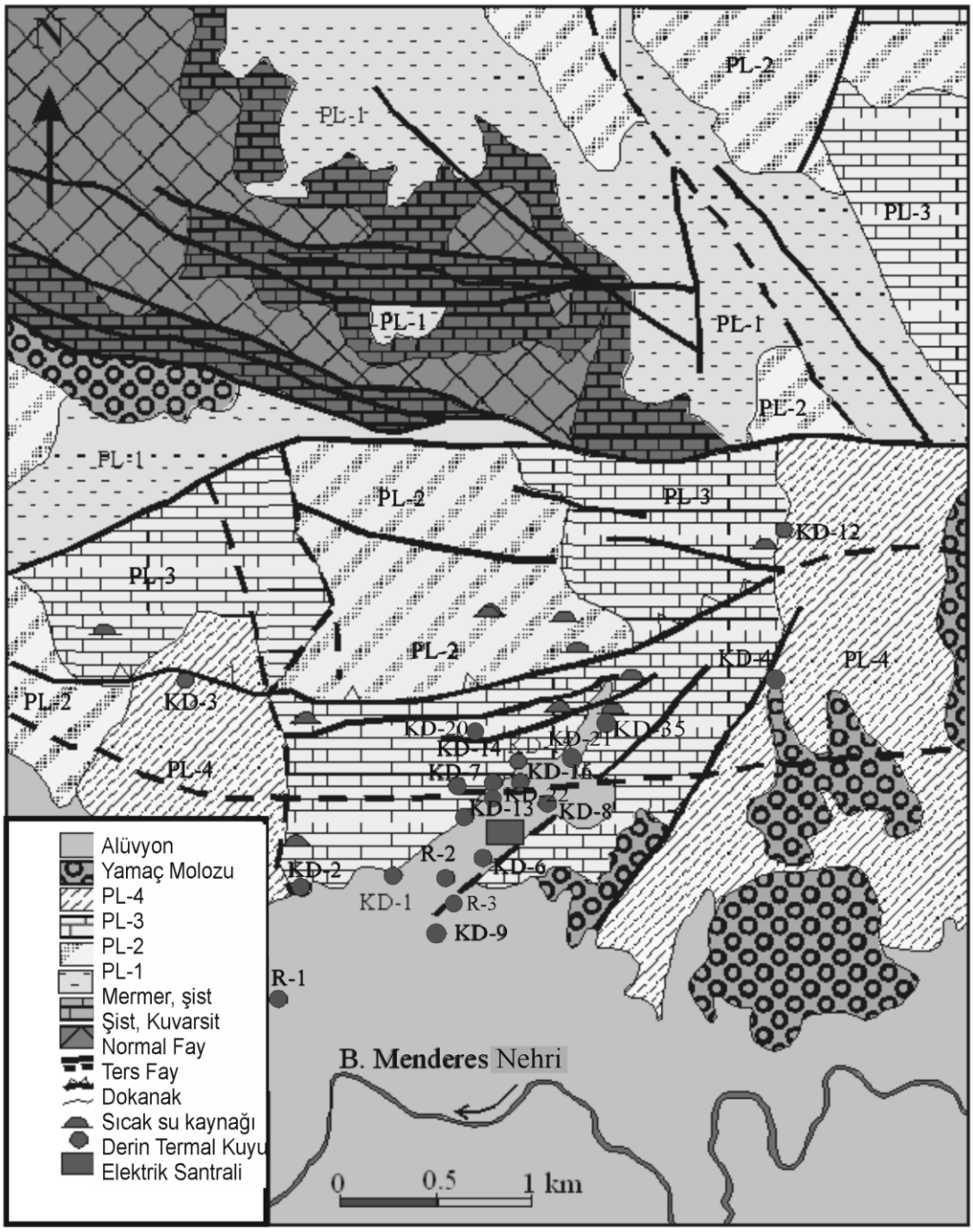
Şekil 1. Türkiye'nin önemli tektonik hatları ve volkanik alanları ile başlıca jeotermal alanları (Şimşek, 2009'dan düzenlenerek) ve inceleme alanının yeri.

Kızıldere jeotermal alanı Türkiye'de ilk geliştirilen sahadır. Çalışmalar 1968 yılında başlamış, Maden Tetkik Arama (MTA) tarafından 25 derin kuyu açılmış ve toplam 20 MWe kapasiteli jeotermal enerji santrali kurulmuştur. Ancak sahadaki işletme ve kabuklaşma problemleri nedeniyle tam kapasiteyle çalışılamaz ve 6 MWe ile 15 MWe arasında değişen kapasiteyle Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) tarafından işletilen saha 2008 Eylül ayında özelleştirilmiştir. Özelleştirme sonrası yapılan geliştirme ve iyileştirme çalışmalarıyla 20 tane daha derin sondaj açılmış ve toplam 80 MWe kapasiteli yeni santral 2013 yılından itibaren üretime başlamıştır (Kindap vd., 2010; Haklıdır ve Kindap, 2013). İyileştirme çalışmaları sonucunda yeni inşa edilen santraller ve eski santralin de 15 MWe kapasiteyle çalıştırılması ile sahadaki toplam elektrik üretimi 95 MWe'ye yükselmiştir (Aksoy, 2014).

Alan yerli ve yabancı çok sayıda araştırıcı tarafından yoğun bir şekilde çalışılmıştır (Şimşek, 1985; Líndal ve Kristmannsdóttir, 1989; Yıldırım, 1989; 2001; Giese, 1997; Giese vd., 1998; Gökgöz, 1998; Tarcan, 2001; Özgür, 2002; Şimşek, 2003; Tarcan, 2005; Şimşek vd., 2005; Möller vd., 2007; Mutlu vd., 2008; Yıldırım, 2009; Karakuş ve Şimşek, 2013). Yapılan bu çalışmalar alanın jeolojik, hidrojeolojik, işletim ve üretimle ilgili mühendislik ve çevre problemlerini içermektedir. Yeni hidrojeolojik, jeokimyasal ve mineralojik verileri kapsayan bu çalışmada alandaki en önemli problemlerden birisi olan mineral kabuklaşması üzerine odaklanılmıştır.

2. JEOLOJİ

İnceleme alanında 8 adet jeolojik birim bulunmaktadır (Şekil 2). Alanın temelinde, Menderes Masifi'nin metamorfik kayaları, tabandan tavana doğru yanal ve dikey geçişli gnays, şist, kuvarsit, mika şist ve mermerlerle temsil edilir. Bu temeli üstleyen Neojen yaşlı tortullar, Alt Pliyosen yaşlı (PL-1, PL-2, PL-3) ve Üst Pliyosen yaşlı (PL-4) olarak iki grupta incelenebilir. Alt Pliyosen tortulları, yaşlıdan gence doğru PL-1 olarak adlanan Kızılburun formasyonu (çakıltaşı, kumtaşı), PL-2 olarak adlanan Sazak formasyonu (kireçtaşı, marn), PL-3 olarak adlandırılan Kolonkaya formasyonu (marn, kumtaşı) birimlerinden oluşur. Bunların üzerinde bloklu çakıltaşı, kumtaşı ve kireçtaşından oluşan Üst Pliyosen yaşlı, PL-4 olarak adlandırılan Tosunlar formasyonu bulunur. Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon birimleri tüm birimleri uyumsuz olarak örter.



Şekil 2. Kızıldere jeotermal alanı çevresinin jeoloji haritası ve su noktalarının yeri (Şimşek, 1985 ve Şimşek vd., 2005' den düzenlenerek).

3. HİDROJEOLOJİ

Alanda üç çeşit hazne kaya bulunmakta; bunlar üsten alta doğru (1) Neojen ardalanmalı serisindeki PL-2 Sazak Formasyonu'na ait Neojen gölsel kireçtaşları, (2) Menderes Masifi'ne ait mermerler ve (3) Menderes Masifi'ne ait kuvarsit ve gnayslardır. Örtü kaya ise Neojen ardalanmalı serinin killi düzeyleri ve kısmen Menderes Masifi içindeki mika şistlerdir (Şekil 2). Alanda bugüne değin toplam 45 derin kuyu açılmıştır. Bu kuyuların derinlikleri 350- 2261 m arasında değişmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kızıldere jeotermal alanında açılmış bulunan jeotermal kuyular (Şimşek vd., 2005'ten düzenlenerek).

Kuyu adı	Sondaj açım tarihi	Derinlik (m)	Üretim borusu Çapı (m)	Üretim borusu derinliği (m)	Hazne Derinliği (m)	Hazne Sıcaklığı (^oC)	Maksimum toplam akışkan kapasitesi (t/h)
KD-1	20.4–12.5.1968	540.00	9 5/8	312.45	U, 436	198	–
KD-1A	17.1–15.2.1969	573.10	9 5/8	404.74	U, 405	195	135
KD-2	16.9–8.11.1968	769.00	9 5/8	395.50	U, 651	174	67
KD-3	26.3–25.4.1969	370.00	9 5/8	257.55	U, 280	172	–
KD-4	7.5–26.10.1969	486.00	9 5/8	314.30	U, 310	178	–
KD-III	1.7–25.10.1969	504.85	6 5/8	312.95	L, 299	152	–
KD-6	20.11–25.1.1970	851.00	6 5/8	665.63	L, 657	201	375
KD-7	6.7–8.8.1970	667.50	6 5/8	591.21	L, 531	208	252
KD-8	5.5–10.6.1970	576.50	9 5/8	500.17	U, 475	190	Test yok
KD-9	1.2–20.4.1970	1241.00	6 5/8	1109.50	L, 1105	172	154
KD-12	26.4–18.6.1970	404.70	6 5/8	300.41	U, 280	148	–
KD-13	23.3–23.4.1971	760.00	9 5/8	597.21	L, 590	201	417
KD-14	2.11–29.12.1970	603.50	9 5/8 + S	455.00	L, 451	210	290
KD-15	27.4–6.6.1971	506.20	9 5/8 + S	389.24	L, 445	209	435
KD-16	29.4–9.6.1973	666.50	11 3/4 + S	497.70	L, 450	212	638
KD-17	28.7–7.8.1975	365.20	13 3/4	361.70	U, 340	144	–
KD-20	19.12.1985–21.1.1986	810.00	9 5/8	495.62	L, 491	204	350
KD-21	14.10–29.11.1985	897.00	9 5/8 + S	558.32	L, 526	205	300
KD-22	25.6–27.7.1985	887.50	9 5/8	569.60	L, 555	205	350
TH-2	29.7–18.10.1996	2001.00	9 5/8 + S	1100.00	L, 1200	171	68
R-1	28.7.1997–21.1.1998	2261.00	9 5/8 + S	1116.90	D, 1600	242	407
R-2	22.6.1999	1428.10	13 3/ 8	780.00	L,780	200	–
R-3	2011	2250				204	
KD-35	2012						

*U: Üst hazne, L: İkincil Hazne, D: Derin Hazne, S: Yarıklı boru (7 in.). Örnek alınan kuyular dolgu rengi ile gösterilmiştir.

Kuyuların 25 tanesi özelleştirme öncesinde MTA tarafından açılmış kuyulardır. Özelleştirmeden sonra eski kuyularda verim arttırma çalışmalarına ilaveten derinlikleri 1467 m - 2872 m arasında değişen $9^{5/}8$ boru çaplı 20 adet yeni kuyu açılmıştır (Kindap vd., 2010; Haklıdır ve Kindap, 2013). Sahada ilk açılan kuyular çoğunlukla rezervuar sıcaklığı 198°C olan Pliyosen kireçtaşlarındaki (Sazak Formasyonu'ndaki) rezervuarda son bulmuştur. Kuyularda kesilen Neojen tortul kalınlığı grabenin kuzeyinden orta kesimlerine gidildikçe artmaktadır. R-1 kuyusunda bu çökel kalınlığı 1000 m'yi aşarken, kuyuda kesilen metamorfik kayalardaki ana rezervuar sıcaklığı 242°C'ye erişmektedir. Kızıldere jeotermal alanından 11'i jeotermal kuyu ve 1 tanesi atık su kanalı (W-1) olmak üzere toplam 12 su noktasından özelleştirme sonrası Nisan 2011 ile Mayıs 2012 tarihleri arasında farklı zamanlarda örneklenmiş toplam 26 su kimyası analizi yapılmıştır. Örneklenen kuyular R-1, KD-1, KD-13, KD-14, KD-15, KD-16, KD-20, KD-21, KD-22, R-3 ve KD-35 kuyularıdır (Çizelge 1).

4. JEOKİMYA

İnceleme alanındaki jeotermal sular Na-HCO_3 ve Na-HCO_3-SO_4 su türünü yansıtmaktadır. Egemen anyon katyon bileşimine göre katyonlar Na+K > Ca > Mg ve anyonlar HCO_3+CO_3 > SO_4 > Cl dizilimi gösterirler. B (5.33 - 30.04 ppm), Li (0.554 - 5.646 ppm), SiO_2 (59.2 - 477.8 ppm), ve Na (1062 - 1534 ppm) gibi yüksek değerler yüksek sıcaklıkta su kayaç etkileşimini yansıtmaktadır. SO_4 (324 - 852 ppm) yüksekliği ise Sazak Fm içindeki jipsli düzeylerden kaynaklanan su kayaç etkileşim süreci nedeniyledir. Alandaki egemen hidrojeokimyasal süreçler su kayaç etkileşimi süreçleridir. Bu süreçler karbonatların, silikatların ve sülfatların çözünme ve çökelme süreçleri ve iyon değişim süreçleriyle

birlikte kendini göstermektedir. İlaveten soğuk su karışımı ile seyrelme ve karışım süreçleri de su türlerinin oluşumunda etkili olmaktadır. Sıcaklık artışı, ortak iyon etkisi gibi etkenler de çözünme çökelme süreçlerini etkilemektedir. Jeotermal sistemlerdeki jeolojik yapıda bazı farklılıklar ve gerçekleşen hidrojeokimyasal süreçler farklı su türlerinin oluşumuna neden olmaktadır. Kızıldere gibi derin dolaşımlı sıcak sistemlerde karbonatlı, sülfatlı ve silikatlı minerallerin çözünmesi sürecine çökelme ve iyon değişim süreçleri de eşlik etmekte ve beraberinde Na-HCO_3 ana su türünü sonuçlamaktadır. Çökelme süreci sıcaklık artışıyla uçan CO_2 bileşeni nedeniyle Ca, Sr ve Mg un çoğunlukla karbonatlar ($Ca^{+2}/Mg^{+2}/Sr^{+2} + CO_3^{-2} = CaCO_3$) ve sonra sülfatlar ($Ca^{+2} + SO_4^{-2} = CaSO_4$) ile tuz oluşturarak çökelmesi ile oluşmakta ve böylece $Ca^{+2}/Mg^{+2}/ Sr^{+2}$ azalarak Na^+ zenginleşmektedir. İyon değişim süreci ise suyun geçtiği simektit türü killerdeki Na ile Ca, Mg ve Sr iyonlarının yer değiştirmesi (Ca^{2+} + 2 Na (ex) = Ca(ex) + 2 Na^+) sonucu Ca, Mg ve Sr azalışını ve Na artışını açıklamaktadır. Çözünme-çökelme süreci ve iyon değişim süreci birleşimi (Ca ve Na örneğinde) Ca^{2+} + 2 (HCO_3^-) + katı-2 Na^+ = 2 Na^+ + 2 (HCO_3^-) + katı-Ca^{2+} bağıntısıyla açıklanabilir. Kızıldere'de sülfatın 2. derecede zengin anyon olarak Na-HCO_3-SO_4 su türünü oluşturması bu alanın Sazak Formasyonu'nun etki sahasında olmasından alanın geçiş kuşağında bulunmasından kaynaklanmaktadır.

4.1. Kabuklaşma Probleminin Jeokimyasal Değerlendirilmesi

Su kimyası modellerinde sistemlerde kabuklaşma problemi oluşturacağı öngörülen mineraller karbonatlar ($CaCO_3$-kalsit ve aragonit, $CaMgCO_3$-dolomit, $SrCO_3$-stronsiyanit), sülfatlar ($CaSO_4$-Anhidrit, $SrSO_4$-sölestin, $BaSO_4$-barit) ve silis (amorf SiO_2) olarak belirlenmiştir. Buna göre karbonat çökelmesi derinlerde buhar ayrılmasıyla başlar ve o seviyenin birkaç derece üzerinde en yüksek şiddete ulaşır. Özetle akışkan kuyuda yüzeye çıkarken basınç düşer ve CO_2 sudan ayrılarak gaz fazına geçer. Akışkandaki CO_2 azalması pH'ın hızla artması ve $CaCO_3$' ün çökelmesiyle sonuçlanır. $H_2O+CO_2=HCO_3+H^+$ denkleminde görüleceği üzere suda CO_2 çözünürlüğü H^+ iyonunun artmasına neden olduğundan suyun pH'ı CO_2 çözünürlüğüyle düşmektedir. Sudan CO_2 ayrılmasıyla da pH artmaktadır. Sular, içinde bulunan çözünmüş maddelerin türüne ve miktarına bağlı olarak ya mineral kabuklarının oluşmasına ya da bunların çözünmesine neden olur. Mineral kabuklarının oluşma mekanizması (1) suyun belli bir mineral ile ulaştığı doygunluk derecesine, (2) sıcaklık ve basınç değişim hızına ve (3) suyun pH derecesine bağlıdır. Herhangi bir mineralin sudaki çözünürlüğü, sıcaklık, basınç, pH, redoks potansiyeli ve çözeltideki maddelerin göreceli derişimine bağlıdır (Arnórsson, 1989, 1995, 2000; Tarcan, 2001). Çözünürlüğü kontrol eden bu parametrelerdeki değişime bağlı olarak suda çözünmüş maddeler çökelerek değişik şekillerde kabuk oluşturabilirler. Sular, kimyasal bileşimleri nedeniyle korozif (agresif, saldırgan), kabuklaştırıcı (taş yapıcı, kireçlendirici) ve kararlı (dengede) olma özelliklerden birini gösterirler. Saldırgan özellikteki su, bulunduğu ortamda aşınmaya neden olurken, aynı zamanda istenmediği halde bulunduğu ortamdaki bazı maddeleri çözerek suyun fizikokimyasal özelliklerinin değişmesine neden olur. Kabuklaştırıcı özellikteki su ise bulunduğu ortamlarda kabuk şeklinde bir katman oluşturarak hacim kaybına neden olur. Her iki durum da üretim kaybına ve dolayısıyla ekonomik sıkıntıya yol açmaktadır. Genelde termal suların üretim ve kullanımlarında kimyasal bileşimlerine göre 3 farklı kabuklaşma türü (1- Silis ve silikat kabuklaşmaları, 2- Karbonat kabuklaşmaları ve 3- Sülfat kabuklaşmaları) ile karşılaşılır.

Karbonat Kabuklaşması: Türkiye'deki (ve dünyadaki) jeotermal sahaların çoğunda olduğu gibi Kızıldere jeotermal sahalarında karşılaşılan kabuklaşma tipi de çoğunlukla karbonat kabuklaşmasıdır. Suda çözünmüş halde bulunan CO_2 miktarı, Henry Yasası gereği, suyla temas halinde bulunan gaz fazındaki CO_2'in kısmi basıncı ile doğru orantılıdır. Kabuklaşma üzerinde büyük bir role sahip karbondioksitin kökeninin önemi yoktur. Volkanik ya da karbonatların ayrışması sonucu yeraltı sularının yapısına girmiş olabilir. CO_2 kökeni ne olursa olsun $CaCO_3$ kabuklaşmasının oluşumu üzerinde son derece etkilidir. Türkiye jeotermal sahalarının çoğunda oluşan kalsiyum karbonat kabuklaşmaları akışkan içinde bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} ve Sr^{+2} iyonları ile HCO_3^- iyonlarının uygun pH ortamında birbirleri ile aşağıdaki reaksiyonlar gereğince çözünürlüğü az bileşikler ($CaCO_3$, $MgCO_3$, $SrCO_3$ vb.) oluşturması sonucu meydana gelmektedir.

CO_2 (aq) <=> CO_2 (buh) (1)
HCO_3^- + H^+ <=> CO_2 (aq) +H_2O (2)
$2HCO_3$ - <=> CO_2 (aq) +CO_3 = + H_2O (3)
Ca^{++} + CO_3 = <=> $CaCO_3$ (4)
[(3) + (4)] Ca^{+2} $2HCO_3^-$ <=> $CaCO_3$ + CO_2 + H_2O
HCO_3^- + H_3BO_3 <=> H_2BO_3- + CO_2 (aq) +H_2O (5)
HCO_3^- + H_4SiO_4 <=> $H_3SiO_4^-$ + CO_2 (aq) +H_2O (6)

Jeotermal uygulamalarda kalsiyum karbonat kabuklaşmalarını tetikleyen faktörler yukarıda açıklanan kimyasal tepkimelerin çift yönde akışını etkileyen faktörlerdir. Bu faktörlerin başında pH, CO_2 kısmi basıncı (PCO_2) ve toplam tuz derişimleri gelir. Alüminyum silikat minerallerinin pH dengesi üzerindeki etkisi büyüktür. Derinliklerde basınç altında suda çözünmüş halde bulunan CO_2, karbonik asit oluşturarak (H_2CO_3) akışkana asidik yapı kazandırmaktadır. Henry Yasası'na göre, suda çözünmüş CO_2, kısmi basıncıyla doğru orantılı ve çözeltinin pH'ı üzerinde çok etkin bir parametredir. Diğer bir deyişle CO_2 in suda çözünürlüğü suyun pH'sının düşmesini ve asidik özellik kazanmasını sağlar. Çözeltinin içerisinde çözünmüş halde kaldığı sürece, çözeltinin pH'ı düşüktür. Sıvı fazdan gaz fazına geçmeye başlayınca (gaz çıkışı), akışkanın pH' ı yükselmeye başlar ve yukarıda (3) ve (4)' nolu eşitliklerle çözeltide önce HCO_3^-, sonra CO_3^{-2} iyonları çoğalmaya başlar. Ortamda artan CO_3^{-2} iyonları çözeltide bulunan Ca^{+2} (ve/veya Mg, Sr) iyonları ile birleşerek karbonat kabuklaşmasına neden olmaktadır. Çökelme süreçleri (kabuklaşma mekanizması) jeotermal alanlardan kaynaklanan çevresel problemlerin ortaya çıkmasında da dolaylı yollardan etkili olmaktadır. Başta bor olmak üzere yüksek kirletici bileşenli jeotermal akışkanların kontrolsüz deşarjıyla toprak kirlenmesi, yüzey ve yeraltı suyu kirlenmesi gibi problemler birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Gemici ve Tarcan, 2002; Şimşek, 2003; Şimşek vd., 2005). İnceleme alanındaki bor değerleri Kızıldere'de 30 ppm'e, erişmektedir. Büyük Menderes Nehri'nin jeotermal kaynaklardan etkilenmediği yerinden (Kamara Kaplıcası'nın da membasından) alınan örnekte 0.019 ppm gibi çok düşük B değeri belirlenmiştir. Bununla birlikte Kızıldere santralinin akış yönünde, Tekkehamam Köprüsü'nde 2.139 ppm gibi yüksek B değerleri jeotermal kökenli kirlenmenin başlıca kanıtını oluşturmaktadır. Jeotermal akışkanların çevreye olan olumsuz etkisini yok etmenin ya da azaltmanın yolu geri basım kuyularıyla hazneye basılması veya sızdırmaz yeraltı borularıyla deniz gibi yüksek derişimli bir başka kaynağa taşınmasıdır. İnceleme alanındaki jeotermal sistemlerin denize olan uzaklığı ve bu iletim borularında olabilecek kazalar nedeniyle sızdırmazlıkların bozulması ve bu borularda olabilecek kabuklaşma gibi olasılıklar 2. öneriyi yani atık suyun denize taşınması önlemini geçersiz kılmaktadır. Bu nedenle geri basım kuyularından geri verilmesi tek yol olarak görülmektedir. Bu önlem çevre kirlenmesine karşı alınacak önlemin yanı sıra rezervuarların verimliliği açısından da bir gerekliliktir. Zaten günümüzde yasal bir zorunluluk olarak, bütün işletmelerde olduğu gibi, Kızıldere jeotermal alanı atıkları da geri basım kuyularıyla deşarj edilmektedir. Ancak geri basım kuyularının kabuklaşma ile tıkanması ya da geçirgenliğin azalması nedeniyle geri basılamayan akışkanlar ister istemez yüzeye kontrolsüz olarak verilmektedir. Bu nedenle işletmelerin geri basım sıcaklıklarına dikkat etmesi ve önerilen emniyetli sıcaklıklarda geri basım yapması işletme verimi yanı sıra çevre kirlenmesine karşı da önemli bir önlem olacaktır.

Kızıldere jeotermal alanında yapılan jeokimyasal modellere göre, bir iki istisnayla, kalsit, aragonit, dolomit ve stronsiyanit kabuklaşması her sıcaklıkta doygunluk üstü değerler verdiğinden bu minerallerin (karbonatların) kabuklaşması kaçınılmazdır. Amorf silis çökelme riskine karşı emniyetli sıcaklıklar 63^{o}C ile 120^{o}C arasında değişmektedir. Re-enjeksiyon kuyuları için emniyetli sıcaklıklar bu değerleri tüm alan için genellenecek olursa 120^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklardır. Bu nedenle amorf silis kabuklaşması riskine karşı 120^{o}C'nin üzerinde bir reenjeksiyon yapılırsa barit kabuklaşması riski de bertaraf edilecektir. Karbonat çökelmesi için ya ilave inhibitör konulmalı, ya da yüzeyde olabildiğince soğutularak düşük sıcaklıklarda (50^{o}C'nin altında) reenjeksiyon yapılması en iyi çözüm olacaktır. Tabii ki reenjeksiyon sonucu sistemin soğuma tehlikesini de düşünerek uygun yerlerdeki reenjeksiyon kuyularına basılması gerekmektedir. İnceleme alanındaki kabuklaşma problemi üzerine literatürde yer alan çalışmalarda çoğunlukla Kızıldere alanı üzerine yoğunlaşılmıştır. Lindal ve Kristmandottir (1989) KD–6 kuyusu seperatörü ve susturucusundan alınan kabuk örneğinin yüzde bileşiminde; Kalsit ve

Aragonit formunda % 75 $CaCO_3$+$SrCO_3$, eser miktarda Fe, Al ve K ile birlikte % 25 Silika (SiO_2) belirlemişlerdir. Kuyularda MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan kabuk analizinin ağırlık olarak yüzde bileşiminde % 70-78 $CaCO_3$; % 18–20 $SrCO_3$; % 0.5–1,8 $MgCO_3$; % 0.2–5 SiO_2 değerleri elde edilmiştir (Yıldırım 1989; Şimşek vd., 2005; Yıldırım, 2009). Bütün bu sonuçlar su kimyası modellerinde öngörülen kabuklaşma çeşitlerini desteklemektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan kabuk kimyası analizleri ve kabukların XRD analizleri de benzer sonuçlar vermektedir. XRD analizlerine göre KD-13, R-3, KD-16 ve KD-22 kuyularından alınan kabuk örneklerinde çoğunlukla kalsit ve aragonit ve daha az olarak dolomit ve stronsiyanit mineralleri saptanmıştır. Ayrıca kabuk kimyası analizlerine göre de CaO, SiO2, MgO ve göreceli olarak Sr ve Ba yüksek değerler vermektedir. Bu yüksek değerler su kimyasında önerilen kabuklaşma türlerini (kalsit, aragonit, stronsiyanit, dolomit, kısmen sölestin, anhidrit ve barit) desteklemektedir.

5. SONUÇLAR

Kabuklaşma eğiliminin değerlendirilmesi için öncelikle kabuk oluşturabilecek minerallerin denge durumları incelenmiştir. PhreeqCi ile yapılan doygunluk indeksi hesaplamaları, çökelebilecek minerallerin kalsit, aragonit ($CaCO_3$) ile dolomit ($CaMgCO_3$) ve kısmen stronsiyanit ($SrCO_3$) gibi karbonatlı mineraller ile anhidrit ($CaSO_4$), sölestin ($SrSO_4$) ve barit ($BaSO_4$) gibi sülfatlı mineraller ve silis (amorf SiO_2) olduğunu göstermiştir. Alanda kalsit, aragonit, stronsiyanit ve dolomit mineralleri için emniyetli (kabuklaşma oluşturmayan) sıcaklık verilememektedir. Sölestin, anhidrit yüksek sıcaklıklarda ve silis ile barit de düşük sıcaklıklarda kabuklaşma oluşturabilecek minerallerdir. Alanda üretim kuyuları için uygun bir inhibitör seçilerek üretim yapılması üretim kuyularındaki kabuklaşma probleminin giderilmesi için en uygun seçim olacaktır. Amorf silis ve barit kabuklaşmasına karşı belirlenen emniyetli sıcaklıklar sırasıyla ~63-120°C ve ~50-120^oC sıcaklıklarından yüksek değerlerdir. Anhidrit ve Sölestin kabuklaşmasına karşı belirlenen emniyetli sıcaklıklar ise ~165^oC and ~140-175^oC den düşük sıcaklıklardır. Kabuk ve kayaç jeokimyası analizleri değerlendirildiğinde; kabuklarda rastlanılan yüksek (% 55'e ulaşan) CaO ve yüksek SiO_2, Sr ve Ba su kimyası modellerinde önerilen kalsit, aragonit, amorf silis, barit ve stronsiyanit kabuklaşmasının önemli bir kanıtı olarak düşünülebilir. İlaveten yapılan XRD analizlerinde kalsit, aragonit, stronsiyanit ve dolomit minerallerine rastlanmıştır. Bu da su kimyası modellerindeki tahminlerle çakışmaktadır. Özelleştirme öncesi alanda geri basım kuyusu ve inhibitör uygulaması bulunmadığından tek sorun üretim kuyularındaki kabuklaşma problemiydi ve mekanik temizleme sonucu üretim yapılıyordu. Oysa günümüzde bütün kuyulardan inhibitör kullanımıyla üretim yapıldığı için üretim kuyularında kabuklaşma sorunu olmamaktadır. Bununla birlikte bu durum, inhibitörler Ca, Mg ve Sr çökelmelerini engellediğinden ve separatörde su buhar ayrımından sonra daha da zenginleşerek atık sularda bulunacağından, geri basım kuyuları ve yüzey borularında kabuklaşma tehlikesi doğmasına neden olmaktadır. Geri basım kuyularında ve yüzey borularındaki kabuklaşma tehlikesine karşı yukarıda verilen mineraller için belirlenen emniyetli sıcaklıklarda geri basım yeterli değildir. Çünkü karbonatlı mineraller için emniyetli sıcaklıkta enjeksiyon şansı bulunmamaktadır. Bu nedenle mineral kabuklaşmasından kaçınmak ya da en aza indirmek için kullanılan atık jeotermal suların yüzeyde havuzlarda veya tanklarda bekletilerek soğutulması ve daha sonra olası en soğuk (<50^oC) halde reenjeksiyon yapılması önerilir.

6. KATKI BELİRTME

Bu çalışma 109Y315 numaralı TÜBİTAK projesinin bir kısmındaki verilerden yararlanılarak üretilmiştir. Alanda yapılan çalışmaların yayınlanması konusunda verdikleri fırsat için Kızıldere Jeotermal Santrali yetkililerine, bildiri metninde objektif değerlendirmeleri ve ayrıntılı eleştirileri ile önemli katkıları olan adı açıklanmayan hakeme teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

Aksoy, N., 2014. Power generation from geothermal resources in Turkey. Renewable Energy. 68, 595-601.

Arnórsson, S., 1989. Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters-theoretical considerations. Geothermics, 18, 33-39.

Arnórsson, S., 1995. Scaling problems and treatment of separated water before injection. In: WGC-95, Book of Course on Injection Technology, Italy.

Arnórsson, S., 2000. Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use: sampling methods, data handling, interpretation. IAEA, Vienna.

Gemici, Ü., Tarcan, G., 2002. Distribution of boron in thermal waters of Western Anatolia, Turkey and examples on their environmental impacts. Environmental Geology, 43, 87–98.

Giese, L.B., 1997. Geotechnische und umwelt geologische aspekte bei der forderung und reinjection von thermal fluiden zur nutzung geothermischer energie am beispiel des geothermal feldes Kızıldere und des umfeldes, W-Anatolien/Turkei (In German). PhD thesis, FU, Berlin.

Giese, L.B., Pekdeğer, A., Dahms, E., 1998. Thermal fluids and scalings in the geothermal power plant of Kızıldere, Turkey. Water-Rock Interaction (WRI-9), Proceedings of the 9th International Symposium on Water-Rock Interaction Taupo, New Zealand. Arehart and Hulston (Eds) Balcema, Rotterdam, pp. 625–628.

Gökgöz, A., 1998. Geochemistry of the Kızıldere-Tekkehamam-Buldan-Pamukkale geothermal fields, Turkey. Geothermal Training in Iceland, United Nations University Programme, Orkustofnun, Reykjavik, Iceland. Book of Reports, pp. 115–156.

Haklıdır, F.S.T., Kindap, A., 2013. The first discovered high entalphy geothermal field in büyük menderes graben: Kızıldere geothermal field with new 80 MWe power plant ınvestment in western Anatolia, Turkey. Proceedings European Geothermal Congress, Pisa, Italy.

Karakuş, H., Şimşek, Ş., 2013. Tracing deep thermal water circulation systems in the E–W trending Büyük Menderes Graben, western Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research 252, 38–52.

Kindap, A., Kaya, T., Haklıdır, F.S.T., Bükülmez, A.A., 2010. Privatization of Kızıldere geothermal power plant and new approaches for field and plant. Proceedings of World Geothermal Congress (WGC-2010), Bali, Indonesia.

Líndal, B., Kristmannsdóttir, H., 1989. The scaling properties of the effluent water from Kızıldere power station, Turkey, and recommendation for a pilot plant in view of district heating applications. Geothermics, 18, 217–223.

Möller, P., Dulski, P., Özgür, N., 2007. Partitioning rare earths and some major elements in the Kizildere geothermal field, Turkey. Geothermics, 37, 132-156.

Mutlu, H., Güleç, N., Hilton, D.R., 2008. Helium–carbon relationships in geothermal fluids of western Anatolia, Turkey. Chemical Geology, 247, 305-321.

Özgür, N., 2002. Geochemical signature of the Kizildere Geothermal Field, Western Anatolia, Turkey. International Geology Review, 44, 153–163.

Şamilgil, E., Arda, O., 1977. Laboratory analyses result of scale sample in Kızıldere. MTA report No: 9527, 1-8.

Şimşek, Ş., 1985. Geothermal model of Denizli-Saraykoy-Buldan area. Geothermics, 14, 393–417.

Şimşek, Ş., 2003. Hydrogeological and isotopic survey of geothermal fields in the Büyük Menderes graben, Turkey. Geothermics, 32, 669–678.

Şimşek, Ş., Yıldırım, N., Gülgör, A., 2005. Developmental and environmental effects of the Kızıldere geothermal power project Turkey. Geothermics, 34, 239–256.

Şimşek, Ş., 2009. Geothermal Energy Development Possibilities in Turkey. Conference on Geothermal Energy in Turkey, October Potsdam, Germany.

Tarcan, G., 2001. Aquifer chemistry and mineral saturation in selected high temperature geothermal areas. United Nations University Geothermal Training Programme, Orkustofnun, Reykjavik, Iceland. Book of Reports, pp. 267-290.

Tarcan, G., 2005. Mineral saturation and scaling tendencies of waters discharged from wells (>150^{o}C) in geothermal areas of Turkey. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 142, 263–283.

Yıldırım, N., 1989. Scaling problem in the geothermal fields of Turkey and its alternative solution. UN Seminar on New Developments in Geothermal Energy EP/SEM.14/R.23, Ankara, pp. 1-13.

Yıldırım, N., 2009. Ülkemiz jeotermal sahalarında karşılaşılan kabuklaşma/korozyon ve inhibitör uygulamaları. TMMOB Jeotermal Kongresi, Ankara.

Saraykent (Yozgat) Jeotermal Sularının Hidrojeokimyasal Değerlendirilmesi

Hydrogeochemical Assessment of Saraykent (Yozgat) Geothermal Waters

S. Özulukale[1,*], Ş. Şimşek[1]

[1] *Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe/Ankara (*hidrojeologsevim@hotmail.com)*

ÖZ: Saraykent (Yozgat) jeotermal sularının hidrojeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi kırsal kalkınma için büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, Saraykent jeotermal sahasındaki suyun fiziksel ve hidrojeokimyasal özelliklerinin araştırılmasıyla elde edilen bulgularla jeotermal rezervuardaki su-kayaç etkileşimiyle sahadaki suların olası kökenlerinin, olası rezervuar sıcaklığının ve suların doygunluk indisinin hesaplanmasıyla kabuk yapıcı özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Saraykent jeotermal çalışma sahasından sıcak ve soğuk su örnekleri Eylül 2014'te toplanmıştır. Suların elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve pH değerleri sahada yerinde ölçülmüş olup hidrokimyasal analizler için toplanan su örneklerinin analizleri ilgili laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışma sahasındaki suların kökensel ilişkileri Schoeller ve Piper Diyagramı'nda değerlendirildiğinde jeotermal su örnekleriyle soğuk su örneklerinin farklı kümelenme gösterdikleri belirlenmiştir. Sahadaki jeotermal akışkan sıcaklıkları 48,2-73,6°C arasında değişmektedir. Jeotermometre değerlendirmelerine göre, muhtemel rezervuar sıcaklığı 108-157°C olarak hesaplanmıştır.

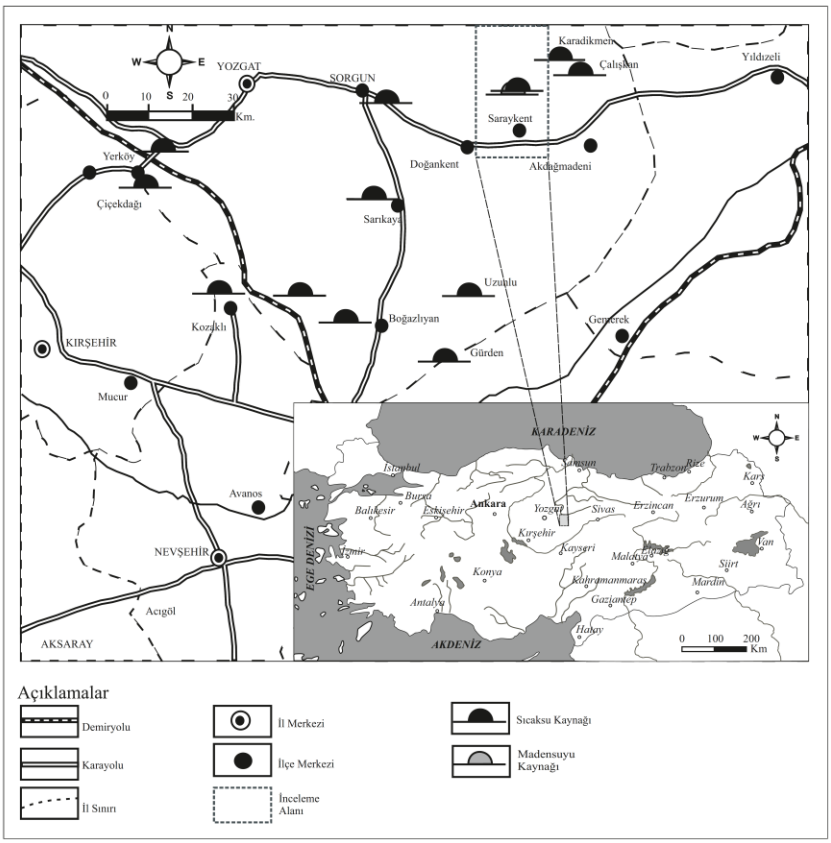
Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, Hidrojeokimya, Jeotermometre, Saraykent, Yozgat

ABSTRACT: *Determination of hydrogeochemical characteristics of Saraykent (Yozgat) geothermal water has a great importance for rural development. In this study, investigation of Saraykent geothermal field aimed to determine scaling properties by calculating saturation index and the probable reservoir temperature, probable origin of waters in the field with water-rock interactions in the geothermal reservoir with the findings obtained by water's physical and hydrochemical characteristics. In this context, hot and cold water samples in Saraykent were collected from the geothermal field work in September 2014. Electrical conductivity, temperature and pH values of water have been measured in the field, water samples collected for hydrochemical analysis were carried out in the relevant laboratory. Origin relationships of water in the field were determined to show the different clusters of cold water samples with geothermal water samples when Schoeller and Piper Diagram evaluate. Geothermal fluid temperature ranged from 48,2-73,6°C in the field. Possible reservoir temperature according to Geothermometer assessment is calculated as 108-157°C.*

Keywords: Geothermal Energy, Hydrogeochemistry, Geothermometer, Saraykent, Yozgat

1. GİRİŞ

Jeotermal sistemin tanımlanması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması, kırsal kalkınma için oldukça önemli bir konudur. Kalkınmada öncelikli bölgede yer alan Yozgat İli'nin doğusundaki Saraykent İlçesi'nin jeotermal kaynaklar incelenmiştir (bkz Şekil 1). Bu çalışma kapsamında, saha ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



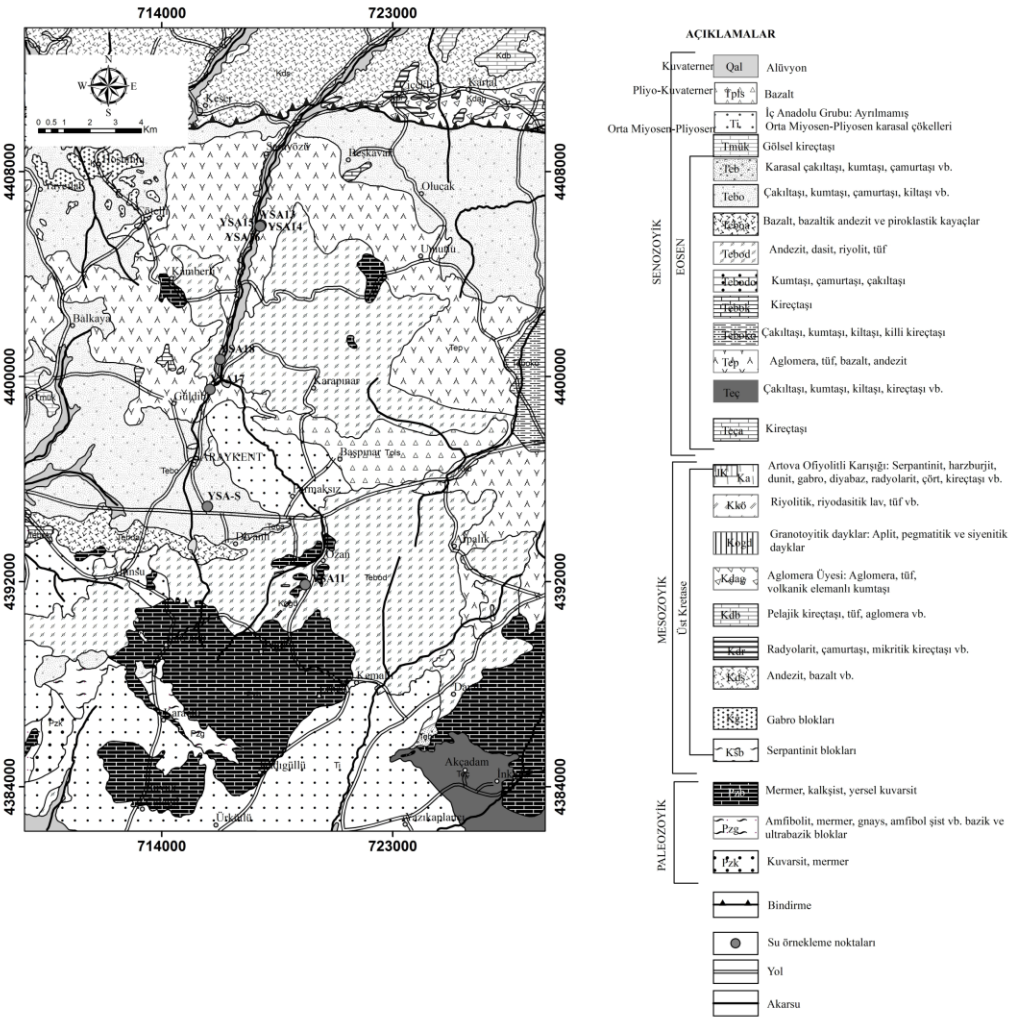
Şekil 1. Çalışma sahasının yer bulduru haritası.

Bölgede daha önce Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalardan (Dalkılıç, vd., 2008 ve Akçay, vd., 2008) yararlanılarak sahanın 1/100.000'lik jeolojik haritası saha gözlemleriyle deneştirilerek hazırlanmıştır (bkz Şekil 2).

Saraykent (Yozgat) sahasından sıcak ve soğuk sulardan örnekler alınarak hidrojeokimyasal olarak incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda, sıcak su kaynaklarının dolaşımıyla soğuk sular arasındaki ilişkinin belirlenmesi için sahadan 8 adet noktadan su örneği Eylül 2014'te toplanmıştır. Suların sıcaklıkları, elektriksel iletkenlikleri ile pH değerleri sahada yerinde ölçülmüş olup anyon-katyon analizleri için toplanan örneklerin analizleri Hacettepe Üniversitesi Jeoloji (Hidrojeoloji) Mühendisliği Su Kimyası Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sahadaki jeotermal akışkanın yüzey sıcaklıkları 48,2-73,6°C arasında değişmektedir.

2. JEOLOJİ

Çalışma sahasının temelini Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı Kırşehir Masifi'ne ait mermer, şist, gnays gibi metamorfitler ve Ü. Kretase-Paleosen yaşlı ofiyolitik karışık oluşturmaktadır (bkz Şekil 2). Çalışma sahasında metamorfitler intrüzif kayaçlar ve aplitik, pegmatitik dayklar tarafından kesilmektedir. Bunların üzerine Eosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı kayaçlar ile volkanitler, Orta Miyosen-Pliyosen yaşlı karasal kırıntılılar, Pliyosen yaşlı volkanitler, Pliyo-Kuvaterner kırıntılılar gelmektedir. En üstte Kuvaterner alüvyonlar yer almaktadır. Çalışma sahasının kuzeyinde Üst Kretase yaşlı ofiyolitik karışık, Eosen Flişi üzerine tektonik olarak gelmektedir (Dalkılıç, vd., 2008; Akçay, vd., 2008; Şimşek, 1993; Burçak vd., 2002).



Şekil 2.Çalışma sahasının jeolojik haritası (Dalkılıç, vd., 2008; Akçay, vd. 2008) ve su örnekleme noktaları.

3. HİDROJEOKİMYA

Çalışma sahasında Saraykent İlçe merkezi ve yakın çevresinde bulunan sıcak ve soğuk suların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ortaya çıkartılması, bu kaynakların bağlı bulundukları yeraltısuyu sistemi, kökenleri ve birbirleri ile olan ilişkilerinin belirlenmesi amacıyla 2014 Eylül ayında sahada su örneklemesi çalışması yapılmıştır. Çalışma sahasındaki yerüstü ve yeraltı sularının örnekleme çalışmalarında pH, Elektriksel İletkenlik (Eİ) ve sıcaklık (T) gibi fiziksel parametre ölçümleri sahada yerinde belirlenmiştir (Çizelge 1).

3.1. Kökensel İncelemeler

Çalışma sahasındaki iyon derişimlerinin mek/L değerlerine göre çizilen Schoeller Diyagramı'nda 3 farklı su tipi dikkati çekmektedir (bkz Şekil 3). Bunlar; Saraykent yağmur suyu (YSA-S), soğuk su kaynakları ve akarsulardan alınan su örnekleri düşük iyon içeriği göstererek 1. grupta yer almaktadır. Sıcak ve mineralli su örnekleri (YSA13, YSA14, YSA15, YSA16) yüksek iyon içeriği göstererek 3. grupta toplanmaktadır. YSA11 nolu örnek ise sıcak ve mineralli su örnekleriyle soğuk su örneklerinin arasında yer almakta olup yüksek $Na^{+}+K^{+}$ ve SO_4^{-2} değeri ile sıcak ve mineralli suların özelliğine paralellik göstermekte iken yüksek Mg^{+2} ve düşük Cl^{-} değeri ile de soğuk su örneklerine paralellik gösteren 2. grupta toplanmaktadır. 2. gruptaki suyun karışım suyu olabileceği düşünülmektedir. Çizelge 2'de çalışma sahasındaki suların iyon sıralaması görülmektedir.

Çizelge 1. Çalışma sahasından toplanan su örneklerine ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları.

Saha	Örnek kodu	Örnekleme türü (açıklama)	Örnekleme tarihi	T (°C)	pH	Eİ (µS/cm, 25 °C)	Derişim Ca^{+2} (ppm)	Mg^{+2} (ppm)	Na^{+} (ppm)	K^{+} (ppm)	HCO_3^{-} (ppm)	CO_3^{-2} (ppm)	SO_4^{-2} (ppm)	Cl^{-} (ppm)	F^{-} (ppm)	Br^{-} (ppm)
Saraykent	YSA11	Kuyu (Ozan)	09.09.2014	17,9	6,86	1960	247,89	45,85	191,72	4,41	345,17	0,0	916,26	17,50	1,81	0,00
	YSA13	Kuyu	10.09.2014	73,6	7,16	3020	139.31	8.15	569.91	42.79	273.76	0,0	508.44	550.90	5.67	0,00
	YSA14	Kuyu	10.09.2014	68,0	7,16	3870	142.19	7.15	607.56	47.01	244.00	0,0	555.22	590.77	5.57	0,00
	YSA15	Kuyu	10.09.2014	67,6	7,50	3690	143.11	6.90	600.57	45.73	244.00	0,0	551.90	580.55	5.65	0,00
	YSA16	Kuyu	10.09.2014	48,2	7,67	2950	179.32	8.25	458.82	29.44	249.95	0,0	631.35	374.63	4.85	0,00
	YSA17	Akarsu	10.09.2014	19,5	7,89	1071	118.95	27.39	43.92	16.08	499.90	0,0	51.96	25.43	0.33	0,00
	YSA18	Çeşme	10.09.2014	22,1	7,40	787	128.84	18.54	33.97	4.05	398.73	0,0	81.23	10.71	0.34	0,00
	YSA-S	Yağmur suyu	16-29.09.2014	15,5*	7,84	15	4,03	0,19	0,22	0,29	15,25	0,0	0,41	0,25	0,00	0,00

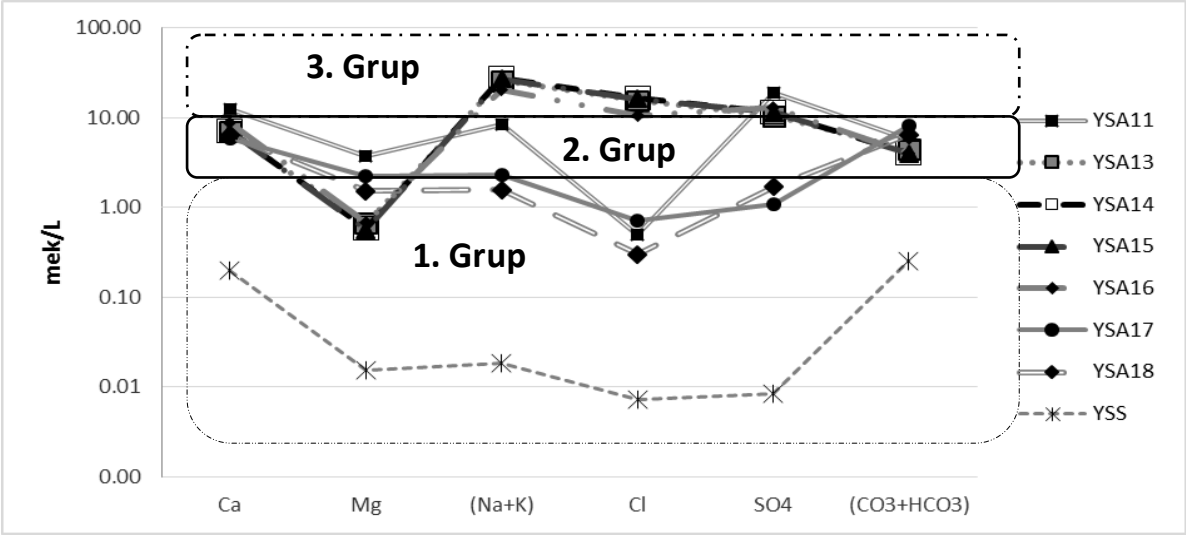
*Yozgat İli'ne ait (1954-2013) uzun yıllar eylül ayı sıcaklık ortalaması.

Çizelge 1'in devamı;

Saha	Örnek kodu	Örnekleme türü (açıklama)	T (°C)	Örnekleme tarihi	Derişim Li^{+} (ppm)	NH_4^{+} (ppm)	NO_2^{-} (ppm)	NO_3^{-} (ppm)	PO_4^{-3} (ppm)	SiO_2 (ppm)	B^{+3} (ppm)
Saraykent	YSA11	Kuyu (Ozan)	17.9	09.09.2014	0,03	0,95	0,00	0,00	0,00	15,95	<1,00
	YSA13	Kuyu	73.6	10.09.2014	0,92	1,37	0,00	0,00	0,00	131,52	2,37
	YSA14	Kuyu	68.0	10.09.2014	0,98	2,32	0,00	0,00	0,00	139,32	2,74
	YSA15	Kuyu	67.6	10.09.2014	0,98	0,86	0,00	0,00	0,00	129,00	3,38
	YSA16	Kuyu	48.2	10.09.2014	0,72	0,64	0,00	0,00	0,00	98,04	1,86
	YSA17	Akarsu	19.5	10.09.2014	0,01	0,22	21,67	9,02	0,75	26,81	<1,00
	YSA18	Çeşme	22.1	10.09.2014	0,02	0,10	0,00	16,36	0,00	55,61	<1,00
	YSA-S	Yağmur Suyu	15.5*	16-29.09.2014	0,00	0,50	0,02	0,61	0,00	**	**

*Yozgat İli'ne ait (1954-2013) uzun yıllar eylül ayı sıcaklık ortalaması, **Analizi yapılmayan verilerdir.

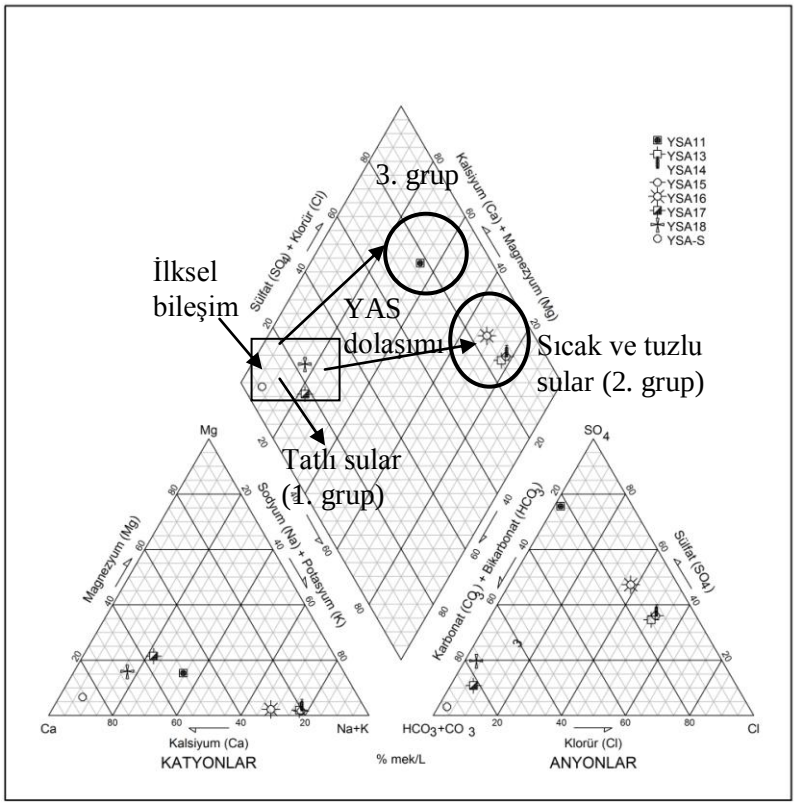
Piper Diyagram'ına göre inceleme alanında 3 farklı grupta su tipi görülmektedir (bkz Şekil 4). Saraykent yağmur suyu (YSA-S), soğuk su kaynakları ve akarsulardan alınan su örnekleri Piper Diyagramı'nda sol tarafta tatlı sular (1. Grup) kısmında toplanmaktadırlar. Bu sular Ca^{+2} ve HCO_3^- iyonlarınca zengin olan bölgede yer almakta olup bölgedeki sığ dolaşım sistemini yansıttığı düşünülmektedir. Sıcak ve mineralli su örnekleri (YSA13, YSA14, YSA15, YSA16) Piper Diyagramı'nın sağ tarafında tuzlu sular (2. Grup) kısmında toplanmış olduğu görülmektedir. Bu sular Na^+ ve K^+ iyonları ile SO_4^{-2} ve Cl^- iyonları ile zengin olan bölgede yer almakta olup derin dolaşım sistemini yansıttığı düşünülmektedir. Piper Diyagramı'nın orta kısmında ise tatlı su ile tuzlu suyun karışımı olduğu düşünülen karışım suyu (3. Grup) görülmektedir. Çizelge 1'de kirlilik göstergesi olan NH_4^+, NO_2^-, NO_3^- ve PO_4^{-3} iyon derişimleri YSA17 noktasındaki akarsuda görülmektedir. YSA18 nolu su noktasında ise yüksek NO_3^- iyon derişimi dikkati çekmektedir. Kuyu sularında (YSA11, YSA13, YSA14, YSA15, YSA16) ise kirlilik göstergesi olan NH_4^+ iyonuna rastlanılmıştır. Li^+ ve B^{+3} iyon derişimlerinin derin dolaşımlı jeotermal kuyu sularında (YSA13, YSA14, YSA15, YSA16) arttığı görülmektedir. B^{+3} iyonu sulara volkanitlerdeki veya Eosen yaşlı örtü birimlerdeki minerallerden yeraltı suyuna geçmiş olmalıdır.



Şekil 3. Çalışma sahasındaki 2014 Eylül dönemi su örnekleri analiz sonuçlarının Schoeller Diyagramı'nda gösterimi

Çizelge 2. Çalışma sahasındaki 2014 Eylül dönemi su örneklerinin iyon sıralaması

Saha	Örnek kodu	Açıklama	Katyon sıralaması (mek/L)	Anyon sıralaması (mek/L)	Su tipi
Saraykent	YSA11	Kuyu (Ozan)	$Ca^{+2}>Na^+ + K^+ > Mg^{+2}$	$SO_4^{-2}>HCO_3^- > Cl^-$	Ca^{+2}- SO_4^{-2}
	YSA13	Kuyu	$Na^+ + K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2}$	$Cl^- > SO_4^{-2} > HCO_3^-$	Na^+-Cl^-
	YSA14	Kuyu	$Na^+ + K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2}$	$Cl^- > SO_4^{-2} > HCO_3^-$	Na^+-Cl^-
	YSA15	Kuyu	$Na^+ + K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2}$	$Cl^- > SO_4^{-2} > HCO_3^-$	Na^+-Cl^-
	YSA16	Kuyu	$Na^+ + K^+ > Ca^{+2} > Mg^{+2}$	$SO_4^{-2} > Cl^- > HCO_3^-$	Na^+- SO_4^{-2}
	YSA17	Akarsu	$Ca^{+2} > Na^+ + K^+ > Mg^{+2}$	$HCO_3^- > SO_4^{-2} > Cl^-$	Ca^{+2}- HCO_3^-
	YSA18	Çeşme	$Ca^{+2} > Na^+ + K^+ > Mg^{+2}$	$HCO_3^- > SO_4^{-2} > Cl^-$	Ca^{+2}- HCO_3^-
	YSA-S	Yağmur Suyu	$Ca^{+2} > Na^+ + K^+ > Mg^{+2}$	$HCO_3^- > SO_4^{-2} > Cl^-$	Ca^{+2}- HCO_3^-



Şekil 4. Çalışma sahasındaki 2014 Eylül dönemi su örnekleri analiz sonuçlarının Piper Diyagramı'nda gösterimi.

Çizelge 2'de Ca^{+2}-HCO_3^-, Ca^{+2}-SO_4^{-2}, Na^+-SO_4^{-2} ve Na^+-Cl^- fasiyes grubunda olmak üzere 4 farklı su grubu ayırt edilmiştir. Ca^{+2}-HCO_3^- fasiyes grubunda; YSA-S yağmur suyu ile YSA17 ve YSA18 nolu su örnekleri görülmektedir. Bu gruptaki sular Piper Diyagramı'nda ve Schoeller Diyagramı'nda 1. grupta görülmektedir. Bu fasiyes grubu sığ dolaşımlı yeraltısularını gösterebilir veya sahadaki mermer ya da kireçtaşı etkileşiminden oluştuğu düşünülebilir. Ca^{+2}-SO_4^{-2} fasiyes grubunda; YSA11 nolu su örneği görülmektedir. Bu gruptaki sular Piper Diyagramı'nda ve Schoeller Diyagramı'nda 2. grupta görülmektedir. Sığ dolaşımlı yeraltı suyu ile derin dolaşımlı yeraltı suyunun karışımından etkilenerek oluşabileceği düşünülmekte ya da bölgede mermerlerden su alınması nedeniyle Ca^{+2} iyonunun kaynağını açıklamakta iken SO_4^{-2} iyonunun kaynağı ise sülfürlü minerallerin (pirit gibi) bozuşmasından da suya geçmiş olabilir. Na^+-SO_4^{-2} fasiyes grubunda; YSA16 nolu sıcak su örneği görülmektedir. Bu gruptaki sular Piper Diyagramı'nda 2. grupta, Schoeller Diyagramı'nda ise 3. grupta görülmektedir. YSA16 nolu sıcak su örneğinin derin dolaşımlı yeraltısuyu olabileceği düşünülmektedir. Na^+-Cl^- fasiyes grubunda; YSA13, YSA14, YSA15 nolu sıcak su örneği görülmektedir. Bu gruptaki sular Piper Diyagramı'nda 2. grupta, Schoeller Diyagramı'nda ise 3. grupta görülmektedir. YSA13, YSA14, YSA15 nolu sıcak su örneklerinin derin dolaşımlı yeraltı suları olabileceği düşünülmektedir.

3.2. Doygunluk İndisi (SI) Hesaplamaları

PhreeqC (Parkhurst ve Appelo, 2013) programı ile yapılan doygunluk hesaplamasıyla oluşturulan doygunluk indisi diyagramında sahadaki kayaç litolojileri de dikkate alınarak minerallerin su örnekleme noktalarında kalsedon ve kuvarsa doygun; kalsit, aragonit, dolomit ve talka çoğu örnekleme noktalarında doygun oldukları belirlenmiştir. Bu durum, suların dolaşım süreleri boyunca metamorfitlere ait mermerler ve volkanitler ile uzun süre temas ettiği düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, yüzeye çıkan sıcak suların kabuk yapıcı özellikte oldukları da belirlenmiştir. Ayrıca, anhidrit, jips, halit ve silvin minerallerini ise çözme eğiliminde oldukları da belirlenmiştir.

3.3. Jeotermometre Uygulamaları

Saraykent (Yozgat) jeotermal sularının muhtemel rezervuar sıcaklıkları, bu suların kimyasal analiz sonuçlarından yararlanılarak katyon ve silis jeotermometre eşitlikleriyle tahmin edilmeye çalışılmıştır (Çizelge 3 ve Çizelge 4).

Çizelge 3. Saraykent jeotermal sularının katyon jeotermometreleriyle hesaplanan muhtemel rezervuar sıcaklıkları (ºC).

	1	2	3	4	5	6	7	8 (β=4/3)
YSA13	159	164	167	194	194	181	210	129
YSA14	162	167	170	196	196	183	213	133
YSA15	160	166	169	195	195	182	211	132
YSA16	144	149	154	183	182	169	199	104

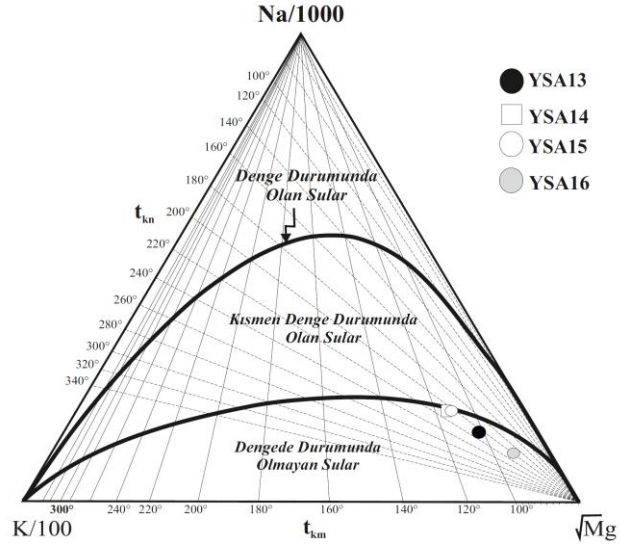
1. Truesdell (1976), 2. Tonani (1980), 3. Arnórsson et al. (1983), 4. Arnórsson et al. (1983), 5. Fournier (1979), 6. Nieva and Nieva (1987), 7. Giggenbach (1988), 8. Fournier and Truesdell (1973).

Çizelge 4. Saraykent jeotermal sularının silis jeotermometreleriyle hesaplanan muhtemel rezervuar sıcaklıkları (ºC).

	1	2	3	4	5	6
YSA13	153	153	146	142	128	125
YSA14	157	157	149	146	132	129
YSA15	152	152	145	141	127	124
YSA16	136	136	132	124	109	108

1. Fournier and Potter (1982), 2. Fournier (1977), 3. Fournier (1977), 4. D'Amore and Arnórsson (2000), 5. Fournier (1977), 6. Arnórsson et al. (1983).

Burada, muhtemel rezervuar sıcaklığı katyon jeotermometreleriyle 104-213 ºC hesaplanmışken, silis jeotermometreleriyle 108-157°C olarak hesaplanmıştır. Giggenbach (1988) diyagramına göre sıcak ve mineralli sular denge durumunda olmayan veya kısmen denge durumunda olduğundan katyon jeotermometreleri ile hesaplanan değerler dikkate alınmamıştır (bkz Şekil 5). Bu nedenle, silis jeotermometreleriyle hesaplanan değerler muhtemel rezervuar sıcaklığı olarak daha uygun görülmektedir.



Şekil 5. Saraykent sıcak ve mineralli sularının Giggenbach (1988) diyagramındaki konumları.

4. SONUÇLAR

Yapılan hidrojeokimyasal analiz ve değerlendirmelere göre Saraykent jeotermal kaynaklarında suların aynı kökene sahip oldukları belirlenmiştir. Na^+-Cl^- ve Na^+-SO_4^{-2} tipi sular sınıfına girmeleri ise bu kaynakların derin dolaşımlı sular olduğunu göstermektedir.

Saraykent jeotermal sularında aragonit, kalsit, dolomit, kuvars, kalsedon ve talk minerallerine doygun olduğundan bu mineralleri çökeltme eğilimi belirlendiğinden kabuk yapıcı oldukları ve anhidrit, jips, halit, silvin minerallerini ise çözme eğiliminde oldukları görülmektedir. Bu duruma göre suların dolaşım süreleri boyunca metamorfitlere ait mermerler ve volkanitler ile uzun süre temas ettiği de düşünülmektedir.

Saraykent jeotermal sularının akışkan sıcaklıkları 48,2-73,6°C arasında değişmektedir. Silis jeotermometreleriyle muhtemel rezervuar sıcaklığı 108-157°C aralığında olabileceği hesaplanmıştır.

5. KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nin devam eden 014D09602007 nolu projesi olarak desteklenmektedir. Yazarlar, Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, Su Kimyası Laboratuvarı çalışanlarına, raporlarından yararlanılan MTA Genel Müdürlüğü'ne, Yozgat Valiliği'ne ve Saraykent Kaymakamlığı'na teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

Akçay, A. E., Dönmez, M., Kara, H., Yergök, A.F., Esentürk, K., 2008. 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Yozgat İ-35 paftası, No. 81, MTA. Ankara.

Arnnórsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47, 567-577.

Burçak, M., Yücel, B., Küçük, M., Akın, U., 2002. Yozgat-Saraykent (Karamağara) jeotermal sahasının hidrotermal alterasyonu. I. Orta Anadolu Jeotermal Enerji ve Çevre Sempozyumu, Niğde Üniversitesi, Aksaray.

Dalkılıç, H., Dönmez, M., Akçay, A.E., 2008. 1/100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Yozgat İ-35 paftası. No. 82, MTA. Ankara.

D'Amore F., Arnórsson, S., 2000. Geothermometry, isotopic and chemical techiques in geothermal exploration, development and use. IAEA, Vienna. pp.152-199.

Fournier, R.O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics, 5, 41-50.

Fournier, R.O., 1979. A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Resources Council Transactions, 3, 221-224.

Fournier, R.O., Potter, R.W., 1982. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geothermal Research Council Bulletin, 11, 3-9.

Fournier, R.O., Truesdell, A.H., 1973. An emprical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37, 1255-1275.

Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria, derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55, 2749-2765.

Nieva, D., Nieva, R., 1987. Development in geothermal energy in Mexico, part 12-A cationic composition geothermometer for prospecting of geothermal resources. Heat recovery systems and CHP, 7, 243-258.

Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 6(A43), 497.

Şimşek, Ş., 1993. Isotope survey of geothermal systems of Central Anatolia. Hacettepe University International Research and Application Center for Karst Water Resources. Ankara.

Tonani, F., 1980. Some remarks on the application of geochemical techniques in geothermal exploration. Adv. Eur. Geoth. Res. Second Symp., Strasbourg.

Truesdell, A.H., 1976. Summary of section III geochemical techniques in exploration. Proc. of Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, U.S. Gov. Print. Office, pp. 53-79.

Adana Ceyhan Civarındaki Düşük Sıcaklıklı Jeotermal Alanların İncelenmesi

Investigation of Low-Temperatured Geothermal Fields Nearby Adana Ceyhan

Ü. Turalı[1*], A. Yolal[1], L. Taşkıran[1]

[1] *MTA Genel Müdürlüğü Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi 06800 Çankaya-Ankara (*unsal.turali@mta.gov.tr)*

ÖZ : İnceleme alanı Adana ili Ceyhan ilçesi civarında 132 km^2'lik bir alandır. Sahada sıcaklıkları 20-28,8 °C arasında değişen kaynak ve sığ kuyular yer almaktadır. Çalışma alanı içinde Misis istifine ait Dokuztekne, Andırın ve Karataş formasyonları yüzeylemektedir. Tüm bu birimler Kuvaterner yaşlı Delihalil bazaltı, kaliş ve alüvyon çökelleri tarafından örtülmektedir. Çalışma alanı kuzeydoğusunda Dokuztekne formasyonu, Karataş formasyonu üzerinde bindirmeli olarak izlenmektedir. Bölgedeki en önemli kırık hattı Yumurtalık Fayı adını verilen, Misis İstifi ile Kızıldere formasyonu arasında izlenen sol yönlü doğrultu atımlı ters (oblik) faydır. Çalışma alanında jeotermal sistemi oluşturan ana unsur derin tektonik hatlardır. Amanoslar ve Toroslar arasında kalan Misis-Andırın tektonik birliği kuzeybatıda sol yönlü Misis Fayı ve güneydoğuda yine sol yönlü Karataş ve Yumurtalık fayları arasında bir basınç sırtı olarak yükselmektedir. Bu yükselimi oluşturan derin faylar yeraltı suyunun derinlere süzülerek gradyanla ısınıp, ısınan akışkanın yoğunluk farkıyla yükselmesine aracılık ederler. Örneklenen sular genel olarak Ca, Mg, HCO_3 ve Na ve Cl bileşimidir.

Anahtar kelimeler: Adana, Ceyhan, Jeotermal, Hidrojeokimya, Tektonik.

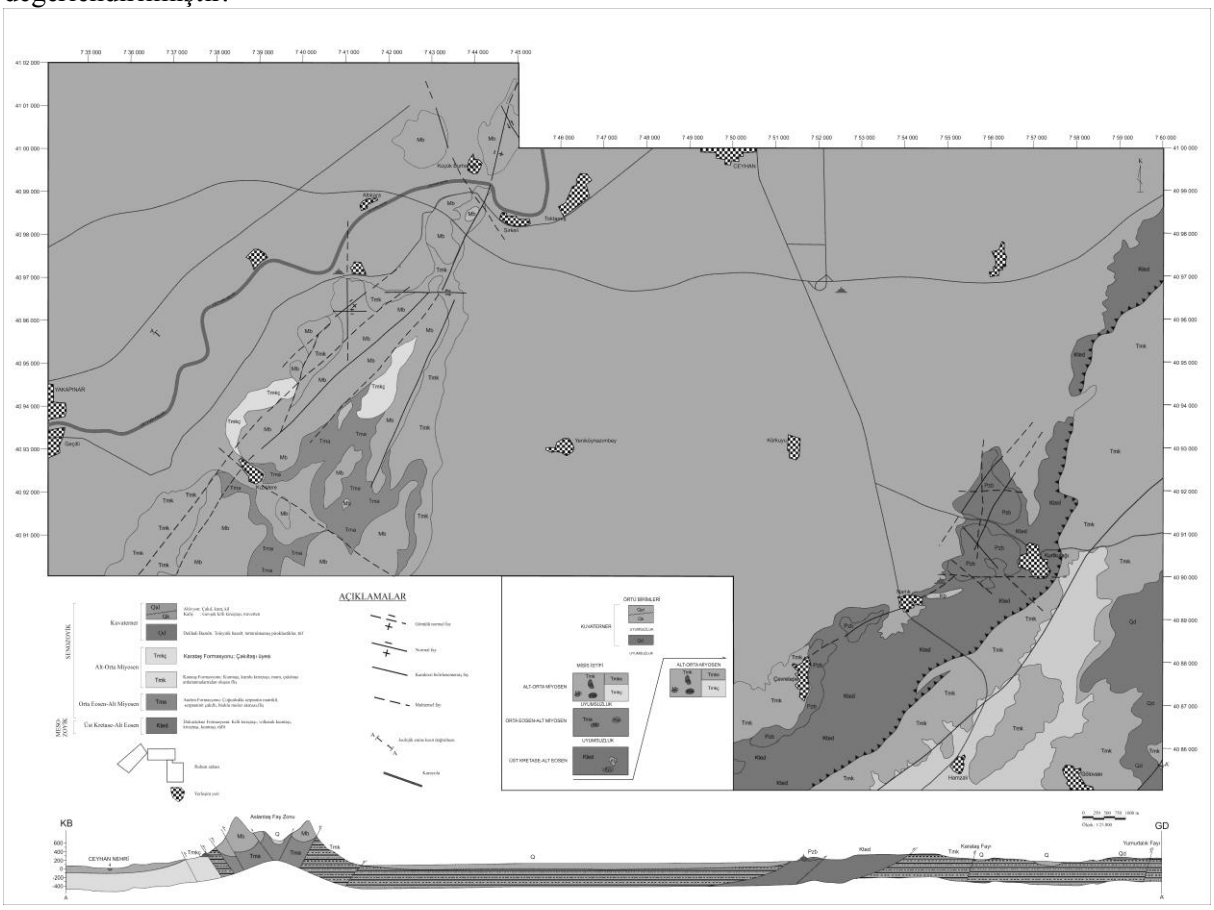
ABSTRACT : *The study area has an area of 132 km^2 nearby Adana Ceyhan district. Field water temperature in sampled springs and shallow wells varies between 20,0-28,8 °C. . Dokuztekne, Andırın and Karataş formations of Misis Group are crop out in the study area. All these units are covered by Quaternary aged Delihalil basalts, caliche and alluvium. At northeast of the site, Karataş formation is overthrusted by Dokuztekne formation. The most important fault, known as theYumurtalık Fault, is a left strike-slip reverse (oblique) fault identified at the contact between Misis group and Kızıldere formations. Deep tectonic lines are the main structure that forms the geothermal system. Misis-Andırın tectonic units are risen up as a ridge of pressure between Misis left strike-slip fault at northwest with Karataş and Yumurtalık left strike-slip faults at southeast. These deep lineaments allowgroundwater to infiltrate to great depths of the basin, heats up due to thermal gradient and rises again owing to the density difference. Sampled waters generally has the composition of calcium, magnesium bicarbonate and sodium chloride.*

Keywords: *Adana, Ceyhan, Geothermal, Hydrogeochemistry, Tectonics.*

1. GİRİŞ

Çalışma alanları Adana ili Ceyhan ilçesinin 3 km güneyi, 18 km güneybatısı, 16 km güneydoğusunda yer alan Çukurova içerisindeki birbirine komşu 3 adet jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve civarını kapsamaktadır (Şekil 1). Bu çalışmalar kapsamında; MTA Genel Müdürlüğü'ne ait jeotermal kaynak arama ruhsat sahalarının jeotermal potansiyelinin ortaya konması amaçlanarak, 2014 yılında sahalarda detay jeoloji-hidrojeoloji ve jeofizik etütler, su kimyası çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Jeotermal kaynak arama ruhsat sahaları, 1/25.000 ölçekli KOZAN N35 c4-d3, MERSİN O35 a2-b1-b2 paftalarında yer almaktadır. Proje çalışmaları kapsamında yaklaşık 132 km^2'lik ruhsat alanlarını ve civarını kapsayan bölgenin 1/25.000 ölçekli jeotermal jeoloji haritası önceki çalışmalardan da yararlanılarak yeniden çizilmiştir. Sahalar ve civarlarındaki soğuk-sıcak su kaynak ve kuyularının yerleri tespit edilerek 38 adet kuyu ve kaynakta kaynak başı analiz gerçekleştirilmiş ve 13 tanesinden kimyasal analiz amaçlı su numunesi alınarak MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında analizleri

yaptırılmıştır. Suların kimyasal analiz sonuçlarının değerlendirmesi ise çeşitli diyagramlarla yapılarak sıcak suların kökeni araştırılmış, özellikleri ortaya konmaya çalışılmıştır. Jeofizik etütler kapsamında Schlumberger elektrot dizilimi ile toplam 87 noktada jeofizik düşey elektrik sondaj (DES) ölçüsü alınmıştır. Jeofizik çalışmalar kapsamında ayrıca 50 m nokta aralığı ile uygun görülen doğrultularda 10 km türev kaydırma tekniği ile doğal potansiyel (SP) ölçüsü alınmıştır. Jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen veriler, görünür eş rezistivite seviye haritaları, görünür eş rezistivite ve jeoelektrik yapı kesitleri, jeoelektrik temel derinlik haritaları ve SP profili türev grafikleri oluşturulmak suretiyle değerlendirilmiştir.



Şekil 1- Çalışma alanı ve civarının jeoloji haritası (MTA 2013'den değiştirilerek alınmıştır).

2. JEOLOJİ

2.1. Stratigrafi

Adana ili, Ceyhan ilçesi sınırlarında bulunan 3 adet jeotermal kaynak arama ruhsat sahasının da içinde yer aldığı çalışma alanı ve civarında esas olarak Misis istifi yer almaktadır. Misis istifinde; en altta Üst Kretase-Alt Eosen yaşlı, volkanosedimanter bir istifle başlayan, Paleozoyik, Mesozoyik mermer blokları içeren Dokuztekne Formasyonu yer almaktadır. Dokuztekne Formasyonu üzerine; Orta Eosen-Alt Miyosen yaşlı, fliş karakterli Andırın Formasyonu uyumsuzluk ile gelir. Andırın Formasyonu yine kendisi gibi fliş karakterli, Alt-Orta Miyosen yaşlı Karataş Formasyonu tarafından uyumsuzluk ile örtülür (Şekil 1). Karataş Formasyonu üzerinde ise Karataş Formasyonu'nun çakıltaşı üyesi yer almaktadır. Kuvaterner yaşlı volkanizma ürünü olan Delihalil bazaltı kendinden yaşlı birimleri kesen ve Yumurtalık Fayı boyunca yükselip yüzeye ulaşan bir yarık volkanizması ürünüdür ve yayılım gösterdiği yerlerde Kuvaterner öncesi tüm birimleri üzerlemektedir. Yine Kuvaterner yaşlı Kaliş ve Alüvyon çökelleri Misis tepelerinin yamaçlarından başlayıp tüm ovayı kaplayacak şekilde kendinden yaşlı olan birimleri üzerler (MTA, 2013)

2.2. Tektonik

Çalışma alanı Türkiye'nin önemli tektonik bölgelerinin biri olan .Misis-Andırın tektonik birliğinde.? yer almaktadır. Çalışma alanında izlenen birimler K-KD'ya doğru daha geniş yüzeylemeler vererek devam etmektedir. Çalışılan bölgedeki jeolojik yapı bu yörelerden de elde edilen verilerin ışığında yorumlanmıştır. Kozan-Feke-Saimbeyli yörelerindeki Toros Birlikleri ile Amanos Dağları'nın B-KB yöresi arasında kalan formasyonlar günümüze kadar gelen sıkışma tektoniğinin etkisinde kalmış ve bugünkü konumlarını kazanmışlardır. Sıkışma tektoniğinin kanıtları Eosen'de başlamakta, Miyosen'de devam etmekte ve Üst Miyosen (Tortoniyen) sonrasında bölgenin ana hatları belirginleşmektedir (Bilgin, 1981). Çalışma alanı kuzeydoğusunda Doruk-Selimiye köyleri dolayında Dokuztekne Formasyonu Karataş Formasyonu üzerinde bindirmeli olarak izlenmektedir. Bölgedeki en önemli kırık hattı Yumurtalık Fayı adı verilen, Misis İstifi ile Kızıldere Formasyonu arasında izlenen faydır. Bu fay güneyde Yumurtalık ilçesi dolayında, KD'da Gaziantep-N36b2 paftasına kadar yüksek açılı ters fay olarak izlenmiştir. Her ne kadar kuzey bloğu yükselmiş olarak gözlenmiş olsa da, sol yönlü doğrultu bileşeni de mevcuttur. Tortoniyen sonunda günümüzdeki konumunu kazanan Yumurtalık Fayı'nı kullanarak Kuvaterner evresinde bazaltik volkanizma oluşmuştur. Güneybatıda Karataş ilçesi dolayında izlenmeye başlayan, çalışma alanının güneydoğusunu boydan boya kat ederek, Delihalil yöresinde sönümlenen ve sadece Karataş Formasyonu'nu etkileyen Karataş fayı da bir başka yüksek açılı ters fay olarak çalışma alanında gözlenmiştir (MTA, 2013).

3. JEOTERMAL SİSTEM

Çalışma alanında jeotermal sistemi oluşturan ana unsur derin tektonik hatlardır. Amanoslar ve Toroslar arasında kalan Misis-Andırın tektonik birliği kuzeybatıda sol yönlü Misis Fayı ve güneydoğuda yine sol yönlü Karataş ve Yumurtalık fayları arasında bir basınç sırtı olarak yükselirken bu yükselimi oluşturan derin faylar yeraltı suyunun derinlere süzülerek jeotermal gradyana bağlı ısınmasına ve ısınan akışkanın yoğunluk farkından dolayı yükselmesine aracılık ederler (Şekil 1). Jeotermal sistemin örtü kayacını Kuvaterner yaşlı alüvyon ve kaliş birimleri ile Miyosen yaşlı Karataş Formasyonu'nun killi ve marnlı seviyeleri oluşturmaktadır. Sistemin rezervuar kayacını ise Dokuztekne Formasyonu'nun manganez cevherleşmelerinin de görüldüğü mikritik kireçtaşları, Volkano-sedimanter istifin üst düzeylerinde yer alan spilitik aglomeralar, bu düzeylerin içerisine allokton olarak çok büyük boyutta olasılı Paleozoyik yaşlı rekristalize kireçtaşı blokları, Andırın ve Karataş Formasyonu'nun kireçtaşı seviyeleri Paleozoyik ve Mesozoyik kireçtaşı bloklarının oluşturduğu düşünülmektedir.

3.1. Sıcak Su Kaynakları

Çalışma alanında, jeotermal su kullanımına yönelik bir faaliyet olmamakla birlikte, 1/25.000 ölçekli Mersin N35 c3-d4, O35 a2-b1-b2 paftalarında yer alan jeotermal kaynak arama ruhsatları içerisinde, içme ve sulama amaçlı açılmış 107 m derinliğe kadar olan kuyu ve kaynaklarda 28,8 °C'ye kadar sıcaklıklar ölçülmüştür. Bölgede çalışma alanına en yakın bilinen jeotermal kaynak; ruhsat sahalarının yaklaşık 35 km doğusunda bulunan ve 32 °C sıcaklığı olan Hatay-Erzin Başlamış kaplıcalarıdır.

4. SU KİMYASI ÇALIŞMALARI

Arazi çalışmaları kapsamında sahada 38 adet kaynak ve kuyudan yerinde fiziksel ölçümler yapılmış. Bu kaynak ve kuyuların 14 tanesinden tam kimyasal analiz için korumalı ve korumasız olarak örnekler alınmıştır. Alınmış bu 14 adet numunenin, analizleri 09.12.2014-11.12.2014 tarihleri arasında yapılmış olan 11 tanesinde K^+ değerleri; belirlenebilir limit değerin altında kaldığı için ölçümleri yapılamamıştır.

4.1. Kimyasal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Proje çalışmaları sırasında Ceyhan ilçesi sınırları içerisinde kalan Çokçapınar jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 19,7 °C ile 23,2 °C arasında değişen 7 adet kaynak ve kuyu, Çiftlikat jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 19,8 °C ile 23,8 °C arasında olan 3 adet kuyu ve Narlık jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 21,8 °C ve 28,8 °C olan 2 adet kuyu tespit edilmiş ve kimyasal analizleri yapılmak üzere bu sulardan korumalı ve korumasız olarak örnek alınmıştır. Koruma prosedürü pH<2 olacak şekilde numunelere nitrik asit (HNO_3) eklenerek yapılmıştır.

4.1.1. Suların sınıflandırılması

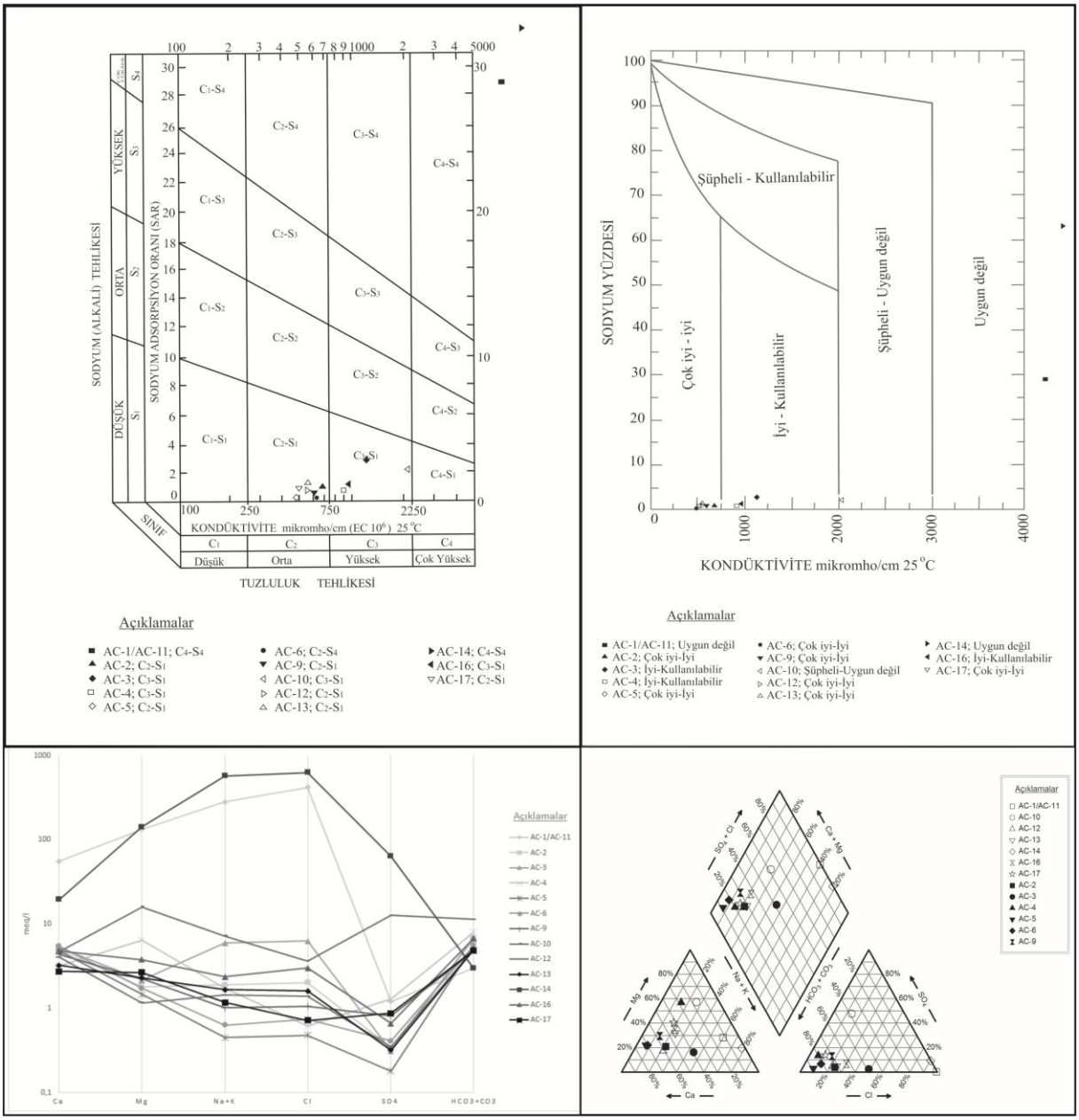
Bu üç sahada yapılan ölçüm ve örnekleme çalışmalarına göre, birlikte değerlendirilen bu 14 örneğin 1 tanesinde (AC-17) sıcaklık ölçümü yapılamamış; 3 tanesinin (AC-4, AC-6 ve AC-16) sıcaklığının ise 20 °C'nin altında olduğu belirlenmiş ve soğuk su olarak sınıflandırılmıştır. AC-4 kodlu Sirkeli ALPET kuyusu magnezyumlu, kalsiyumlu ve bikarbonatlı soğuk su; AC-6 kodlu Haraminin kuyusu kaynağı kalsiyumlu, magnezyumlu ve bikarbonatlı soğuk su; AC-16 kodlu Çakaldere Köyü kuyusu ise kalsiyumlu, magnezyumlu, sodyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü soğuk su olarak nitelendirilmiştir.
Analizi yapılan su numunelerinden 6 tanesi ise mineralce fakir sıcak su olarak sınıflandırılmıştır. Bu örneklerden AC-2 kodlu Çokçapınar kaynağı kalsiyumlu, sodyumlu, magnezyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü akroterm su; AC-3 kodlu Çokçapınar havuzu sodyumlu, kalsiyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü akroterm su; AC-5 kodlu Ağaçpınar kaynağı ve AC-9 kodlu Vişne Madencilik kuyusu kalsiyumlu, magnezyumlu ve bikarbonatlı akroterm su; AC-12 kodlu Narlık içme suyu kuyusu kalsiyumlu, sodyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü akroterm su; AC-13 kodlu Narlık Ilıkpınar kuyusu ise kalsiyumlu, magnezyumlu, sodyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü akroterm su olarak adlandırılmıştır.

4.1.2. Yarı logaritmik Schoeller diyagramı ile yapılan değerlendirmeler

Kimyasal analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre çizilen yarı logaritmik Schoeller diyagramı incelendiğinde, AC-1/AC-11 kodlu Ceyhan otoban gişeler kuyusu ile AC-14 kodlu deniz suyu örneklerinin kökenlerinin aynı olduğu ve Na+K ve Cl iyonlarınca zengin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla AC-1/AC-11 kodlu gişeler kuyusundan alınan suyun kökeninin deniz suyu olduğu; bölgenin ise olası eski lagün ortamı olduğu düşünülmektedir. AC-10 kodlu Yumurtalık yolu Petrol Ofisi numunesi ise AC-4 kodlu Sirkeli ALPET kuyusuna benzer nitelikte Mg ve HCO_3 bakımından görece zengin sulardır. Fakat AC-4 numunesinin yüzey sularından daha fazla etkilenerek seyreldiği düşünülmektedir. AC-2, AC-3, AC-5, AC-6, AC-9, AC-12, AC-13, AC-16 ve AC-17 kodlu numuneler ise genel olarak Ca ve HCO_3 bakımından zengin olmakla birlikte SO_4 bakımından fakirdirler (Şekil 2).

4.1.3. Piper diyagramı ile yapılan değerlendirmeler

Analiz sonuçlarına göre çizilen Piper diyagramına göre AC-2, AC-4, AC-5, AC-6, AC-9, AC-12, AC-13, AC-16 ve AC-17 kodlu örnekler karbonatlı ve sülfatlı (Ca+Mg>Na+K), zayıf asit kökleri daha baskın (HCO_3+CO_3>$Cl+SO_4$) ve karbonat sertliği karbonat olmayan sertliğinden yüksek (%50'den fazla) $CaCO_3$ ve $MgCO_3$'lü sular sınıfına girmektedir. AC-3 ve AC-10 kodlu örneklerin karbonatlı ve sülfatlı (Ca+Mg>Na+K), güçlü asit kökleri daha baskın ($Cl+SO_4$>HCO_3+CO_3) ve iyonlarının hiçbiri %50'yi geçmeyen karışık bileşimli sular sınıfında oldukları belirlenmiştir. AC-1 ve AC-14 kodlu örnekler ise tuzlu ve sodalı (Na+K>Ca+Mg), güçlü asit kökleri daha baskın ($Cl+SO_4$>HCO_3+CO_3) ve karbonat olmayan alkalinitenin karbonat alkalinitesinden yüksek olduğu (%50'den fazla), NaCl, $NaSO_4$ ve KCl'li sular sınıfındadır. Numunede alkaliler ve güçlü asitler egemendir (Deniz ve çok acı sular gibi) (bkz Şekil 2).



Şekil 2- Adana ili Ceyhan ilçesi Çokçapınar, Çiftlikat ve Narlık ruhsat sahalarından alınan su numunelerine ait yarı logaritmik Schoeller, Piper Langelier kalsiyum denge, Wilcox, ABD tuzluluk diyagramı.

4.1.4. Langelier kalsiyum denge diyagramı ile yapılan değerlendirmeler

Örnekler Langelier kalsiyum denge diyagramına işlenerek değerlendirilmiş ve tüm örneklere ait sularının I değerlerinin 0,1'den büyük olduğu, dolayısı ile tümünün kireçlendirici özellikte olduğu belirlenmiştir.

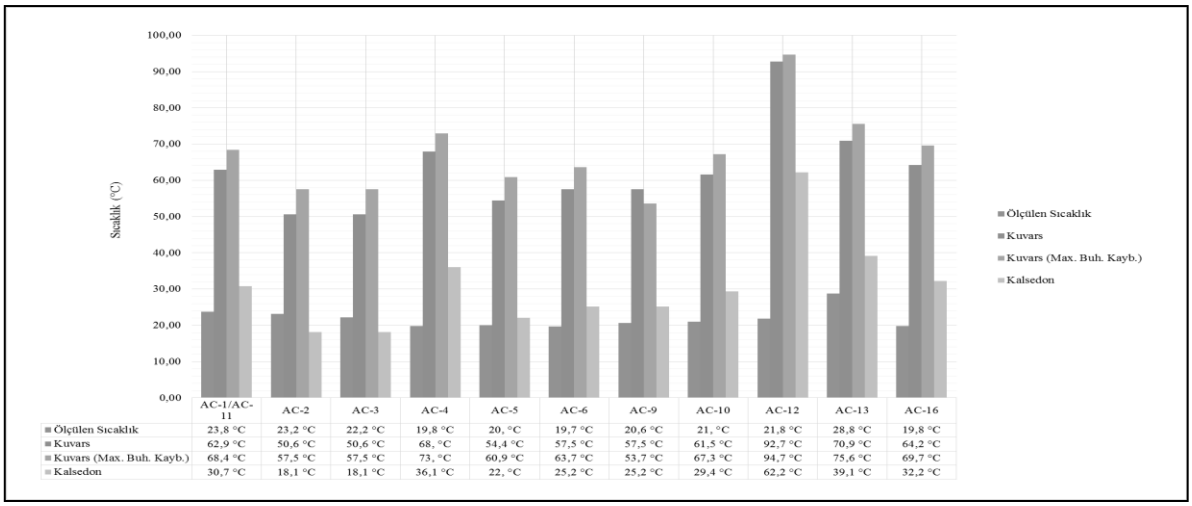
4.1.5. Wilcox ve ABD tuzluluk diyagramları ile yapılan değerlendirmeler

Bu suların sulama suyu olarak kullanılabilirliği Wilcox ve ABD tuzluluk diyagramları kullanılarak incelenmiştir (bkz Şekil 2). AC-2, AC-5, AC-9, AC-12, AC-13 ve AC-17 kodlu numunelere ait sular Wilcox diyagramına göre sulama için çok iyi-iyi sınıfında; ABD tuzluluk diyagramına göre ise tuzluluk tehlikesi orta, sodyum (Alkali) tehlikesi düşük (C_2-S_1) çıkmıştır. AC-3, AC-4 ve AC-16 kodlu

numunelere ait sular Wilcox diyagramına göre iyi-kullanılabilir sınıfında; ABD tuzluluk diyagramına göre ise tuzluluk tehlikesi yüksek, sodyum (Alkali) tehlikesi düşük (C_3-S_1) çıkmıştır. AC-10 kodlu numune Wilcox diyagramına göre şüpheli-uygun değil sınıfında; ABD tuzluluk diyagramına göre tuzluluk tehlikesi yüksek, sodyum (Alkali) tehlikesi düşük (C_3-S_1) çıkmıştır. AC-6 kodlu numuneye ait su Wilcox diyagramına göre sulama için çok iyi-iyi sınıfında; ABD tuzluluk diyagramına göre ise tuzluluk tehlikesi orta, sodyum (Alkali) tehlikesi çok yüksek (C_2-S_4) çıkmıştır. AC-1/AC-11 ve AC-14 kodlu numunelere ait sular ise Wilcox diyagramına göre sulamaya uygun değil sınıfında; ABD tuzluluk diyagramına göre ise tuzluluk ve sodyum (Alkali) tehlikeleri çok yüksek (C_2-S_4) çıkmıştır.

4.1.6. Jeotermometre hesaplamaları

Çalışma alanından derlenen örneklerin kimyasal analiz sonuçlarına göre jeotermometre hesapları yapılmış olup, bu hesaplamalar sonucunda kuvars jeotermometresi 50,6-92,7 °C, maksimum buhar kaybı ile kuvars jeotermometresi 53,7-94,7 °C, kalsedon jeotermometresi ise 18,1-62,2 °C, arasında rezervuar sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 3).
Sahada jeotermometre hesaplamalarının doğrulamasının yapılabileceği herhangi bir sıcak su kuyusu veya kaynağı bulunmamaktadır. Fakat bölgenin yapısı ve civarındaki diğer iller de dahil olmak üzere sıcak su potansiyeli düşünüldüğünde kalsedon jeotermometresinin hem saha geneline hem de yerinde yapılan sıcaklık ölçümlerine daha uyumlu olduğu düşünülmektedir.



	AC-1/AC-11	AC-2	AC-3	AC-4	AC-5	AC-6	AC-9	AC-10	AC-12	AC-13	AC-16
Ölçülen Sıcaklık	23,8 °C	23,2 °C	22,2 °C	19,8 °C	20, °C	19,7 °C	20,6 °C	21, °C	21,8 °C	28,8 °C	19,8 °C
Kuvars	62,9 °C	50,6 °C	50,6 °C	68, °C	54,4 °C	57,5 °C	57,5 °C	61,5 °C	92,7 °C	70,9 °C	64,2 °C
Kuvars (Max. Buh. Kayb.)	68,4 °C	57,5 °C	57,5 °C	73, °C	60,9 °C	63,7 °C	53,7 °C	67,3 °C	94,7 °C	75,6 °C	69,7 °C
Kalsedon	30,7 °C	18,1 °C	18,1 °C	36,1 °C	22, °C	25,2 °C	25,2 °C	29,4 °C	62,2 °C	39,1 °C	32,2 °C

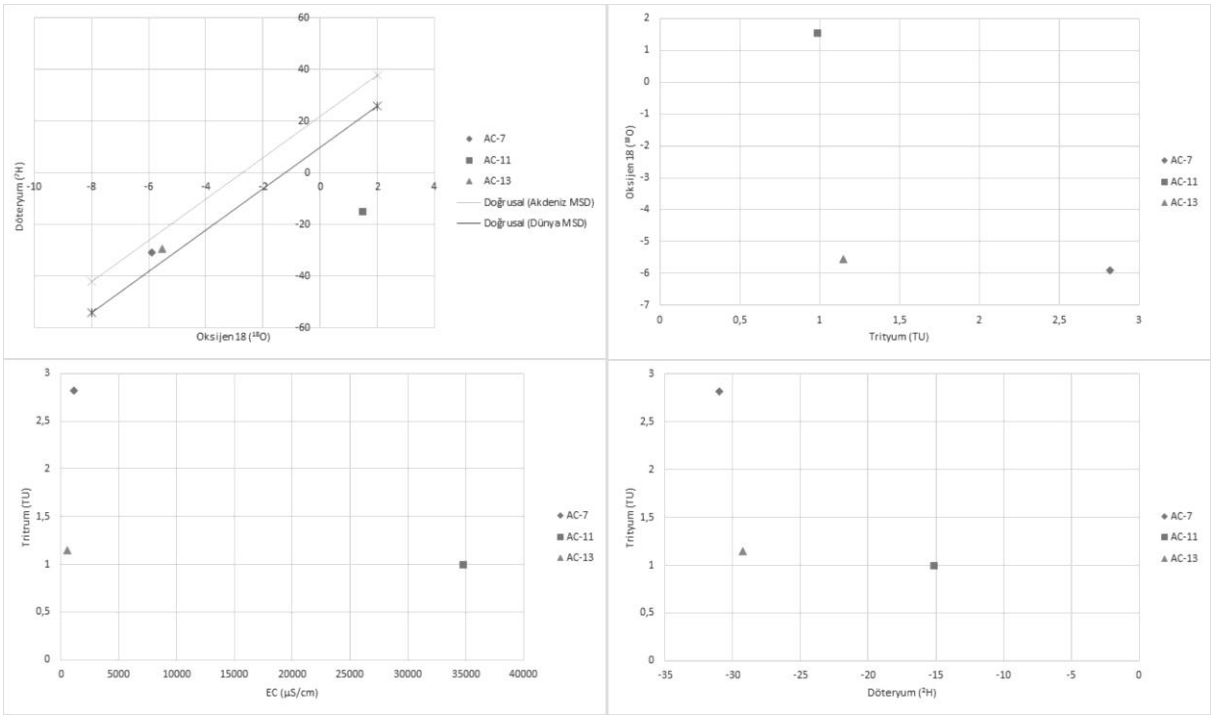
Şekil 3- Adana ili Ceyhan ilçesi Çokçapınar, Çiftlikat ve Narlık ruhsat sahalarından alınan su numunelerine ait jeotermometre diyagramı.

4.1.7. İzotop sonuçlarının değerlendirilmesi

Arazi çalışmaları sırasında 22,2 °C sıcaklıklı Çokçapınar kaynağı (AC-7), 23,8 °C sıcaklıklı Ceyhan otoban gişeleri kuyusu (AC-11) ve 28,8 °C sıcaklıklı Narlık kuyusu (AC-13) olmak üzere 3 adet izotop numunesi alınmıştır. ^{18}O, ^{2}H ve ^{3}H analizleri DSİ Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı bünyesindeki İzotop Laboratuvarı Şube Müdürlüğü'nde yaptırılmıştır.
İzotop analizi sonuçlarına göre çizdirilen $\delta^{2}H$- $\delta^{18}O$ grafiğine göre AC-7 ve AC-13 örneklerinin Dünya ve Akdeniz meteorik su doğrularına paralellik gösterdiği, bu iki doğrudan sapmasının ise kayaç-su ilişkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. AC-11 örneğinin ise yüzeyden buharlaşmaya uğradığı yorumlanmıştır (Şekil 4).

Yağışı meydana getiren atmosferik su buharının ^{18}O ve ^{2}H içeriği coğrafi konum, enlem vb. etkiler altında yükselti ile ters orantılı olarak değişmektedir. Yükselti etkisi olarak adlandırılan bu etki aslında yükseklikle beraber sıcaklığın da azalmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak her 100 m'lik yükseklik artışına karşılık ^{18}O içeriğindeki azalma ‰ 0.15 ile ‰ 0.50 arasında değişirken, ^{2}H için bu

değer ‰ 1,0 ile ‰ 4.0 arasında değişmektedir (Clark and Fritz, 1997). Şekil 4'te görülen ^{18}O -^{2}H grafiğine göre AC-7 ve AC-13 kaynakları AC-11 kaynağına göre daha yüksek bir kottan beslenmektedir. Analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre çizilen EC-Trityum (Şekil 4), $\delta^{2}H$-Trityum (Şekil 4) ve Trityum-$\delta^{18}O$ (Şekil 4) grafikleri birlikte incelendiklerinde AC-7 örneğinin görece yüksek Trityum ve düşük EC ve düşük $\delta^{2}H$ değerleri ile tipik bir yüksek kottan beslenen sığ dolaşımlı su örneği vermektedir



Şekil 4- Adana Ceyhan ruhsat sahalarından alınan izotop örneklerine ait Döteryum (^{2}H)-Oksijen 18 (^{18}O), Trityum-EC, Trityum-Döteryum (^{2}H), Oksijen-18 (^{18}O)- Trityum grafiği.

AC-11 örneği düşük Trityum değerleri ve yüksek EC ve$\delta^{2}H$ derin dolaşım ve düşük kottan beslenim özellikleri göstermektedir. $\delta^{18}O$ değerindeki artış ise yüzeyden buharlaşma ve/veya deniz suyu karışımını işaret etmektedir. AC-13 örneğinin ise tüm grafikler birlikte incelendiğinde yüzey sularının karışımına uğramış AC-7 ve AC-11 örneklerinin beslenim kotları arasında kalan bir noktadan beslenen derin dolaşımlı bir su olduğu değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR

Çalışma alanlarında jeotermal su kullanımına yönelik bir faaliyet olmamakla birlikte soğuk su temini için açılmış 107 m derinliğe kadar olan kuyularda 28,8 ^{o}C'ye kadar sıcaklıklar ölçülmüştür. Çalışma alanına en yakın bilinen sıcak su kaynağı MTA Genel Müdürlüğü'ne ait jeotermal kaynak arama ruhsatlarının yaklaşık 40 km batısında yer alan ve sıcaklığı 32 ^{o}C olan Hatay-Erzin-Başlamış kaplıcalarıdır.

Proje çalışmaları sırasında Ceyhan ilçesi sınırları içerisinde kalan AR: 6 no.lu Çokçapınar jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 19,7 °C ile 23,2 °C arasında değişen 7 adet kaynak ve kuyu, AR: 7 no.lu Çiftlikat jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 19,8 °C ile 23,8 °C arasında olan 3 adet kuyu ve AR: 10 no.lu Narlık jeotermal kaynak arama ruhsat sahası ve çevresinde sıcaklıkları 21,8 °C ve 28,8 °C olan 2 adet kuyu tespit edilmiştir.

Çalışma alanında jeotermal sistemi oluşturan ana unsur derin tektonik hatlardır. Amanoslar ve Toroslar arasında kalan Misis-Andırın tektonik birliği kuzeybatıda sol yönlü Misis Fayı ve

güneydoğuda yine sol yönlü Karataş ve Yumurtalık Fayları arasında bir basınç sırtı olarak yükselirken bu yükselimi oluşturan derin faylar yeraltı suyunun derinlere süzülerek gradyana bağlı ısınmasına ve ısınan akışkanın yoğunluk farkından dolayı yükselmesine aracılık ederler. Jeotermal sistemin örtü kayacını Kuvaterner yaşlı alüvyon ve kaliş birimleri ile Miyosen yaşlı Karataş Formasyonu'nun killi ve marnlı seviyeleri oluşturmaktadır. Sistemin rezervuar kayacını ise Dokuztekne Formasyonu'nun manganez cevherleşmelerinin de görüldüğü mikritik kireçtaşları, Volkano-sedimanter istifin üst düzeylerinde yer alan spilitik aglomeralar, bu düzeylerin içerisine allokton olarak çok büyük boyutta olasılı Paleozoyik yaşlı rekristalize kireçtaşı blokları, Andırın ve Karataş Formasyonu'nun kireçtaşı seviyeleri Paleozoyik ve Mesozoyik kireçtaşı bloklarının oluşturduğu düşünülmektedir.

Bu üç sahada yapılan ölçüm ve örnekleme çalışmalarına göre, birlikte değerlendirilen bu 14 örneğin 1 tanesinde (AC-17) sıcaklık ölçümü yapılamamış; 3 tanesinin (AC-4, AC-6 ve AC-16) sıcaklığının ise 20 °C'nin altında olduğu belirlenmiş ve soğuk su olarak sınıflandırılmıştır. AC-4 kodlu Sirkeli ALPET kuyusu magnezyumlu, kalsiyumlu ve bikarbonatlı soğuk su; AC-6 kodlu Haraminin kuyusu kaynağı kalsiyumlu, magnezyumlu ve bikarbonatlı soğuk su; AC-16 kodlu Çakaldere Köyü kuyusu ise kalsiyumlu, magnezyumlu, sodyumlu, bikarbonatlı ve klorürlü soğuk su olarak adlandırılmıştır.
Analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre çizilen EC-Trityum, δ^2H-Trityum ve Trityum-δ^{18}O grafikleri birlikte incelendiklerinde AC-7 örneğinin görece yüksek Trityum ve düşük EC ve düşük δ^2H değerleri ile tipik bir yüksek kottan beslenen sığ dolaşımlı su örneği vermektedir

AC-11 örneği düşük Trityum değerleri ve yüksek EC ve δ^2H derin dolaşım ve düşük kottan beslenim özellikleri göstermektedir. δ^{18}O değerindeki artış ise yüzeyden buharlaşma ve/veya deniz suyu karışımını işaret etmektedir.

AC-13 örneğinin ise tüm grafikler birlikte incelendiğinde yüzey sularının karışımına uğramış AC-7 ve AC-11 örneklerinin beslenim kotları arasında kalan bir noktadan beslenen derin dolaşımlı bir su olduğu değerlendirilmiştir.

6. KATKI BELİRTME

Proje kapsamında örneklenen su numunelerinin majör anyon-katyon ve iz element analizleri MTA Maden Analizleri ve Teknoloji Dairesi laboratuvarlarında, İzotop numunelerinin analizleri ise DSİ Teknik Araştırmalar ve Kalite Kontrol Dairesi laboratuvarlarında yapılmıştır.

7. KAYNAKLAR

Bilgin, A. Z., Elibol, E., Bilgin, Z. R. ve Beğenilmiş, S. 1981. Ceyhan-Karataş-Yumurtalık-Osmaniye-Haruniye-Kadirli dolayının jeoloji raporu. *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü* Rapor No: 7215, Ankara (yayınlanmamış).

MTA. 2013. 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Mersin O35 Paftası (Açınsamalı). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, p. 11. Ankara.

Clark, I. D. and Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology, *Lewis Publishers*, NewYork, 328p.

Bitirme Projesi Özleri

Kızılay-Çayyolu Metrosu Çayyolu Tren Deposu Sahasında Açılacak Kazı Şevlerinin Duraylılığının Araştırılması

M. G. Gümrük, E. Altundepe, M. Şahin, Y. Sağlam

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZ: Bu çalışmada; hizmete yeni açılan Kızılay-Çayyolu metro hattında (Ankara) çalışan trenler için inşası öngörülen tren deposu sahasında yapılacak kazı şevlerinin farklı koşullar altındaki duraylılıklarının araştırılması ve avam projede yer alan şev geometrilerinin incelenerek, gerekiyorsa daha emniyetli şev seçeneklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma; arazide gözlemler ve ölçümler, laboratuvar deneyleri ve şev duraylılığı analizlerinin yapılması şeklinde birbirini izleyen üç aşamada yürütülmüştür. Bu çerçevede öncelikle; sahadaki birimler incelenmiş, mevcut sondaj verisinden ve arazide yapılan ölçümlerden bu birimlerin mühendislik jeolojisi ve kaya kütlesi özellikleri ile yeraltısuyu seviyesinin konumu belirlenmiş, süreksizliklerin yönelimi tayin edilmiş ve kısmi bir duraysızlığın gözlendiği doğal bir yamaçtan ölçümler alınmıştır. Bunların yanı sıra, arazi ölçümleri ve sondajlara ait veri kullanılarak şev duraylılığı analizlerinde kullanılacak kesitler hazırlanmıştır. İkinci aşamada ise, kazı şevlerinin açılacağı kaya kütlesi niteliğine sahip Akbayırformasyonunun litolojik birimlerinden ve yapay dolgu malzemesinden alınan örnekler üzerinde bu malzemelerin jeomekanik özellikleri laboratuvar deneyleriyle tayin edilmiştir. Kinematik analizlerin sonuçları; şevlerin Akbayırformasyonu içerisinde oluşturulacak kesiminde düzlemsel, kama ve devrilme gibi süreksizlik denetimli duraysızlıkların beklenmeyeceğini, dolayısıyla hem bu birim hem de yapay dolgu malzemesi açısından dairesel (kütlesel) kaymanın daha önemli olduğunu göstermiştir. Depremsiz ve depremli durumlar dikkate alınarak kazı şevlerini temsil eden altı farklı kesit boyunca yapılan limit denge analizleri sonucunda, kazının bazı kesimlerinde projede öngörülen şev geometrileri için 1.3 gibi kabul edilebilir bir güvenlik katsayısından daha düşük değerler elde edilmiştir. Bu belirleme, öngörülen şev geometrilerinin değiştirilerek depremsiz durumda en az 1.3, depremli durumda ise en az 1.1 güvenlik katsayılarını veren daha emniyetli şev geometrilerinin ve nihai şev açılarının araştırılmasını gerekli kılmıştır. Farklı şev seçenekleri için yapılan analizlere göre, kazı şevlerinin yapılacağı alanın değişik kesimlerinde 26^0 ile 32^0 arasında değişen nihai şev açılarına göre tasarım yapılmasının emniyetli şevlerin oluşturulması açısından önem taşıyacağı sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar ayrıca; sahada dolgu malzemesinden oluşan bir kesimdeki 34^0 eğimli doğal yamaçta gözlenen kısmi duraysızlığın geriye dönük analiz sonuçlarını da desteklemiş olup, bu malzemede nihai kazı şevi açısının $32\text{-}33^0$'yi geçmemesinin uygun olacağını göstermiştir. Bunun yanı sıra, sahada yeraltısuyu seviyesinin öngörülen kazı şevi kotunun altında olması şev duraylılığı açısından olumlu bir faktör olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dairesel kayma, geriye dönük analiz, güvenlik katsayısı, kinematik analiz, şev duraylılığı

Beyleri Göleti (Bozkurt-Denizli) Dolusavak Heyelan Alanının Şev Düzenlemesi ile Duraylılığın Arttırılması

E. Günay, M. Tufan, M. Gül, B. Soyer, F. Çavuş

Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kınıklı, Denizli

ÖZ: Denizli ili Bozkurt ilçesinin güney doğusunda yer alan ve inşaatı 2006 yılında tamamlanan Beylerli göletinin sol sahilinde gölet ekseninde dolu savak yapısının sol yamacında meydana gelen ve dolu savak yapısına hasar veren heyelandairesel ve kama türü kayma olmak üzere iki kesimden oluşmaktadır. Bu heyelanın oluşum mekanizması ve heyelana neden olan faktörler Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde farklı bir çalışma grubu tarafından Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda yamaç da bozunmuş melanj biriminin yeraldığı, yamacın topuk kısmında dairesel kayma ve bu kütlenin üst kesiminde (taç kısmında) kama türü kaymanın birbiri ardına duraysızlaştığı, yamaçtaki su çıkışlarının kütle hareketlerinin oluşmasında etkili olduğu sonucu elde edilmiştir. Mühendislik Proje Tasarımı dersi kapsamında yapılan bu çalışmada, göletin dolusavak yapısına zarar veren heyelan kütlesinin duraylılığının arttırılması için heyelan kütlesi üzerinde şev düzenlemesi uygulaması yapılmıştır. Bu kapsamda DSİ tarafından hazırlatılmış olan ve yamacın heyelan sonrası topoğrafyasını kapsayan harita SLOPAC2D programına aktarılmış ve harita üzerinde kayma yönüne paralel ve 20m aralıklarla 5 adet topoğrafik kesitler alınmıştır. Her bir kesit üzerinde heyelanın kayma yüzeyi tanımlanmıştır. Şevlerin duraylılığı heyelanın içinde geliştiği bozunmuş melanj biriminin artık makaslama dayanım değerleri (c_r=9 kPa ve f_r=17.7^o) kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir kesit üzerinde şev yatırma uygulaması yapılmış ve kazılan kısımlar kaldırıldıktan sonra oluşan yeni kesit üzerinde kalan heyelan kütlesinin duraylılık analizi tekrar yapılmıştır. Kazı sonrası oluşan şevlerin uzun süreli kullanımı için güvenlik katsayısının 1.5 ve üzerinde olması sağlanmıştır. Bütün şevlerde yapılan şev düzenlemesi sonrasında toplam kazı hacmi 42496 (m^3) ve kazı kütlesi 101989 ton olarak hesaplanmıştır. Heyelan alanına en yakın ve güvenli kazı döküm sahası 2 km uzaklıkta belirlenmiştir. Heyelan kazısı ve döküm sahasına nakliyesi değerlendirildiğinde şev düzenleme projesinin toplam maliyeti 237632 TL olarak hesaplanmıştır. Bu proje kapsamında heyelan kütlesi içinde su çıkışları olduğundan bu suların kapalı boru içerisinde toplanarak heyelan dışına gölet depolama alanına akıtılması gerekmektedir. Heyelanın taç kısmında kama türü kayma yüzeyinin topuk kısmına kaya blokları konarak topuğun desteklenmesi ve kama kütlesinin duraylılığının sağlanması açısından önemlidir.

Anahtar kelimeler: Beylerli Göleti, heyelan, duraylılık, şev düzenlemesi

Bağlıca Mahallesinde (Etimesgut-Ankara) Yüzeylenen Alüvyonun Taşıma Gücünün ve Temel Kazılarının Duraylılığının Araştırılması

Ş. B. Öztürk, R. Yazıcı, M. Büyükkoç, D. Ertuğrul

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, ANKARA

ÖZ: Ankara Etimesgut ilçesinin geçirmekte olduğu hızlı değişimden Bağlıca Mahallesi de etkilenmekte olup, bu bölgede bir kaç katlıdan 10-15 katlıya kadar değişen boyutlarda yapıların inşası sürmektedir. Bu nedenle, yapı temellerinin taşıma gücünün belirlenmesi ve temel kazılarının duraylılığının değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, Etimesgut bölgesinde gözlenen Kuvaterner yaşlı alüvyon birim içerisinde inşası süren temel kazılarının duraylılığının araştırılması ile farklı temel tipi ve boyutları için taşıma gücü değerlerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle inceleme alanında ve yakın civarında yapılmış jeoloji ve mühendislik jeolojisine ilişkin önceki çalışmalar derlenmiş ve çalışma alanına ilişkin ön değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, Ankara'nın depremselliğine ilişkin önceki çalışmalar da derlenerek inceleme alanında beklenen en büyük yatay yer ivmesinin belirlenmesine yönelik değerlendirmelere gidilmiştir. Çalışma alanında yapılan incelemelerde alüvyon birimdeki temel kazılarından birinde iki adet duraysızlık gözlenmiştir. Duraysızlıkların gerçekleştiği alüvyon birimin birkaç yerde 5-15 cm kalınlıklarda ince çakıl-kum bantları içeren killi silt - silt tane boyunda (ince taneli) malzemeden oluştuğu, dolayısıyla kayma yüzeylerinin ağırlıklı olarak ince taneli malzemenin içinde geliştiği ve dairesel kayma türünde olduğu tespit edilmiştir. Hassas GPS kullanılarak bu duraysızlıkların planı ile kesitleri hazırlanmış ve laboratuvar deneyleri için örnekleme yapılmıştır. Alınan örnekler üzerinde gerekli laboratuvar deneyleri yapılarak alüvyon birimin bazı fiziksel ve indeks özellikleri belirlenmiş, zemin sınıflaması yapılmış ve makaslama dayanımı parametreleri tespit edilmiştir. Kayan kütleyi ağırlıklı olarak temsil eden ince taneli malzemenin sınıfı ML olarak belirlenmiştir. Duraysızlıkların geriye dönük analizlerinden elde edilen grafiklerle laboratuvar deneylerinden elde edilen drenajlı ve drenajsız makaslama dayanımı parametreleri karşılaştırılmış ve yenilme anında malzemenin makaslama dayanımının drenajlı parametrelerle temsil edilebileceği saptanmıştır. Proje çalışmasının son aşamasında, çalışma alanında alüvyon içinde inşa edilecek farklı temel tipi ve boyutları için taşıma gücünün belirlenebileceği grafikler ve eşitlikler oluşturulmuştur. Buna ek olarak, çalışma alanında tasarım ivme değerinin de dikkate alındığı uzun süreli ve kısa süreli duraylılık koşulları için pseudo-statik şev duraylılığı analizleri yapılmış ve farklı şev yüksekliği ve eğimleri için duyarlılık grafikleri hazırlanmıştır. Genel olarak, temel genişliği ve derinliğinin 0.5m ile 3 m arasında değişmesi durumunda sığ temellerin taşıma gücü 90 ile 160 kPa arasında değişmektetir. Kazı duvarları ise, kısa süreli duraylılık koşulu için 70°'lik bir açıda 6 m ve altında, uzun süreli duraylılık içinse 2 m ve altında iken 1.2 ve daha büyük güvenlik katsayısına sahip olabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Alüvyon, Bağlıca-Etimesgut, Taşıma gücü, Sığ temel, Şev duraylılığı

Etimesgut-Bağlıca (Ankara) Yolunun Bağlıca Kesimindeki Yarma Şevlerinin Duraylılıklarının Değerlendirilmesi

G. Köser, M. B. Şerafettinoğlu, M. Sağdıç, S. Işıdı

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZ: Bu çalışmada, Ankara ili sınırları içerisinde yer alan Etimesgut-Bağlıca yolu üzerindeki karşılıklı yol yarması şevlerinin duraylılığının depremli ve depremsiz koşullar için incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen saha çalışmaları kapsamında; süreksizlik ölçümleri alınmış, kaya kütlesinin özellikleri karakterize edilmiş, şerit metre ve jeolog pusulası kullanılarak yarma şevlerinin ölçekli planları ile kaya kütlesinin ayrışmış kesimlerindeki duraysızlıkların kayma öncesi ve sonrasına ait kesitleri çıkarılmış, incelenen alanı temsil edebilecek nitelik ve nicelikte kayadan ve ayrışmış kaya malzemelerinden örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleriyle kaya kütlesi ile ayrışmış kesimin jeomekanik özellikleri ile tabakalanma ve eklem gibi süreksizliklerin makaslama dayanımı tayin edilmiştir. Yol yarması şevlerinin duraylılığı önce kinematik analiz yöntemiyle değerlendirilmiş olup,bu analizlerin sonuçları söz konusu yol yarmalarında düzlemsel ve kama tipi kayma ve devrilme gibi süreksizlik denetimli şev duraysızlıklarının beklenmeyeceğini göstermiştir.Yol yarmalarının kısmen ayrışmış kesimlerinde gelişmiş sığ şev duraysızlıklarının geriye dönük analizlerinin sonuçları kayma yüzeylerinden alınan örneklerin laboratuvarda tayin edilen makaslama dayanımlarıyla oldukça yakın bir uyum göstermiş ve bu kesimlerin dairesel kayma türü (kaya kütlesi yenilmesi) duraysızlıklara karşı oldukça duyarlı oldukları ve şev yüksekliğinin 3 m'yi aşması durumunda bu malzeme içinde 60^0'lik eğimle oluşturulmuş şevlerin duraysızlığa uğrayacakları sonucuna varılmıştır. İncelenen şevlerin kaya kütlesi niteliğini koruyan kesimlerinde kaya kütlesinin ileri derecede kırıklı olması ve kinematik analizlerin sonuçları dikkate alınarak ve makaslama dayanımı açısından Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak depremsiz ve depremli koşullar için dairesel kayma analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları, her iki koşul için de yol yarmasının kaya kütlesi niteliğini koruyan kesimlerinde herhangi bir duraysızlığın beklenmeyeceğini göstermiş olup, arazi gözlemlerini de desteklemiştir.

Anahtar kelimeler: Şev duraylılığı, yol yarması şevi, kinematik analiz, güvenlik katsayısı.

Uçucu Küllerden Soğuk Bağlama (Peletleme) Yöntemiyle Hafif-İri Agrega Üretimi

K. Zorlu, O. Z Bilgi, Y. S. Erzeybek

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü 06800 Beytepe Ankara

ÖZ: Ülkemizin elektrik enerjisinin temel kaynağını oluşturan düşük ısıl değerli linyitler termik santrallerimizde yakılmaktadır. Yanan malzemelerden baca gazı ile sürüklenen ve hava ile teması sonucu ani soğumayla puzolanik bir yapı kazanan malzemeler uçucu kül (UÇK) olarak adlandırılmaktadır. Uçucu kül partikülleri 0.5-150 mikron boyutlarında ve ortalama 1.6 g/cm^3'lük yoğunluğa sahiplerdir. Termik santrallerin 1 kWh' lık enerji üretiminde 110 gram uçucu kül atık madde olarak ortaya çıkarılmaktadır. 1000 kWh' lık bir santralden yılda 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Türkiye'de halen kömürle elektrik üreten 16 adet termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ek olarak 30 adet daha yapılması planlanmaktadır. Almanya, Hollanda ve Belçika gibi ülkelerde uçucu külün % 95'ten fazlası kullanılmakta iken, ülkemizde ise uçucu külün değerlendirilme oranı % 1'i gibi düşük bir seviyededir. Uçucu külün termik santrallerin civarında biriktirilmesi veya atılması, çevrede tozlanmaya, tarım ürünlerine zarara, yağmur ve rüzgâr erozyonuna neden olmaktadır. Bu nedenle uçucu külün doğaya verdiği zararın azaltılması için uçucu külün farklı konularda daha yüksek oranlarda kullanılması gerekmektedir. Literatürde uçucu külden, hafif iri agrega üretimi üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu projede, Yeniköy ve Yatağan termik santrallerinden alınmış olan uçucu küllerle farklı oranlarda hazırlanan karışımlar peletleme yöntemi ile hafif iri agrega üretimi yapılmıştır. Üretilen uçucu kül (UÇK) agregalarının ortalama nokta yükü dayanımı (I_{s50}) 2 MPa olarak hesaplanmıştır. En yüksek nokta yükü dayanımı (I_{s50}) ise 4.23 MPa olarak belirlenmiştir. UÇK agregasının yoğunluğu da 1.8 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Yatağan uçucu külü ile üretilen agregalardan hazırlanan beton küp örneklerinin dayanım değerleri 18.24 MPa olarak belirlenmiştir. Dökülen uçucu kül agregalı beton kalıplardan kesit alındığında UÇK agregalarının çimento ile mükemmel düzeyde bağ sağladığı görülmüştür. Uçucu kül agregası kullanılmadan kırma taş agregaları ile hazırlanan beton küp örneklerinin dayanımı değerleri 17.75 MPa olarak belirlenmiştir. UÇK agregası kullanılan beton blokların dayanım değerlerinde %3'lük artış saptanmıştır. UÇK agregalarının ile üretilen betonun bloğunun yoğunluğu 2.15 g/cm^3, kırma taş agregası kullanılan beton bloğunun yoğunluk 2.22 g/cm^3 bulunmuştur. UÇK agregası kullanılarak beton bloğunun yoğunluğun da %3.26 ve ağırlığı da %3 azalma olduğu belirlenmiştir. Kırma taş agregasının 1 m^3 maliyeti 42 TL iken, UÇK agregasının üretim maliyeti 31 TL/m^3 olarak hesaplanmıştır. UÇK agregasının, kırma taş agregasına göre üretim maliyeti %26 daha ucuzdur. UÇK agregasından üretilen betonların avantajları kısaca özetlenecek olursa; üretim maliyeti daha düşüktür, dayanımları daha yüksektir ve yoğunlukları daha azdır.

Anahtar Kelimeler: Termik Santral, Uçucu Kül, Agrega, İri Agrega, Peletleme, Soğuk Bağlama.

Gümüşhane ili Merkez Hasanbey Mahallesi'nde Yüzeyleyen İri Taneli Zeminlerin Taşıma Gücünün Belirlenmesi

Z. Soysal, S. Ay, S. Ünver

Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

ÖZ: Bu çalışmada Gümüşhane ili Merkez Hasanbey Mahallesi'nde yüzeyleyen iri taneli zeminlerin taşıma gücü araştırılmıştır. Bu amaçla inceleme alanında yapılmış olan sondaj çalışmasından elde edilen örselenmiş numuneler yardımı ile laboratuvarda yıkamalı elek analizi, kıvam limitleri ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sondaj esnasında yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerinden yararlanılmıştır. Yapılan elek analizi ve kıvam limiti deneyleri yardımı ile zemin sınıfı farklı derinlikler için iyi derecelenmiş kum veya çakıllı kum (SW), siltli çakıl-killi çakıl (GM-GC) olarak belirlenmiştir. Yine laboratuvar çalışmaları esnasında kesme kutusu deneyi yapılarak zeminin kohezyonu (c) 0.56 kN/m^2 ve içsel sürtünme açısı (ϕ) 27° olarak belirlenmiştir. Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenen zemin parametrelerine bağlı olarak ayrıntılı taşıma gücü hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi'ne göre şerit ve radye temel sistemleri için, farklı temel genişliği ve temel derinlikleri dikkate alınarak parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine SPT sonuçlarından yararlanarak Mayerhof yöntemine göre taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi'ne göre hesaplanan taşıma gücü değerleri şerit temel için 132,99-394,07 kN/m^2, radye temel için 622,87-812,61 kN/m^2 arasında değişmektedir. SPT sonuçlarına göre Mayerhof yöntemi kullanılarak hesaplanan taşıma gücü değerleri ise şerit temel için 150,43-214,5 kN/m^2, radye temel için 237,62-247,03 kN/m^2 arasında değişim göstermektedir. İnceleme alanı ile ilgili yapılan değerlendirmelerde zemin profilinin mevcut durumu dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Bununla birlikte zemin üzerine herhangi bir yapı inşa edileceği zaman yapı ömrü süresince zeminin doygun hale gelebileceği düşünülerek hesaplamaların en kötü koşullar göz önüne alınarak değerlendirilmesi pratikte daha emniyetli sonuçlar verecektir.

Anahtar Kelimeler: Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi, Mayerhof Yöntemi, Şerit Temel, Radye Temel

Yaylapınar (Bayburt) Travertenlerinin Jeolojik ve Jeomekanik Özelliklerinin Araştırılması

O. Çakıroğlu

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

ÖZ: Bu çalışmada, Yaylapınar (Bayburt) travertenlerinin jeolojik ve jeomekanik özellikleri araştırılmış, travertenlerin yapı taşı olarak standartlara uygunluğu belirlenmiştir. Araziden sahayı temsil edecek şekilde blok örnekler temin edilerek, bu blok örneklerinden anizotropi de dikkate alınarak yönlü karot örnekleri temin edilmiştir. Yapılan laboratuar deneyleri sonucunda birim hacim ağırlık değerlerinin 23.14 ile 23.70 kN/m^3, ağırlıkça su emme değerlerinin % 1.68 ile 1.81, hacimce su emme değerlerinin % 3.98 ile 4.23 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinin 31 MPa ile 40 MPa, çekme dayanımı değerlerinin ise 5.10 ile 6.95 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Donma-çözünme deneylerinde kütle kaybının % 0.31 ile 0.34 arasında, ıslanma-kuruma deneyleri sonucunda ise bu kaybın % 0.7 ile 1.0 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlardan yola çıkarak gerek ulusal gerekse uluslararası standartlar dikkate alındığında çalışma konusu travertenlerin gerek taşıma gerekse kaplama taşı olma açısından standartlara uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Traverten, yapı taşı, Yaylapınar

Akhisar Deresi (Beşikdüzü- Trabzon) Alüyonlarının Hidrojeolojik ve Hidrojeokimyasal Özelliklerinin Araştırılması

O. Rüzgar

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

ÖZ: Bu çalışmada Trabzon ili, Beşikdüzü ilçesi sınırları içerisinde yer alan Akhisar Deresi alüvyonlarının hidrojeolojik açıdan incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen arazi çalışmaları kapsamında; çalışma alanın 1/25.000 ölçekli jeoloji haritası hazırlanmış ve Akhisar Deresi'nden alüyyon örneği alınmıştır. Alınan alüvyon örneği üzerinde yapılan elek analizi deneyi sonucunda akifer malzemesinin %12'sinin blok, %62'sinin çakıl ve %26'sının kum boyutunda malzemeden oluştuğu belirlenmiştir. Akifer malzemesine ait çizilen granülometri eğrisinden malzemenin üniform olmayan, kötü boylanmış malzeme olduğu belirlenmiştir. Arazi çalışmaları sırasında yapılan incelemeler sonucunda akiferi oluşturan çakıl ve blok boyutundaki malzemelerin çoğunlukla volkanik kayaç kökenli olduğu, daha aza oranda da tortul kayaçlardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Laboratuvar deneyleri ile akifer malzemesinin porozite değeri (n) %27.5; permeabilite katsayısı değeri (K) ise 0.09 cm/sn olarak hesaplanmış ve malzemenin "geçirimli malzeme" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Beşikdüzü ilçesinin içme ve kullanma suyu gereksinimi akiferde açılan 8 adet derin kuyudan karşılanmaktadır. Kuyuların statik seviye değerleri 1.3-7.7 m arasında; debi değerleri 5-20 l/s arasında değişmekte ve toplam işletme debisi 191 l/s olarak kullanılmaktadır. Beşikdüzü ilçesinin son nüfus sayımındaki verileri kullanılarak 30 yıl sonraki nüfus değeri 29772 kişi olarak hesaplanmıştır. Beşikdüzü ilçesinin 30 yıl sonraki su gereksinimi 34.46 l/s olarak hesaplanmış ve kuyuların toplam işletme debisinin 191 l/s olduğu göz önünde bulundurulduğunda kuyulardan sağlanan yeraltı suyunun 30 yıl sonra ilçenin içme ve kullanma suyu gereksinimini karşılayacağı belirlenmiştir. Akhisar Akiferi yeraltısuyu kalitesini belirlemek amacı ile 4 adet kuyu suyunun analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Buna göre yeraltı suyunun Ph değeri 7.68-8.04; Elektriksel İletkenlik değeri 280-2103;sertlik değeri 99-699 arasında değişmektedir. Kimyasal analiz sonuçları Piper Diyagramı'nda değerlendirildiğinde su örneklerinin $CaCO_3$ ve$MgCO_3$'lı ve karbonat sertliğinin %50'den fazla olduğu sular sınıfında yer aldığı görülmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde kıta içi su kaynakları sınıflarına (2004) göre yeraltı suyunun Ph, Na, SO_4, NO_3, NH_4, CN, Fe, Al, Co, Cd, As, Cr ve Ba içeriklerine göre I. Sınıf (yüksek kaliteli) sular, Cu içeriklerine göre II. Sınıf (az kirlenmiş) sular, PO_4 ve NO_2 içeriklerine göre ise IV. Sınıf (çok kirlenmiş) sular sınıfında yer aldığı görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Hidrojeoloji, Hidrojeokimya, Akhisar Deresi, Trabzon

Yazar İndeksi / *Author Index*

Acar, R. Z. 106
Acar, S. 254, 373
Akbulut, A. 169
Akdaş, E. 373
Akdeniz, U. 405, 412
Akgün, A. 82
Akgün, M. 200
Akgür, B. 311
Akın, M. 208
Akın, M. K. 208
Akıncı, H. 98
Akkaya, İ. 208
Al, S. 373
Alemdağ, S. 286, 302
Aliyazıcıoğlu, Ş. 351
Alkan, F. 286
Alptekin, C. 357
Altuğ, S. 452
Angı, S. 357
Apaydın, A. 397
Arslan, A. T. 200
Asal, İ. 428
Atalar, C. 200
Avşar, E. 230
Aydan, Ö. 106, 230
Aydoğan, S. 74
Babacan, A. E. 224
Baki, A. O. 265
Baki, Ö. 373
Barkın, N. 216
Başer, O. 10
Bayraktar, A. 90
Berber, S. 294
Beren, M. 262
Bulut, F. 82, 161
Ceryan, N. 294
Ceryan, Ş. 294, 327
Cihangir, F. 351
Çakan, H. 114
Çalışkan, M. 420
Çam, O. 335
Çan, T. 137, 153
Çebi Usturbelli, Z. H. 327
Çelik, G. 169
Çelik, N. U. 42
Çelik, S. B. 262, 335
Çetin, H. 185
Çobanoğlu, İ. 262, 335
Çolak, M. 505
Çoruh, S. 343
Dağ, S. 286
Demirbaş, N. 26
Demirci Aktaş, S. 397
Demirel, Ö. 428
Demirkazık, F. 452
Doğdu, M. Ş. 405, 412
Duman, T. Y. 137, 153
Ekmekçi, M. 459, 467
Elçi, H. 319
Epsileli, E. 122
Er, S. 357
Erçıkdı, B. 351
Erişiş, S. 357
Ersoy, H. 82, 90, 224, 261
Ertunç, A. 185
Esin, G. 294
Etiz, H. 335
Fırat Ersoy, A. 482, 497
Gelişli, K. 90, 192, 224
Gemici, Ü. 505
Genç, O. 106
Gökgöz, A. 428
Göksu, A. E. 58
Güler, C. 114, 122
Gültekin, F. 459, 482, 497
Güner, N. K. 412
Güney, R. 145, 389
Hacak, B. 122
Hatipoğlu Temizel, E. 482, 497
Işık, N. S. 278
İçöz, E. 26
İşintek, İ. 319
Kalender, A. 246
Karadağ, O. 420
Karagüzel, R. 436
Karaibrahimoğlu, G. 90
Karakuş, K. 50
Karaman, K. 351
Karamanderesi, İ. H. 505
Karslı, H. 145, 389

Kartal, İ. 365
Kaya, A. 161
Kaya, S. 397
Kesimal, A. 238, 351
Kılıç, N. 10, 18
Kılıç, R. 216
Kılıçoğlu, C. 98, 343
Kirici, M. 389
Koca, M. Y. 200
Koçbay, A. 50, 420
Kop, A. 444
Köksal, L. G. 405, 412
Kömürlü, E. 238
Köse, M. 169
Kul Yahşi, B. 90
Kumsar, H. 106
Kurşun, M. 335
Leventeli, Y. 58
Mahmutoğlu, Y. 34, 311
Mazman, T. 137
Mutlutürk, M. 177, 230
Nacar, S. 444
Özcan, N. T. 246
Özdağ, Ö. C. 200
Özen, M. 90
Özen, T. 505
Özer, M. 270
Özkan, F. S. 238
Öztürk, A. N. 365
Öztürk, H. H. 90
Özulukale, S. 513
Özvan, A. 208
Pelen, N. 412
Reis, S. 66
Sağır, G. 90
Sarıçiçek, I. 3
Sayın, A. 10, 18, 26
Seçkin, A. C. 90
Subaşı, S. 106
Sungur, N. 278
Şans, G. 34
Şengül, A. 208
Şenkaya, M. 145
Şentürk, Y. 50, 420
Şeren, A. 3
Şimşek, O. 365
Şimşek, Ş. 475, 513
Şirin, A. 18
Tağa, H. 114, 122
Tahracı, Ş. 106
Tarcan, G. 505
Tarhan, F. 82
Taşkıran, L. 521
Taşpınar, M. 130
Tekin, S. 137
Tepe, M. 122
Tezel, C. 452
Tezel, K. 90
Topal, C. 34
Tuğrul, A. 357
Tunar Özcan, N. 246
Tuncay, E. 246
Turalı, E. Y. 490
Turalı, Ü. 521
Türk, N. 319
Türkmen, S. 42
Ulamış, K. 216
Ulusay, R. 230
Uras, Y. 444
Ünsal, M. 444
Vanlı Şenkaya, G. 145
Vardar, M. 381
Yağcı, A. E. 444
Yalçın, A. 66, 130, 177
Yalçın, E. 122
Yalçın, H. T. 436
Yaltırak, C. 436
Yavuz, T. K. 270
Yılmaz, Ç. C. 389
Yılmaz, M. 357
Yolal, A. 521
Yurteri, C. 475
Yurtkal, E. G. 26
Yüregir, B. 90
Yüzer, E. 74
Zanbak, C. 1
Zorlu, K. 122