

ISSN 1305-6859

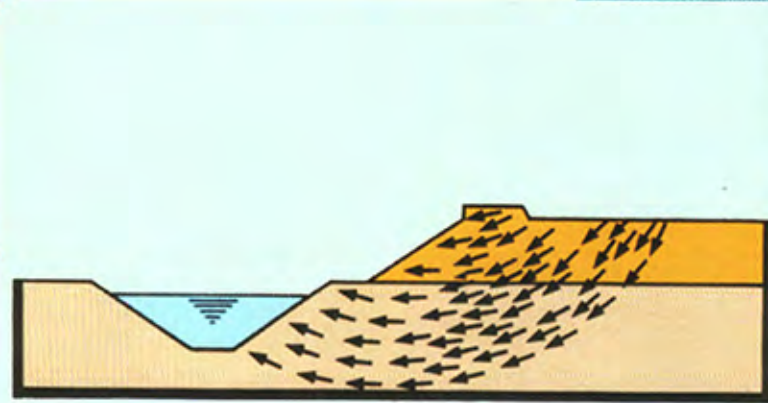
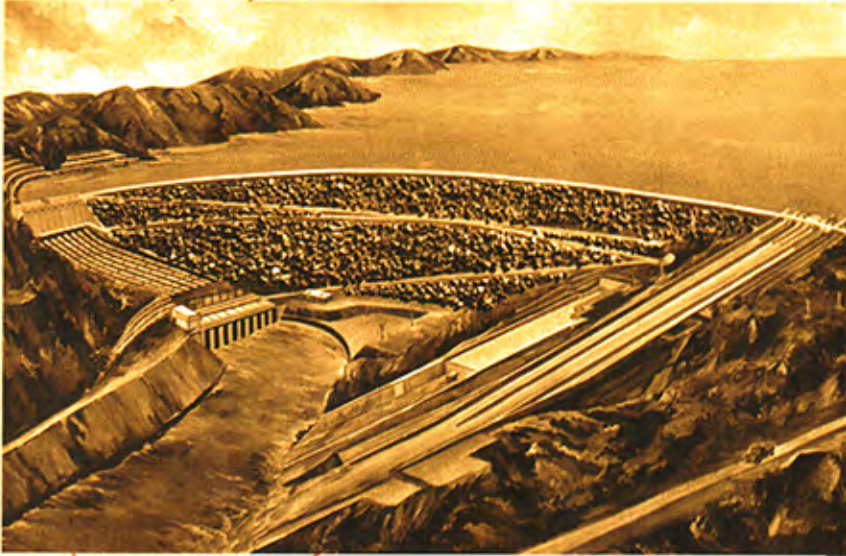


MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY

2010

SAYI: 30

FİKRET TARHAN ÖZEL SAYISI



ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ TÜRK MİLLİ KOMİTESİ YAYINI
PUBLICATION OF INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY AND
THE ENVIRONMENT TURKISH NATIONAL COMMITTEE

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY

Yayın Sahibi / Owner on Behalf of the Committee
Erdoğan YÜZER

Yazı İşleri Müdürü / Publication Director
Atiye TUĞRUL

Editör / Editor
Reşat ULUSAY

Yardımcı Editör / Assistant Editor
Ergün TUNCAY

Yayın Danışma Kurulu / Advisory Board

Ergin ARIÖĞLU	Remzi KARAGÜZEL
Can AYDAY	K. Erçin KASAPOĞLU
Remzi DİLEK	Recep KILIÇ
Vedat DOYURAN	Şakir ŞİMŞEK
Mehmet EKMEKÇİ	Tamer TOPAL
Mustafa ERDOĞAN	Atiye TUĞRUL
Okay EROSKAY	Necdet TÜRK
Aziz ERTUNÇ	Mahir VARDAR
Candan GÖKÇEOĞLU	Erdoğan YÜZER
Okay GÜRPINAR	

Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Yönetim Kurulu

International Association of Engineering Geology and the Environment Turkish National Executive Committee

Başkan: Erdoğan YÜZER (İTÜ)

Genel Sekreter: Atiye TUĞRUL (İÜ)

Sayman: Tamer TOPAL (ODTÜ)

Üye: Aziz ERTUNÇ (ÇÜ) - Üye: Reşat ULUSAY (HÜ)

Üye: Remzi KARAGÜZEL (İTÜ) - Üye: Mustafa ERDOĞAN (İTÜ)

Bültenin Kapsamı / Scope of the Bulletin

Bülten’de mühendislik jeolojisi ile ilgili yapılmış bilimsel araştırmalara ve/veya uygulamaya yönelik çalışmaların ürünü olan Türkçe yazılara yer verilir. Bülten yılda iki kez yayınlanır.

Bulletin of Engineering Geology is a medium to the publication of original scientific studies and/or applications in the field of engineering geology written in Turkish. The bulletin is published twice a year.

Yazı Göndereceklere Not / Note to Contributors

Gönderilecek yazılar, Bülten’in Yayın Amaç ve Yazım Kuralları’nda belirtilen ilkelere uygun olmalıdır. Yazılar üç kopya halinde yazışma adresleri aşağıda verilen editörlerden birine gönderilmelidir.

Manuscripts should be prepared in the form required in the instructions entitled "Guide for Authors". Three copies should be submitted to the one of the editors whose corresponding addresses are given below.

Yazışma Adresleri / Correspondence Addresses

Prof. Dr. Reşat Ulusay

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara
e-mail: resat@hacettepe.edu.tr - Tel: (312) 297 77 67 - Fax: (312) 299 20 34

Doç. Dr. Ergün Tuncay

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara
e-mail: etuncay@hacettepe.edu.tr - Tel: (312) 297 77 00/156 - Telefax: (312) 299 20 34

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ

BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY

Sayı(No.): 30 Haziran (June) 2010

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Gözenekli Kayalarda Isı Akışının Sayısal Modellenmesi ve Armutlu Jeotermal Sahasına Uygulanması

Numerical Modelling of Heat Flow in Porous Rock Masses and Its Application to Armutlu Geothermal Field

Ömer AYDAN..... 1

Bolu Civarındaki Metakristalin Kayaçların Ayrışma Derecesinin İncelenmesi

Investigation of Alteration Degree of Metacrystalline Rocks in the Vicinity of Bolu, Turkey

Recep KILIÇ, Koray ULAMIŞ, Yusuf Kağan KADIOĞLU,

Metin YURDAKUL..... 17

İstanbul Metrosu Sanayi İstasyonu Kuzey Yolcu Salonu

Duvarlarında Oluşan Deformasyonların Değerlendirilmesi

Evaluation of Displacements on the Northern Concourse Walls of the Sanayi Station of the İstanbul Metro

Yılmaz MAHMUTOĞLU, Bahattin KİMENÇE..... 35

İstanbul'da Üretilen Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkileri

The Effects of Different Originated Aggregates Produced in İstanbul on Concrete Properties

Burcu GÜLER, Atiye TUĞRUL, Selahattin HASDEMİR,

Sabah YILMAZ ŞAHİN..... 53

Ayrışmanın Dunit ve Diyoritin Mühendislik Özelliklerine Etkisi

Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dunite and Diorite

Ömer ÜNDÜL, Atiye TUĞRUL..... 73

Yayın Türü (*Type of Publication*) : Yerel Süreli Yayın

Baskı (*Printed By*) : Öncü Basımevi, Kazım Karabekir Caddesi,
Ali Kabakçı İşhanı, No: 85/2 İskitler, ANKARA,
+90 312 384 31 20

Baskı Tarihi (*Printing Date*) : 08.06.2010

Bülten, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası'nın katkısıyla basılmıştır.



Prof. Dr. Fikret TARHAN (1929-2010)

Mühendislik Jeolojisi Bülteni'nin bu sayısını, 8 Mart 2010 tarihinde aniden aramızdan ayrılan sevgili meslektaşımız Prof. Dr. Fikret TARHAN hocanın anısına ayırıyoruz.

1939 yılında Eskişehir'de doğan TARHAN, 1958'de orta öğrenimini Bursa Erkek Lisesi'nde, yüksek öğrenimini 1964 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamıştır. Mezuniyetini takiben Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nde jeoloji mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve 1969 yılında KTÜ Yerbilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne Asistan olarak atanmıştır. Aynı üniversitede 1976 yılında Doktor, 1982 yılında Doçent, 1990 yılında da Profesörlüğe yükseltilmiştir. Doktorasından sonra bir yıl süreyle İngiltere'de Newcastle Üniversitesi'nde araştırma ve incelemelerde bulunmuştur.

KTÜ'nün gelişmesinde önemli hizmetleri bulunan Prof. Dr. Fikret TARHAN; mühendislik jeolojisi ile ilgili çeşitli lisans ve yüksek lisans dersleri vermiş, ayrıca çok sayıda tez yönetmiştir. 1983-1984 yılları arasında KTÜ Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dekan Yardımcılığı, 1990-1992 yıllarında 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.

Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi'nin üyesi olarak Komite tarafından düzenlenen bilimsel toplantılara katılan, bildiri ve makaleleri ile çok önemli katkılar sağlayan meslektaşımızı daima özlemle anacağımızı belirtir, ailesine, tüm meslek camiasına ve sevenlerine baş sağlığı dileriz.

**Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi
Yönetim Kurulu**

GÖZENEKLİ KAYALARDA ISI AKIŞININ SAYISAL MODELLENMESİ VE ARMUTLU JEOTERMAL SAHASINA UYGULANMASI

*Numerical Modelling of Heat Flow in Porous Rock Masses and Its Application to
Armutlu Geothermal Field*

Ömer AYDAN

Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orido 3-20-1, Shimizu, 424, Japonya

ÖZ

Kaya kütlelerinde ısı akışı, jeotermal enerjinin kullanımı ve kaya kütleleri içinde açılan yeraltı yapılarında malzeme veya nükleer atıkların depolanması açısından oldukça önemlidir. Bu makalenin ilk bölümünde karışım kuramına dayanan gözenekli kayalarda ısı akışının ana denklemleri sunulmuş, daha sonra bu denklemlerin sayısal çözümü için sonlu elemanlar yöntemine göre formülasyonu verilmiştir. En son bölümde ise, önerilen yaklaşım Yalova ilindeki Armutlu jeotermal sahasında yapılan ölçümlere uygulanarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, önerilen yöntemle arazi ölçümleri arasında iyi bir uyum olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Armutlu, gözenekli kaya, ısı akışı, jeotermal, sıcaklık, sonlu elemanlar yöntemi.

ABSTRACT

The heat flow through rock mass is of great importance in the utilisation of geothermal energy, storage in underground openings as well as in the assesement of thermal environment in radioactive waste disposal projects. In the first part of this paper, the theory of heat transport in porous rock mass is derived by using the mixture theory and then, the finite element formulation of the governing equations of heat transport derived is presented. In the final part, the applications of the presented finite element method to the modelling of heat transport at the Armutlu geothermal field near the city of Yalova are presented and compared with the actual measurements. The comparison of numerical estimations with actual in-situ measurements are found to be in accordance with each other.

Key words: Armutlu, porous rock, heat flow, geothermal, temperature, finite element method

1. GİRİŞ

Bilindiği gibi, yerküre oluşumundan bu yana giderek soğuyan küresel bir kütledir. Yerkürenin iç kısmından yüzeye doğru ısı akışı halen devam etmekte ve ortalama her 100 m'de sıcaklık yaklaşık 3 derece artmaktadır. Yerküre içinde halen devam eden radyoaktif süreçten

dolayı ısı çıkışı meydana geldiği belirtilmektedir (örneğin; Fowler, 1990) Bunun yanı sıra, yerkabuğunu oluşturan plakaların sürtünerek hareket etmesi (dalma, yanal kayma vd.) açığa çıkan mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüşerek ısı çıkışına neden olmaktadır. Özellikle göreceli hareketin büyük olduğu yerlerde ve/veya göreceli hareketin sürekli olduğu örneğin fay zonlarında, ısı çıkışı bu bölgelerde derinliğe bağlı sıcaklık eğiminin yüksek olmasına ve jeotermal kaynakların belirmesine ve/veya kaplıcaların oluşumuna neden olmaktadır.

Yer mühendisliğinde jeotermal enerji, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Dolayısıyla etkin jeotermal enerjinin kullanımı ve geliştirilmesi açısından yerkabuğundaki ısı akışının belirlenmesi oldukça önemli bir husustur. Diğer yandan insanoğlu, kaya içinde doğal olarak oluşmuş veya kendi açtığı yeraltı açıklıklarını doğadaki ısısal değişimlere karşı kendini korumada veya malzeme depolamasında ısı enerjisinin masraflarını azaltmak üzere kayadaki ısı akışından ve özelliklerinden yararlanmaktadır. Bunun yanı sıra, nükleer atıkların kaya içinde depolanması durumunda bunların belirli bir süre daha ısı çıkışına neden olmasından dolayı, bu tür yapıların çevresinin bu ısı çıkışından etkilenme olasılığı da oldukça yüksektir.

Bu makalede, yerkabuğunu oluşturan kaya kütlesi içinde ısı akışı ele alınmıştır. Makalenin ilk bölümünde; gözenekli kayalarda ısı akışını denetleyen ana denklemler karışım kuramına göre elde edilip sunulmuş, daha sonra ısı akış denklemlerinin sayısal çözümü için sonlu elemanlar yöntemine göre formülasyonu verilmiştir. Son bölümde ise, Yalova ilindeki Armutlu jeotermal sahasında yapılan ölçümlerin modellenmesine bu çözüm yöntemi uygulanmış ve hesaplama sonuçları ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

2. GÖZENEKLİ KAYALARDA ISI AKIŞININ KURAMI

2.1. Karışım Kuramı

İçer gaz ve/veya sıvı içeren gözenekli ortamların mekanik olarak modellenmesi için değişik yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla karışım kuramı (mixture theory), mikromekanik (micro-mechanics) kuramı, mikro-yapı (micro-structure) kuramı, homojenleştirme (homogenization) kuramıdır (Trusdell ve Toupin, 1960; Jones, 1975; Budiansky ve O'Connell, 1976; Bakhvalov ve Panasenko 1984; Bear, 1988; Aydın vd. 1996; Tokashiki vd. 1998; Aydın, 2001; Tokashiki ve Aydın, 2008). Bu yöntemler arasında yaygın olarak kullanılan karışım kuramına (örneğin; bkz. Trusdell ve Toupin (1960) ve Aydın (2001)) göre gözenekli bir ortamı oluşturan katı kısım ile gözenekleri dolduran sıvı kısım için aynı fiziksel uzayda hacimsel oranları ile kullanılarak enerji korunum yasası aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{Katı kısım: } (1-n)\rho_s \frac{dU_s}{dt} = -\nabla \cdot ((1-n)\mathbf{h}_s) + (1-n)Q_s \quad (1)$$

$$\text{Sıvı kısım: } n\rho_f \frac{dU_f}{dt} = -\nabla \cdot (n\mathbf{h}_f) + nQ_f \quad (2)$$

Burada $U_s, U_f, \mathbf{h}_s, \mathbf{h}_f, \rho_s, \rho_f, n$ ve Q_s, Q_f sırasıyla; iç enerji, ısı akış vektörleri, katı ve sıvının yoğunluğu, gözenek oranı ve birim hacim için enerji çıkışıdır. Ayrıca s ve f alt indisleri katı ve sıvı halleri işaret eder. Yukarıdaki denklemler toplanırsa, tüm kütle için aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$(1-n)\rho_s \frac{d_s U_s}{dt} + n\rho_f \frac{d_f U_f}{dt} = \nabla \cdot ((1-n)\mathbf{h}_s + n\mathbf{h}_f) + ((1-n)Q_s + nQ_f) \quad (3)$$

Burada

$$\frac{d_s(\cdot)}{dt} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + \mathbf{v}_s \cdot \nabla(\cdot) \quad \frac{d_f(\cdot)}{dt} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + \mathbf{v}_f \cdot \nabla(\cdot) \quad \text{ve} \quad \nabla = \frac{\partial(\cdot)}{\partial x_j} \mathbf{e}_j \quad (4)$$

olup, malzeme türev operatörleri olarak anılır. Bu operatörlerdeki $\mathbf{v}_s$ ile $\mathbf{v}_f$ katı ve sıvı fazlara sabitlenmiş koordinat sistemlerine göre malzeme noktasının hızlarıdır.

2.2. Malzeme Davranış İlişkileri

Isı akışı problemlerinde malzeme içinden geçen ısı ile sıcaklık arasındaki ilişki için Fourier'in önerdiği doğrusal malzeme davranış ilişkisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Katı ve sıvı kısmı oluşturan malzeme için Fourier ilişkileri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{h}_s = -\lambda_{sT} \nabla T_s \quad (5a)$$

$$\mathbf{h}_f = -\lambda_{fT} \nabla T_f \quad (5b)$$

Burada, λ_{sT} ve λ_{fT} katı ve sıvının ısı iletkenlik katsayılarıdır.

Eğer katı ve sıvı eş sıcaklıkta diğer bir ifadeyle $T_s = T_f = T$ olduğu varsayılır ve Voigt yaklaşımı kullanılırsa, ortalama ısı akış vektörü $\mathbf{h}$ aşağıdaki hali alır:

$$\begin{aligned} \mathbf{h} &= (1-n)\mathbf{h}_s + n\mathbf{h}_f \\ \mathbf{h} &= -\{(1-n)\lambda_{sT} + n\lambda_{fT}\} \nabla T \\ \mathbf{h} &= -\lambda_T \nabla T \end{aligned} \quad (6)$$

Burada; $\lambda_T = (1-n)\lambda_{sT} + n\lambda_{fT}$ olup, karışım kuramının uygulanmasında bile değişik ortalama yaklaşımların (örneğin; Voigt ve Reuss yaklaşımı) olduğuna da burada dikkat edilmelidir (Geniş bilgi için, bkz. Trusdell ve Toupin (1960) ve Aydan vd. (1996)).

2.3. Ana Denklemler

Katı ve sıvının iç enerjisi, sıcaklıkla özgül ısı katsayıları (c_s, c_f) kullanılarak aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir.

$$\frac{\partial U_s}{\partial t} = \frac{\partial U_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial U_f}{\partial t} = \frac{\partial U_f}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = c_f \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7b)$$

Gözenekli ortamlarda sıkça kullanılan Darcy yasasındaki göreceli ortalama hız (v_r) ile katı ve sıvı fazlarının hızları aşağıdaki gibi ilişkilendirilir.

$$v_r = n(v_f - v_s) \quad (8)$$

Eşitlik 4, 7 ve 8'deki ilişkiler ısı akışının ana denklemi Eşitlik 3'te kullanılırsa, gözenekleri sıvı ile dolu kütle içinde ısı akışını denetleyen ana ilişki kolaylıkla elde edilir.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_r \nabla T) - ((1-n)\rho_s c_s + n\rho_f c_f) v_s \cdot \nabla T - \rho_f c_f v_r \cdot \nabla T + Q \quad (9)$$

Burada $\rho c = (1-n)\rho_s c_s + n\rho_f c_f$ olup, katı kısmın hızı ihmal edilebilir düzeyde ise, Eşitlik 9,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_r \nabla T) - \rho_f c_f v_r \cdot \nabla T + Q \quad (10)$$

şeklini alır. Eşitlik 10'a benzer ilişkiler literatürde bulunmakla birlikte türetilmeleri şekilleri farklı olabilir (örneğin; Bear, 1988; Aydan, 2001). Eşitlik 10'un elde edilmesindeki varsayımların geçerli olmaması halinde 1 ve 2 no.lu ana denklemlerin, 5, 7 ve 8 no.lu ilişkiler kullanılarak doğrudan çözümlenmesi gerekecektir.

3. SONLU ELEMANLAR FORMÜLASYONU

Bu bölümde, Eşitlik 10'da verilen ilişkinin önce zayıf form formülasyonu ve daha sonra elde edilen zayıf form denkleminin yaklaşık çözümü için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak fiziksel ve zaman uzayında ayrıklaştırılmış şekilleri sunulmuştur.

3.1. Zayıf Form Formülasyonu

Sıcaklık ortamının küçük bir değişimi δT düşünülerek 10 no.lu eşitliğin hacimsel integrasyonu alınırsa, bu eşitliğin zayıf form hali aşağıdaki gibi elde edilir.

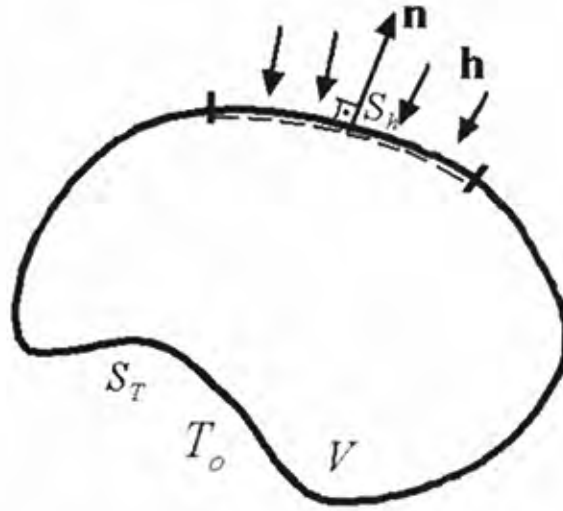
$$\int_V \rho c \delta T \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \nabla \delta T \cdot \lambda_r \nabla T dV + \int_V \rho_f c_f \delta T v_r \cdot \nabla T dV = \int_V \delta T h dS \quad (11)$$

Yukarıdaki denklem aşağıda verilen sınır koşullarına bağlı olduğu varsayılır (Şekil 1). Sıcaklık sınır koşulları:

$$S_T \text{ üzerinde } T = T_0 \quad (12)$$

Isı akış sınır koşulu:

$$S_h \text{ üzerinde } -(\lambda_r \nabla T) \cdot \mathbf{n} = \hat{h} \quad (13)$$



Şekil 1. Sınır koşullarının gösterimi.

Figure 1. Illustration of boundary conditions.

3.2. Fiziksel Uzayda Ayırıklandırma

Eşitlik 10 tüm kütle için geçerli olup, kütle için küçük bir kısmını oluşturan her bir sonlu eleman için de geçerli olmalıdır. Sonlu bir eleman içindeki sıcaklık ile elemanı oluşturan düğüm noktalarındaki sıcaklık değerleri kullanılarak fiziksel uzayda aşağıda verildiği gibi ilişkilendirilebilir.

$$T = [N]\{\chi\} \quad (14)$$

Burada $[N]$, şekil fonksiyonudur. Sonlu elemanlar yönteminde iki vektörün noktasal çarpımı aşağıda verildiği gibi yazılır.

$$\alpha \cdot \beta = \delta \Rightarrow \{\alpha\}^T \{\beta\} = \delta \quad (15)$$

14 ve 15 no.lu eşitliklerdeki ilişkiler Eşitlik 11'de konup düzenlenirse, her bir eleman için sonlu elemanlar şekli aşağıdaki hali alır.

$$[M]_e \{\dot{\chi}\}_e + [K]_e \{\chi\}_e = \{Y\}_e \quad (16)$$

Burada,

$$[M]_e = \int_V \rho c [N]^T [N] dV; \quad [K]_e = \int_V \lambda_r [B]^T [B] dV - \int_V [N]^T \{v_r\}^T [B] dV;$$

$$\{Y\}_e = \int_S [\bar{N}]^T \hat{h} dS + \int_V [N]^T Q dV$$

olup, yukarıda tipik sonlu elemanlar için elde edilmiş denklem sistemi tüm kütle M elemana ayrıklandırıldığı varsayılarak toplanırsa, tüm kütle için sonlu elemanlar şekli

$$[M] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = \{Y\} \quad (17)$$

olarak elde edilebilir.

3.3. Zaman Uzayında Ayrıklandırma

Eşitlik 17'deki fiziksel uzayda ayrıklandırılmış sonlu elemanlar denklemi herhangi bir zaman için geçerli olup, örneğin θ yöntemi kullanılırsa zaman başamağı $(n+1)$ için aşağıda verildiği gibi elde edilebilir (türetim için EK-1'e bakınız).

$$[M^*] \{X\}_{n+1} = \{Y^*\}_{n+1} \quad (18)$$

Burada,

$$[M^*] = \left[\frac{1}{\Delta t} [M] + \theta [K] \right] \quad (19)$$

$$\{Y^*\}_{n+1} = \left[\frac{1}{\Delta t} [M] - (1-\theta) [K] \right] \{X\}_n + \theta \{Y\}_{n+1} + (1-\theta) \{Y\}_n \quad (20)$$

ile ifade edilir.

Okuyucuya sunulan yöntemin daha anlaşılır olması için 3.1 ve 3.2 no.lu bölümlerin tek boyutlu fiziksel uzay durumuna olan uygulamaları EK-2'de verilmiştir.

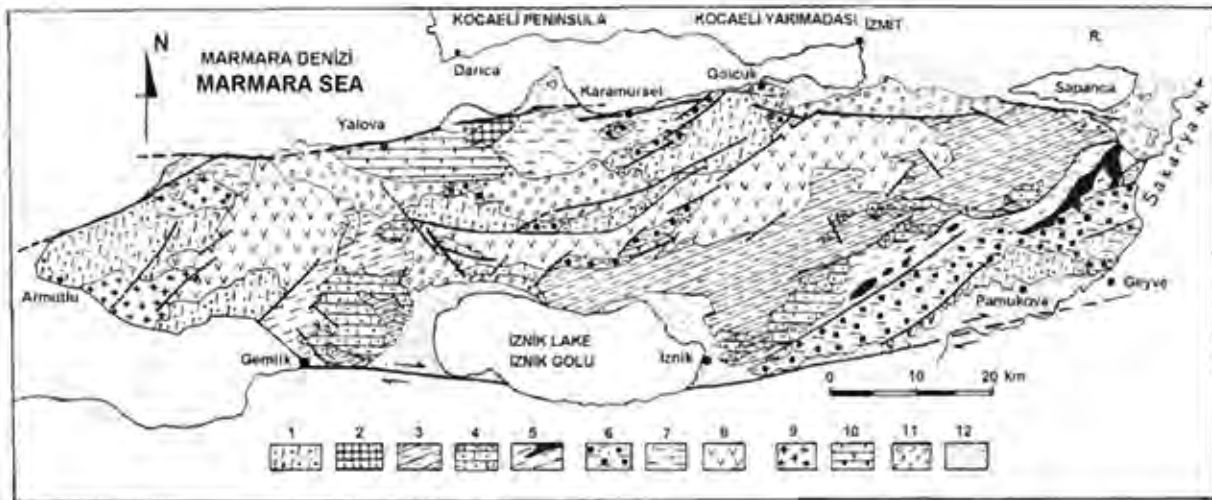
4. UYGULAMA

Yukarıda sunulan yöntem, MTA (1996) ve Pfister vd. (1997, 1998)'nin ayrıntılı olarak çalıştıkları Armutlu'daki jeotermal sahasına uygulanmıştır. Önce bölgenin jeolojisi ve yapılan çalışmalar kısaca özetlenmiş, daha sonra yukarıda sunulan sayısal yöntem kullanılarak uygulamalar verilmiştir.

4.1. Armutlu Jeotermal Alanının Jeolojisi

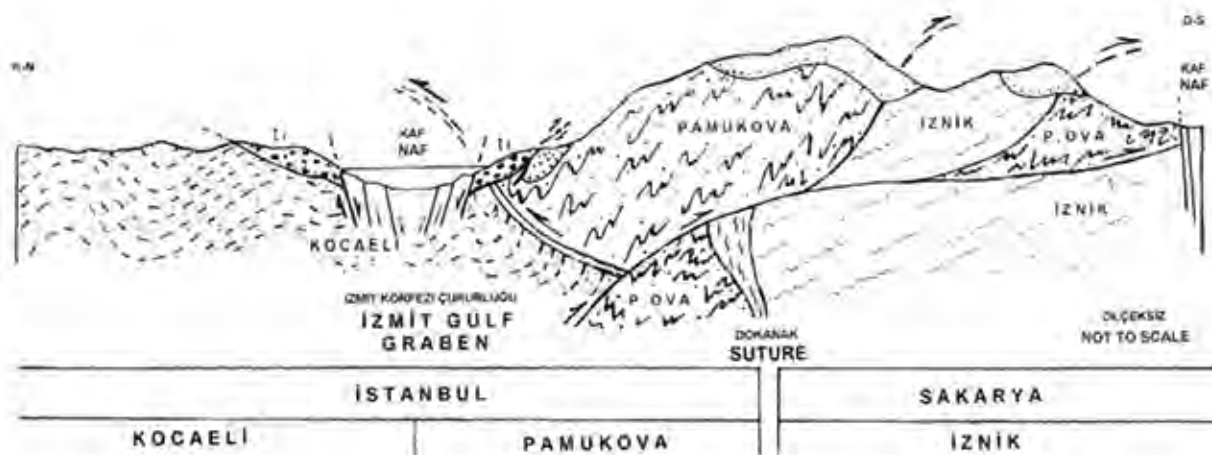
Armutlu Yarımadası, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'nin Kocaeli Körfezi'nden geçen kuzey ve Gemlik Körfezi'nden geçen güney kolları arasında sınırlanmış bir yarımadadır. Yarımada'nın şekli, dağlar ve vadiler KAFZ'nun sağ yanal atımına bağlı oluşmuş irili ufaklı faylarla şekillenmiştir. Armutlu Yarımadası'nın jeolojisi birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (örneğin; Akartuna, 1968; Bargu, 1997; Seymen, 1995; Hoşgören, 1995). Şekil 2 ve 3'te Armutlu Yarımadası'nın genel jeolojisi ve kuzey-güney yönünde bir jeolojik kesiti verilmiştir. İznik metamorfikleri, Pamukova metamorfikleri, Geyve meta-ofiyoliti ve Armutlu-Ovacık zonu, Fıstıklı graniyoti Armutlu Yarımadası'nda yüzlek veren birimlerdir. Prekambriyen - Alt Paleozoyik yaşlı olduğu düşünülen Pamukova Metamorfikleri bölgenin temelini oluşturur. Alt Triyas yaşlı Taşköprü formasyonu ve Eosen yaşlı Sarısu formasyonu,

temeli örten sedimanter ve volkano- sedimanter birimlerdir. Bu birimler, yer yer Eosen yaşlı Fıstıklı granitoyiti tarafından kesilmiştir. Genç yaşlı birimler Kılınç, Yalakdere ve Altınova formasyonlarından oluşmaktadır. Holosen yaşlı birimler ise, alüvyal ve delta çökelleridir (Seymen, 1995).



Şekil 2. Armutlu Yarımadası'nın basitleştirilmiş jeoloji haritası (Seymen, 1995) (1. Pamukova metamorfitleri; 2. Balkaya formasyonu; 3. İznik metamorfitleri; 4. Alıçayla kireçtaşı; 5. Ofiyolit; 6. Bakacak formasyonu; 7. İncebel formasyonu, 8. Sarısu volkanitleri; 9. Fıstıklı granitoyiti; 10. Kılınç formasyonu; 11. Pliyosen çökelleri; 12. Güncel çökeller).

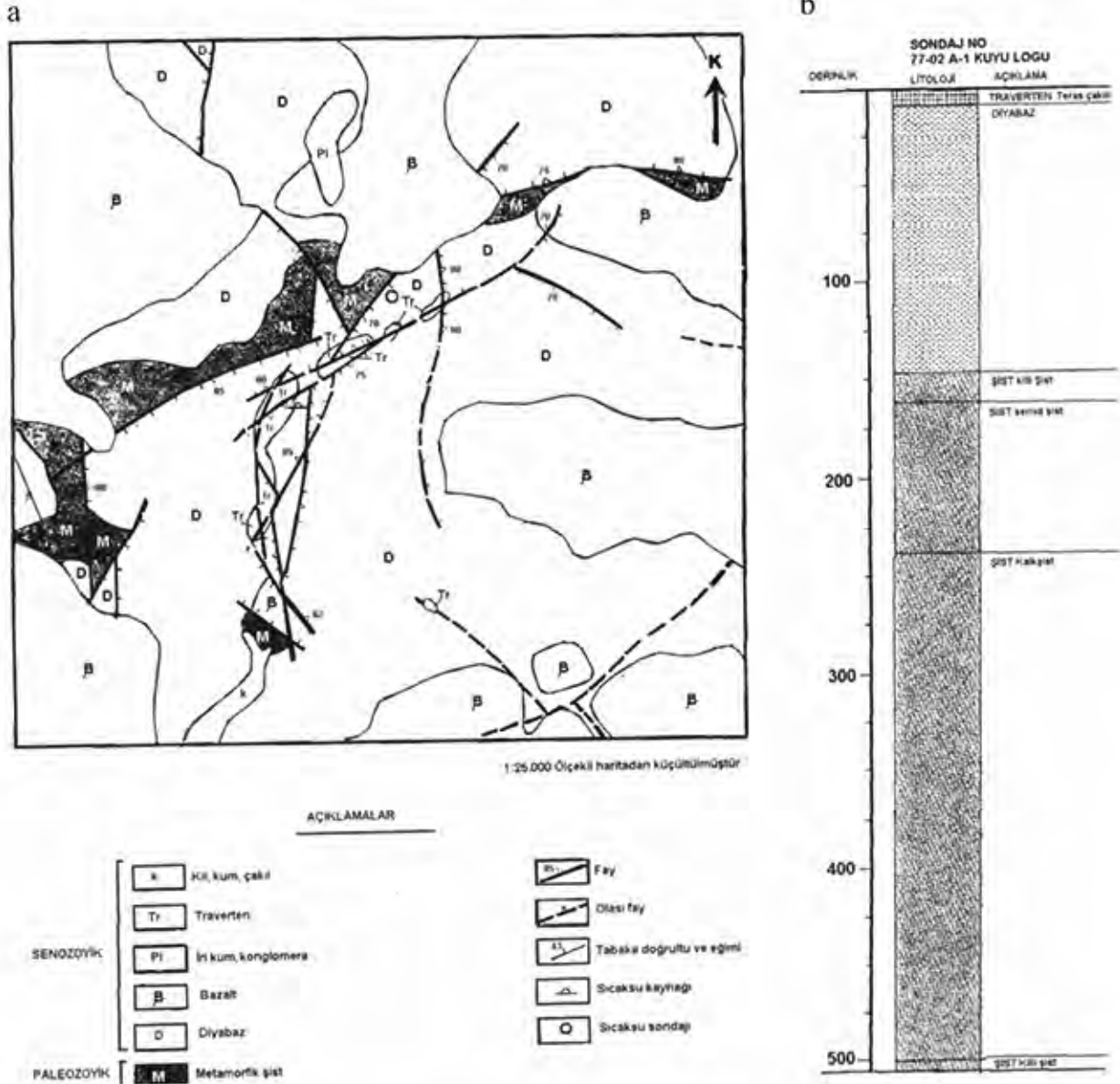
Figure 2. Simplified geological map of the Armutlu Peninsula (Seymen, 1995) (1. Pamukova metamorfites; 2. Balkaya formation; 3. İznik metamorfites; 4. Alıcıyayla limestone; 5. Ophiyolitic metaolistostrom; 6. Bakacak formation; 7. İncebel formation, 8. Sarısu volcanites; 9. Fıstıklı grantoid; 10. Kılınc formation; 11. Pliocene detritics; 12. Recent deposits).



Şekil 3. Armutlu Yarımadası'nın kuzey-güney yönünde bir jeoloji kesiti (Seymen, 1995).
Figure 3. A geological N-S cross-section of İzmit Gulf (Seymen, 1995).

Figure 3. A geological N-S cross-section of İzmit Gulf (Seymen, 1995).

Armutlu jeotermal sahasında yüzlek veren birimler ise, Paleozoyik şistler ve Senozoyik yaşlı bazalt ve diyabazdan oluşmakta olup, en üstte konglomera, traverten, kum, kil ve çakıl karışımı çökeller bulunmaktadır (MTA, 1996). MTA'nın yapmış olduğu 77-02 A1 no.lu sondajın verisine göre, üstte yaklaşık 10 m kalınlığında çakıl karışımı traverten ve bunun altında 150 m'ye kadar diyabaz kesilmiştir (Şekil 4). Daha altta 500 m'ye kadar kalkışistlerin ve bunun altında ise killi şistlerin bulunduğu belirlenmiştir.

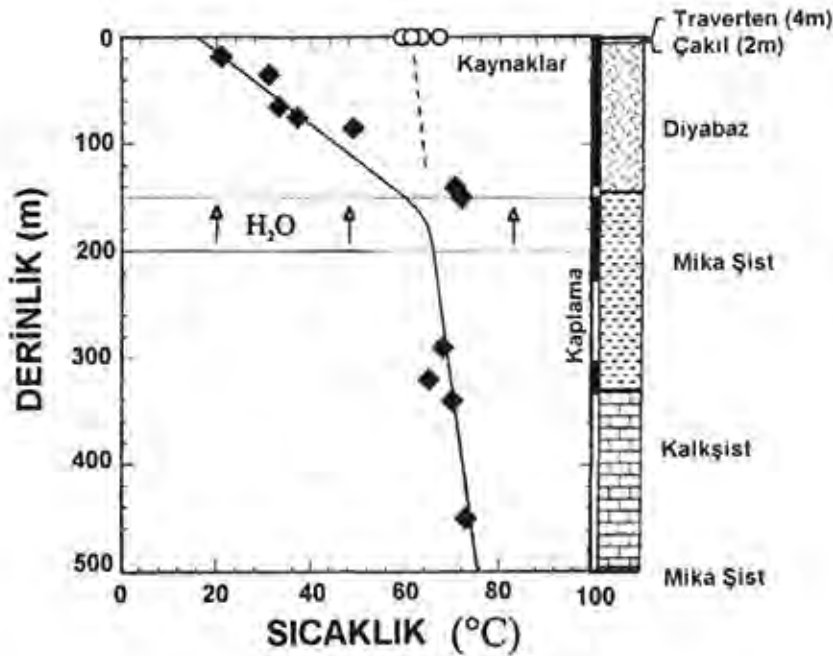


Şekil 4. (a) Armutlu jeotermal sahasının jeolojisi ve (b) 77-02 A1 sondaj kuyusunun logu (MTA, 1996).

Figure 4. (a) Geology of Armutlu geothermal field and (b) geologic log of 77-02 A1 well (MTA, 1996).

4.2. Sıcaklık Ölçümleri

Pfister vd. (1997,1998), Armutlu kaplıcasında MTA'nın açtığı bir sondaj kuyusunda su debisi ve sıcaklık ölçümleri yapmıştır. Doğal çıkış yapan kaplıca suyunun sıcaklığı çalıştırılan 3 kaplıcada 54-69°C olup, debisi 5 lt/s'dir. MTA'nın açmış olduğu 77-02 A1 no.lu sondajdaki sıcaklık 77°C ve debisi 11 lt/s'dir. Kaplıca kaynaklarının çıkış yapmadığı alanda yüzeydeki kayanın sıcaklığı ise, 16°C olarak ölçülmüştür. Armutlu kaplıcasındaki radon gazı çıkışının da yüksek olduğu belirtilmektedir (Pfister vd. 1997, 1998). Şekil 5, ölçüm yapılan kuyuda jeolojik birimler ile sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şist ile diyabazdaki sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında, şistin ısı iletkenliğinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre, her iki kaya türünün geçirgenliğinin farklı olmasından kaynaklanma olasılığının da yüksek olduğu söylenebilir. Ana kaya ile kaplıca kaynaklarındaki sıcaklık farklılığı da yeryüzüne doğru yükselen ısınmış yeraltısuyunun adveksiyon etkisiyle ilişkilendirilebilir. Pfister vd. (1997,1998); açılan sondaj kuyusunda gözlenen derinliğe bağlı sıcaklık değişimini, adveksiyon etkisini içeren kararlı ısı akış denklemini kullanarak kuramsal olarak açıklamaya çalışmışlardır. Bunun için 150 m derinlikte yeraltısuyunun akış hızının 0.5 m/yıl olması gerektiğini belirtmişlerdir.



Şekil 5. Armutlu jeotermal sahasında bir sondaj kuyusunda kesilen jeolojik birimler ve sıcaklık dağılımı (Pfister vd., 1998).

Figure 5. The geologic units crossed by a well in Armutlu geothermal field and temperature distribution (Pfister et al., 1998).

4.3. Sayısal Çözümler

Bu bölümde Pfister vd. (1998)'nin 4.2 nolu bölümde sunulan ölçümleri 3. bölümde verilen sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözümlenmiştir. Sayısal çözümleme-

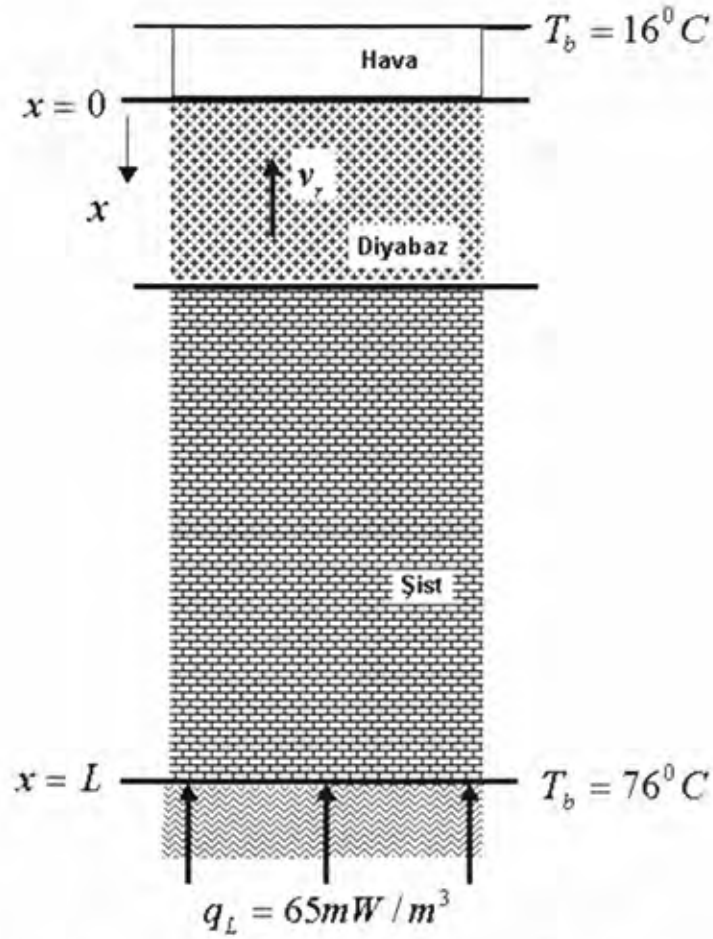
lerde üç farklı durum öngörülmüştür: (a) Durum 1: Isı akışı sadece ısı iletkenliğine bağlı, adveksiyon yok, (b) Durum 2: Isı iletkenliği ve adveksiyon (sıvı yükseliş hızı 30 mm/yıl) (c) Durum 3: Isı iletkenliği ve adveksiyon (sıvı yükseliş hızı 100 mm/yıl).

Durum 1'de ısı akışı tamamen kaya kütlelerinin ısı iletkenliğine bağlıdır. Burada sunulan tüm çözümlerde kaya kütlelerinin yanı sıra, kaya yüzeyi ile temasta bulunan hava kütleleri de oluşturulan sonlu elemanlar ağına dikkate alınmıştır. Böyle bir modellemenin bir amacı hava ile temasta olan kaya yüzeyinin sıcaklığının hava ile aynı olmama olasılığını gözönüne almak içindir (Aydan vd., 1985, 1986). Sayısal çözümlemede kullanılan kaya ve hava kütlelerinin fiziksel ve ısısal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Mıkaşist ile kalkıştin ısısal özellikleri aynı olup, diyabazın ısı iletkenlik katsayısının mıkaşistinkinin %20'si olduğu belirlenmiştir. Bu belirlemede ölçülen sıcaklığın derinlikle dağılımı ve geriye dönük analiz sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu değer, Pfister vd. (1997)'nin kullandığı değerlerden daha küçüktür. Şekil 6, sayısal modelde kullanılan sınır koşullarını göstermektedir. İlk sıcaklık dağılımı bilinmediği için, kuyu tabanı sıcaklığının rezervuar sıcaklığı ile aynı olduğu varsayılarak tüm bölgenin ilk sıcaklığı 75°C ve hesaplama süresi 25000 yıl olarak alınmıştır. Şekil 6'da seçilen bazı noktalardaki sıcaklığın zamana bağlı değişimi de görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere, 7000 yıl sonra sıcaklık dağılımı kararlı sıcaklık durumuna erişmektedir. Şekil 7, Durum 1 ve 2 için seçilen noktalardaki sıcaklığın zamana bağlı değişimini göstermektedir. Bu şekle göre, adveksiyonun varlığında sıcaklık değerleri artmaktadır. 25000'inci yıldaki üç farklı durum için yapılan çözümlemeler sonucu elde edilen sıcaklığın derinlikle değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu durum, Pfister vd. (1998)'nin çözümlediği kararlı ısı akış durumuna da karşılık gelmektedir. Durum 1'de hesaplanan sıcaklık dağılımı, ölçülen alt değer sıcaklık ölçümleri ile oldukça uyumludur. Durum 2'de hesaplanan sıcaklığın derinlikle değişimi ise, ölçülen üst değerlere yakındır. Armutlu jeotermal alanındaki sıcaklık dağılımının Durum 1 ile 2'de hesaplanan değerlerin arasında olduğu, Durum 3'te hesaplanan sıcaklığın ise, kaynak yakınındaki kaya kütlelerinin de yansıttığı söylenebilir. Yüzeye yakın bölgedeki farklılık, büyük bir olasılıkla yüzey sınır koşulunun etkisinden kaynaklanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da, yeraltısuyunun yukarıya doğru akış hızının Pfister vd. (1997)'nin belirlediğinden oldukça düşük olmasıdır.

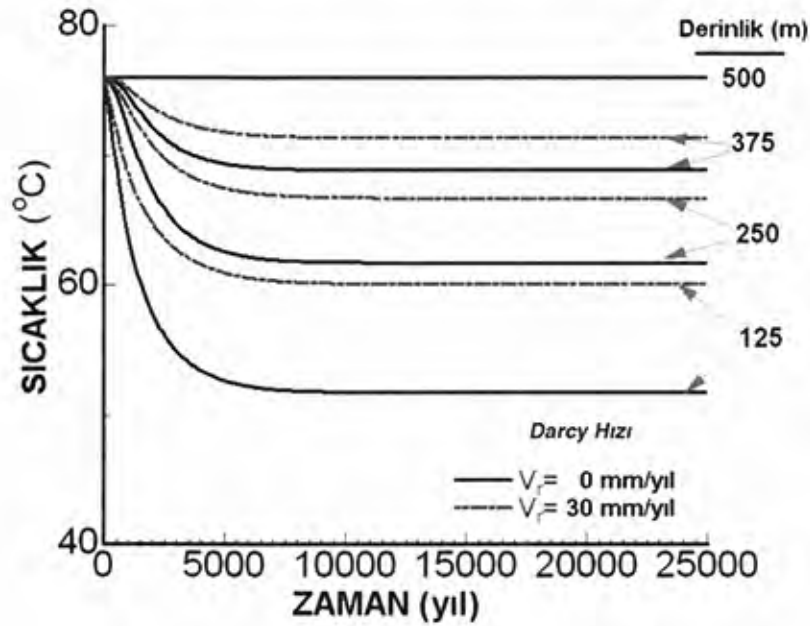
Çizelge 1. Sayısal çözümlerde kullanılan termo-mekanik malzeme özellikleri.

Table 1. Thermo-mechanical properties used in numerical analyses.

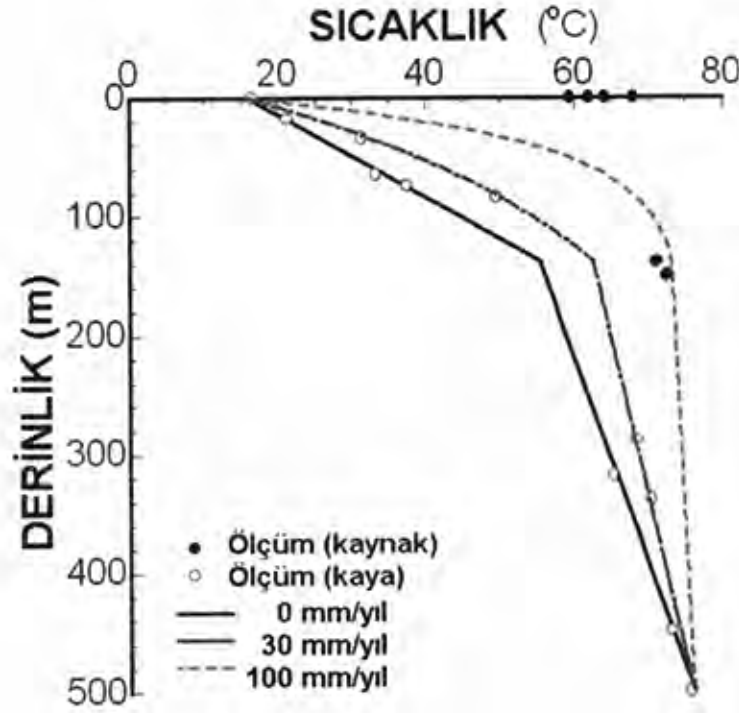
Parametre	Şist	Diyabaz	Hava
Katının ısısal iletkenlik katsayısı ($Wm^{-1}K^{-1}$)	2.7	0.54	-
Sıvının ısısal iletkenlik katsayısı ($Wm^{-1}K^{-1}$)	0.6	0.6	0.026
Katının yoğunluğu (kgm^{-3})	2600	2600	-
Sıvının yoğunluğu (kgm^{-3})	1000	1000	1.2
Katının özgül ısı ($kJkg^{-1}K^{-1}$)	0.89	0.89	-
Sıvının özgül ısı ($kJkg^{-1}K^{-1}$)	4.187	4.187	1.0
Gözenek oranı (%)	10	10	100
Isı enerjisi üretim miktarı ($W m^{-3}$)	1.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}	-



Şekil 6. Sayısal çözümlemede kullanılan model ve sınır koşulları.
 Figure 6. The model used in numerical analyses and boundary conditions.



Şekil 7. Seçilen bazı derinliklerde sıcaklığın zamanla değişimi.
 Figure 7. Variation of temperature at selected depths.



Şekil 8. Sıcaklığın derinlikle değişimi ve ölçümlerle karşılaştırılması.

Figure 8. Variation of temperature with depth and comparison with measurements.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karışım kuramına göre gözenekli kaya kütlelerinde ısı akışının ana denklemleri sunulmuştur. Daha sonra bu denklemlerin sonlu elemanlar şeklinin formülasyonu verilmiş ve fiziksel olarak tek boyutlu bir problem için sonlu elemanlar formülasyonundaki matrisler eşparametre elemanı kullanılarak açık bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca bu çözüm yöntemi, Armutlu jeotermal sahasındaki ısı akışı ile ilgili yapılan ölçümlerin sayısal analizine uygulanmıştır. Jeotermal alanda düşey yönde sıvı akışının adveksiyon etkisinin gözönüne alındığı üç farklı durum için 25000 yıllık bir zaman dilimi düşünülerek yapılan sayısal çözümlemenin sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Ayrıca jeotermal sahasında kararlı ısı akış durumuna yaklaşık 7000 yılda erişildiği hesaplanmıştır. Sadece kararlı ısı akış durumunda adveksiyon etkisini düşünerek Pfister vd. (1997)'nin ölçüm sonuçları için yaptıkları çözümlerden elde edilen malzeme özellikleri ve adveksiyon etkisi yapan yeraltısuyunun yukarıya doğru yükseliş hızının burada yapılan çözümlerdekilerden farklı olduğu görülmüştür. Bu farklılığın büyük bir olasılıkla, kararsız ısı akış durumundan kararlı akış durumuna geçişte kararsız dönemdeki ısı akışının etkilerinin sadece kararlı akış yaklaşımında gözönüne alınamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir deyişle, bu tür modellemelerde baştan kararsız ısı akışına dayanan çözümlemenin daha gerçekçi olacağı söylenebilir. Ayrıca, yeraltısuyunun adveksiyon etkisinin ısı akışında oldukça önemli bir role sahip olduğunun burada bir kez daha vurgulanmasında yarar görülmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazar, burada sunulan çalışmanın literatüre kazandırılması ve okuyucu için daha anlaşılır hale gelmesi için yaptıkları öneriler ve gösterdikleri anlayış için makaleyi değerlendiren Prof. Dr. Mehmet Ekmekeçi'ye ve dergi editörü Prof. Dr. Reşat Ulusay'a teşekkürü bir borç bilir.

EK-1: Zaman Uzayında Ayrıklandırma

Eşitlik 17'deki sonlu elemanlar denklemi herhangi bir zaman için geçerli olup, örneğin $(m + \theta)$ zaman basamağı için aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$[M] \{ \dot{X} \}_{(m+\theta)} + [K] \{ X \}_{(m+\theta)} = \{ Y \}_{(m+\theta)} \quad (\text{EK1-1})$$

θ 'nın değerinin 0 ile 1 arasında değiştiği varsayılmıştır. $(m + \theta)$ zaman basamağı için $\{X\}$ değişkeninin Taylor açılımı ise,

$$\{X\}_m = \{X\}_{(m+\theta)-\theta} = \{X\}_{(m+\theta)} - \frac{\partial \{X\}_{(m+\theta)}}{\partial t} \frac{\theta \Delta t}{1!} + 0^2 \quad (\text{EK1-2})$$

$$\{X\}_{m+1} = \{X\}_{(m+\theta)+(1-\theta)} = \{X\}_{(m+\theta)} + \frac{\partial \{X\}_{(m+\theta)}}{\partial t} \frac{(1-\theta)\Delta t}{1!} + 0^2 \quad (\text{EK1-3})$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik EK1-2 $(1-\theta)$ ile Eşitlik EK1-3 ise θ ile çarpılıp toplanırsa,

$$\{X\}_{(m+\theta)} = \theta \{X\}_{m+1} + (1-\theta) \{X\}_m \quad (\text{EK1-4})$$

gibi bir ilişki elde edilecektir. Benzer şekilde, Eşitlik EK1-3 ve EK1-2'deki denklemlerin farkı ise aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\{ \dot{X} \}_{(m+\theta)} = \frac{\{X\}_{(m+1)} - \{X\}_m}{\Delta t} \quad (\text{EK1-5})$$

Yine benzer şekilde, $\{Y\}_{(m+\theta)}$ için aşağıdaki gibi kolayca bir ilişki elde edilebilir.

$$\{Y\}_{(m+\theta)} = \theta \{Y\}_{m+1} + (1-\theta) \{Y\}_m \quad (\text{EK1-6})$$

Yukarıdaki ilişkiler Eşitlik 17'de kullanılırsa, Eşitlik 18'de verilen ilişki elde edilir.

EK-2: Tek Boyutlu Durum için Eşitlik 10'un ve Eşitlik 16'daki Matrislerin Özel Şekilleri

Fiziksel olarak tek boyutlu durum için ise, Eşitlik 10

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_r c_r v_r \frac{\partial T}{\partial x} + Q \quad (\text{EK2-1})$$

olarak ifade edilebilir.

Burada sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasını daha somut olarak gösterebilmek için, Eşitlik 16'da verilen denklemdeki matrisler tek boyutlu fiziksel uzay için açık şekilde elde edilecektir. Eş-parametrelili sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılırsa, Eşitlik 14'deki denklemdeki uzaysal interpolasyon fonksiyonu i no.lu düğüm noktasına sabitlenmiş yerel koordinat sisteminde

$$T(\xi) = a_i \xi + b_i, \xi = x - x_i, d\xi = dx \quad (\text{EK2-2})$$

ifadesiyle verilebilir. Eğer sıcaklık T düğüm noktaları ve j 'de bilindiği varsayılırsa, Eşitlik EK2-2'deki a_i ve b_i katsayıları aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ L & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_i \\ b_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \quad (\text{EK2-3})$$

Burada $L = x_j - x_i$ olup, Eşitlik (EK2-3)'de elde edilen a_i ve b_i katsayıları Eşitlik EK2-2'de yerlerine konduğunda,

$$T = \left(1 - \frac{\xi}{L}\right) T_i + \frac{\xi}{L} T_j \quad (\text{EK2-4})$$

gibi bir ilişki elde edilir. $N_i = 1 - \frac{\xi}{L}$, $N_j = \frac{\xi}{L}$ şeklindeki tanımlamalar Eşitlik EK2-4'te uygulanırsa aşağıdaki gibi bir ilişki elde edilecektir.

$$T = N_i T_i + N_j T_j \quad (\text{EK2-5})$$

Aşağıda verilen ilişkiler

$$[N] = [N_i \quad N_j] \{T_e\}^T = \{T_i \quad T_j\} \quad (\text{EK2-6})$$

Eşitlik EK2-5'de kullanılırsa

$$T = [N] \{T\} \quad (\text{EK2-7})$$

gibi bir ilişki elde edilecektir. Eşitlik EK2-7'deki ifadenin türevi aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{d\xi} = \frac{dN_i}{d\xi} T_i + \frac{dN_j}{d\xi} T_j \quad (\text{EK2-8})$$

Burada

$$\frac{dN_i}{d\xi} = B_i, \frac{dN_j}{d\xi} = B_j$$

olup, eğer

$$[B] = [B_i \quad B_j]$$

şeklinde yazılırsa bu eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{d\xi} = [B] \{T_r\} \quad (\text{EK2-9})$$

Burada $B_i = -\frac{1}{L}$, $B_j = \frac{1}{L}$ olup, yukarıda elde edilen ilişkilerin kullanılması halinde tek boyutlu fiziksel uzay için Eşitlik 16'daki matrislerin somut şekli aşağıdaki gibi elde edilir.

$$[M]_e = \frac{\rho c L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}; [K]_e = \frac{\lambda_T}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{v_T}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}; [Y]_e = \begin{bmatrix} -\hat{h}_i \\ \hat{h}_j \end{bmatrix} + \frac{Q_c L}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

KAYNAKLAR

- Akartuna, M., 1968. Armutlu yarımadasının jeolojisi. İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografı, 20, 1-105.
- Aydan, Ö., 2001. A finite element method for fully coupled hydro-thermo-diffusion problems and its applications to geo-science and geo-engineering. 10th IACMAG Conference, Austin, pp. 781-786.
- Aydan Ö., Ersen, A., Ichikawa, Y., and Kawamoto, T., 1985. Kalın beton kaplamalı maden kuyusu ve tunnel astarlarından betonun hidratasyonu sırasında oluşan sıcaklık dağılımları ve ısısal gerilmeler. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 9. Kongresi. Ankara, pp. 355-368.
- Aydan, Ö., Güloğlu, R., and Kawamoto, T., 1986. Temperature distributions and thermal stresses in tunnel linings due to hydration of cement. Tunnels and Underground (Tunnel to Chika), 17 (2), 29-36 (Japonca).
- Aydan, Ö., Tokashiki, N., and Seiki, T., 1996. Micro-structure models for porous rocks to jointed rock mass, Proceedings of the 3rd Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Techno-Press, Seoul, Korea, Vol.3, pp. 2235-2242.
- Bakhvalov, N., and Panasenko G., 1984. Homogenization: Averaging Processes in Periodic Media. Kluwer Academic Publication, London.
- Bargu, S., 1997. İzmit Körfezi'ndeki Pleyistosen taraçaları ve tektonik özellikleri. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 10 (1-2), 1-27.
- Bear, J., 1988. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York.
- Budiansky, B., and O'Connel, R.J., 1976. Elastic moduli of a cracked solid. International Journal of Solids and Structures, 12, 81-97.

- Fowler, C.M.R., 1990. *The Solid Earth - An Introduction to Global Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hoşgören, M.Y., 1995. İzmit Körfezi havzasının jeomorfolojisi. İzmit Körfezi'nin Kuvaterner İstifi, E. Meriç (ed.), 343-348.
- Jones, R.M., 1975. *Mechanics of Composite Materials*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- MTA, 1996. *Türkiye Jeotermal Envanteri*. MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Pfister, M., Rybach, L., and Şimşek, Ş., 1997. Geothermal reconnaissance of the Marmara Sea Region (NW Turkey). *Active Tectonics of Northwestern Anatolia-The Marmara Poly-Project*, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, pp. 503-535.
- Pfister, M., Rybach, L., and Şimşek, Ş., 1998. Geothermal reconnaissance of the Marmara Sea Region (NW Turkey): surface heat flow density in area of active continental extension. *Tectonophysics*, 291, 77-89.
- Seymen, İ., 1997. İzmir Körfezi ve çevresinin jeolojisi. İzmit Körfezi'nin Kuvaterner İstifi, E. Meriç (Ed.), 259-267.
- Tokashiki, N., and Aydan, Ö., 2008. Evaluation of deformability properties of rocks with overlapping inclusions by different averaging methods. *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India, pp. 797-804.
- Tokashiki, N., Aydan, Ö., Kyoya, T., and Sugawara, K., 1998. A comparative study on assessment of mechanical properties of porous and heterogeneous rocks by various averaging methods, *Proceedings of the 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE98*, Springer, Udine, pp. 401-410.
- Trusdell, C.A., and Toupin, R.A., 1960. The classical field theories. In: S. Flügge (Ed.) *Handbuch der Physik III/1*, Berlin, Springer Verlag, 226-793.

BOLU CİVARINDAKİ METAKRİSTALİN KAYAÇLARIN AYRIŞMA DERECEsİNİN İNCELENMESİ

Investigation of Alteration Degree of Metacrystalline Rocks in the Vicinity of Bolu, Turkey

Recep KILIÇ¹, Koray ULAMIŞ¹, Yusuf Kağan KADIOĞLU¹, Metin YURDAKUL²

¹ Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06100 Tandoğan, Ankara

² NETCAD Ulusal Cad ve GIS Çözümleri A.Ş., Cyberpark No. 409, 06800 Bilkent, Ankara

ÖZ

Metakristalin kayaçların jeomekanik özellikleri ayrışma derecelerine bağlı olarak yakın mesafelerde değişiklik göstermektedir. Gerede-Gümüşova otoyolunun da içinden geçtiği Asarsuyu vadisi (Bolu) ve çevresinde Devoniyen yaşlı Yedigöller formasyonu geniş alanlar kaplar. Bu çalışmanın amacı, Yedigöller formasyonu içerisindeki gnays, amfibolit ve granodioritten oluşan metakristalin kayaçların jeomekanik, mineralojik ve kimyasal özelliklerine göre ayrışma derecesini incelemektir. Ayrışma derecesinin incelenmesinde otoyolun kuzey kesiminde açılan yarma şevlerinden ve jeoteknik amaçlı sondaj verilerinden yararlanılmıştır. Metakristalin kayaçların Schmidt geri tepme sayısı 10 ile 39, nokta yükü dayanım indeksi 0.05 ile 6.21 MPa, P-dalga hızı 1613 ile 5588 m/s ve tek eksenli sıkışma dayanımı 12.74 ile 99.86 MPa arasında değişmektedir. Kayaçlarda karbonatlaşma, serisitleşme ve demiroksitleşme gibi bazı ayrışma ürünleri meydana gelmiştir. Hidrotermal etkiye uğramış bu kayaçlar ISRM sınıflamasına göre “taze” ile “tamamen ayrılmış”, Birleşik Ayrışma İndeksi’ne göre “ayrışmamış” ile “tamamen ayrılmış” arasında değişmektedir. Ayrıca, kimyasal indekslerden ateşte kayıp (LOI), değiştirilmiş ayrışma potansiyeli indeksi (MWPI) ve kimyasal alterasyon indeksi (CIA) değerleri aynı aralıklar arasında olup, metakristalin kayaçlar “taze” ile “tamamen ayrılmış” kayaç sınıfı arasındadır.

Anahtar Kelimeler : Birleşik ayrışma indeksi, Bolu, jeomekanik özellik, kimyasal bileşim, metakristalin kayaç.

ABSTRACT

The geomechanical properties of the metacrystalline rocks vary in narrow distances due to the effects of alteration. The Devonian aged Yedigöller formation cropping out in the Asarsuyu valley and around the Gerede-Gümüşova motorway, Bolu, Turkey, covers large areas. The aim of this study is to investigate degree of alteration of the gneiss, amphibolite and granodiorites involved by the Yedigöller formation based on their geomechanical, mineralogical and geomechanical properties. For the purpose, data from the previous geotechnical boreholes and road cuts on the northern slopes have been gathered. Schmidt hardness values range between 10 and 39, point load strength index is between 0.05 and 6.21 MPa, P-wave velocity is 1613 to 5588 m/s and the uniaxial compressive strength varies from 12.75

to 99.86 MPa. Several alteration products have developed in these rocks due to carbonisation, oxidation and serisitation. These rocks, subjected to hydrothermal effects, are classified as "fresh" to "completely weathered" according to ISRM weathering classification and "fresh" to "completely altered" according to Unified Alteration Index. In addition, the values of the loss on ignition (LOI), modified weathering potential index (MWPI) and chemical alteration index (CIA) range between the same limits, and the metacrystalline rocks are classified as "fresh" to "completely weathered".

Keywords : Unified Alteration Index, Bolu, geomechanical properties, chemical composition, metacrystalline rock.

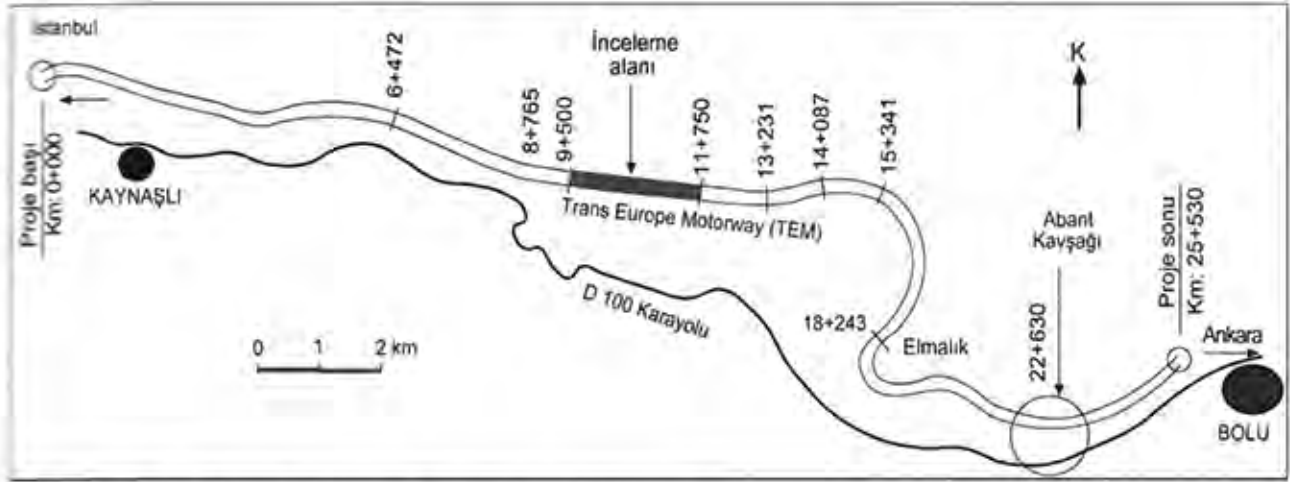
1. GİRİŞ

Kaya kütlelerinin jeomekanik özelliklerini kontrol eden faktörlerin başında jeolojik yapı, mineralojik bileşim, ayrışma derecesi ve süreksizlikler gelmektedir. Ayrışma ile taneler arasındaki kohezyon ve içsel sürtünme açısındaki değişime bağlı olarak, kaya kütlelerinde inşa edilen mühendislik yapılarında farklı türlerde duraylılık sorunları ortaya çıkabilmektedir. Kayaçların ayrışma derecelerini belirlemek amacıyla farklı araştırmacılar tarafından gözlemsel, kimyasal, petrografik ve jeomekanik özelliklere bağlı sınıflamalar önerilmiştir (Iliev, 1966; Ruxton, 1968; Parker, 1970; İrfan ve Dearmann 1978; Harnois, 1988; Komoo and Yaakup, 1990; Price, 1993; ANON, 1995; Tuğrul ve Gürpınar 1997; Kılıç ve Bilgehan, 1999; Gupta ve Rao, 2000; Güroçak ve Kılıç, 2005; ISRM, 2007; Ündül, 2007). Ancak bunların bir çoğu gözlemsel verilere ve petrografik tanımlamalara dayalıdır. Birleşik Ayrışma İndeksi (UAI) sınıflaması ayrışma derecesini sayısal olarak ifade etmektedir (Kılıç, 1999). Koçbay (2003), UAI'ndeki tek eksenli sıkışma dayanımı yerine nokta yükü dayanım indeksini kullanarak Modifiye Birleşik Ayrışma İndeksi (MUAI) sınıflama sistemini geliştirmiştir. Bu çalışmada, Gümüşova-Gerede Otoyolunun Bolu Dağı geçidindeki (Şekil 1) kuzey yarmalarında açılacak şevlerin duraylılığının sağlanması için alınacak önlemlerin belirlenmesinde, Asarsuyu vadisindeki metakristalin kayaçların jeomekanik özelliklerinin yanı sıra, yatay ve düşey yöndeki ayrışma dereceleri arazi gözlemleri ve laboratuvar yöntemleri ile incelenmiştir. Kayaçların düşey yöndeki dağılımlarının belirlenmesinde ve karot örneklerin elde edilmesinde, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından Yüksel Proje kontrollüğünde, Astaldi S.p.A.'ya yaptırılmış olan jeoteknik amaçlı sondajlardan yararlanılmıştır. Şevi oluşturan metakristalin kayaçların ayrışma dereceleri ISRM (2007), Birleşik Ayrışma İndeksi (Kılıç, 1999), kimyasal indekslerden ateşte kayıp (LOI), değiştirilmiş ayrışma potansiyeli indeksi (MWPI) ve kimyasal alterasyon indeksi (CIA) değerlerine göre incelenmiş ve bölgelendirme yapılarak kesitler üzerinde gösterilmiştir.

2. JEOLojİ

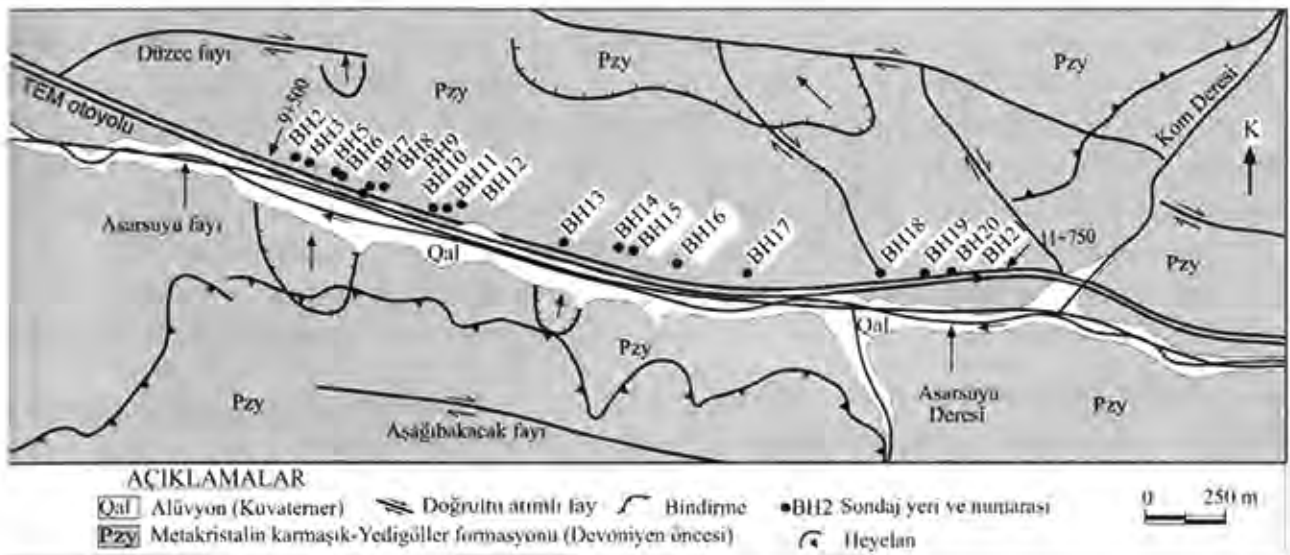
Gümüşova – Gerede otyolunun Km 9+500 ile 11+750 arasındaki kesiminde kalan inceleme alanında Devoniyen öncesi yaşlı Yedigöller formasyonuna ait metakristalin kayaçlar ile Kuvaterner yaşlı Asarsuyu formasyonuna ait alüvyonlar bulunmaktadır (Şekil 2). Yedigöller formasyonu; amfibolit, gnays, metadiyorit ve metakuvvars diyoritten oluşmaktadır (Aydın

vd.,1987). Metakristalin kayaları yer yer keskin dokanakla aplit, andezit, bazalt ve diyabaz bileşimindeki dayklar kesmektedir. Amfibolitler meta bazik kökenli olup koyu renkli, oldukça kırıklı ve makroskopik olarak koyu yeşil, kahverengi ve ince tanelidir. Gnayslar granitik kökenli, gri, koyu gri ve orta-ince tanelidir (Barka ve Lettis, 2000). Ayrışmanın daha belirgin olduğu kısımlarda killi ve kumlu kalıntı malzeme görünümündedir. Killi silt, kumlu silt, bloklu çakıllı kum aralanmasından oluşan Kuvaterner yaşlı Asarsuyu formasyonu, Asarsuyu Deresi yatağında bulunmakta olup, bu incelemenin dışında kalmaktadır.



Şekil 1. İnceleme alanının yerbulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Barka ve Lettis 2000'den değiştirilerek)

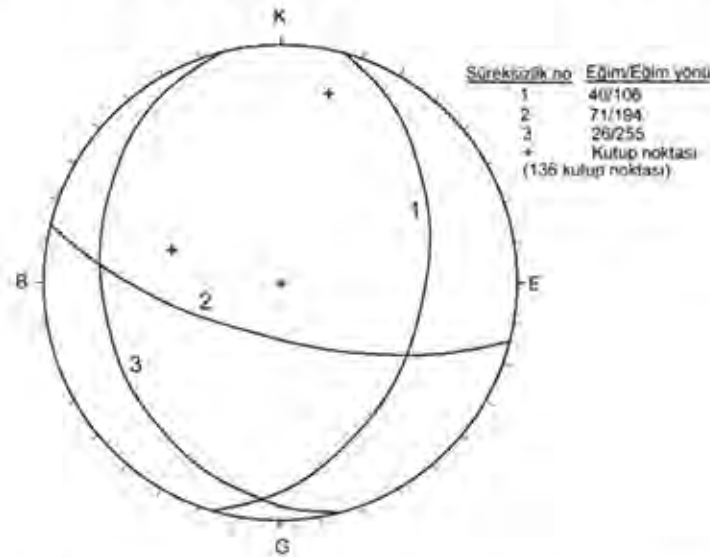
Figure 2. Geological map of the study area and its vicinity (Modified from Barka ve Lettis 2000)

Ketin (1966) tarafından "Pontitler", Şengör ve Yılmaz (1981) tarafından ise "Batı Pontitler" olarak tanımlanan kuşaklar içerisindeki çalışma alanında, paleotektonik döneme ait bindirmeler ve neotektonik döneme ait Kuzey Anadolu Fayı ve yan kolları başlıca tektonik yapılardır (Dalgıç,

1994). Kuzey Anadolu Fayı'nın kuzey kolunu oluşturan ve 12 Kasım 1999 depremine neden olan Düzce Fayı, inceleme alanındaki otoyolun Viyadük-1 bölgesinden geçmiş ve viyadüklerde hasar meydana getirmiştir. Tektonizmanın etkisinde kalan metakristalin kayalarda çok sayıda kırık ve çatlak sistemleri gelişmiştir.

3. METAKRİSTALİN KAYAÇLARIN KÜTLE ÖZELLİKLERİ

İnceleme alanındaki metakristalin kayaların yüzleklerinde; süreksizlikler ölçülmüş, Schmidt çekici geri tepme sayıları belirlenmiş ve el örnekleri alınmıştır. Ayrıca, Astaldi S.p.A tarafından yapılan ve derinlikleri 17.00 m ile 47.00 m arasında değişen toplam 634 m uzunluğundaki 19 adet jeoteknik amaçlı sondajdan alınan karotlar incelenerek, farklı ayrışma derecelerindeki kayalardan örnekler alınmıştır. İnceleme alanında tektonizmanın etkisi ile başlıca 40/106, 71/194 ve 26/255 yönelimli süreksizlikler gelişmiştir (Şekil 3). Ayrıca gelişigüzel süreksizlikler de mevcuttur (Yurdakul, 2006). Süreksizliklerin farklı doğrultu ve eğime sahip olması, hidrotermal çözeltilerin sirkülasyonunu kolaylaştırmış ve ayrışma derecesinin kısa mesafelerde değişmesinde etkili olmuştur. Süreksizliklerin jips, kil, kalsit ve silis dolgulu, bir kısmının ise yüzey suları tarafından yıkanmış olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Kuzey şevlerdeki hakim eklem takımlarının yönelimleri.

Figure 3. Orientation of the dominant joint sets on the northern slopes.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İnceleme alanındaki metakristalin kayaların fiziksel, jeomekanik, mineralojik - petrografik, jeokimyasal özellikleri ve ayrışma dereceleri, yüzeyden ve sondajlardan belirli aralıklarla alınan örnekler üzerinde laboratuvarında incelenmiştir.

4.1. Fiziksel ve Jeomekanik Özellikler

Toplam 11 adet karot örneğinin birim hacim ağırlık, Schmidt geri tepme sayısı, P ve S- dalga hızları (ASTM D2845-96, 1996a), nokta yükü dayanım indeksi (ASTM D 5731- 95, 1996b) ve tek eksenli sıkışma dayanımları (ASTM D2938-96, 1996c) belirlenmiştir.

4.2. Mineralojik ve Petrografik Özellikler

Farklı ayrışma derecelerindeki karotlardan ve kazı şevlerinden alınan örneklerin ince kesitleri hazırlanarak Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarı'nda incelenmiştir. Örneklerin mineralojik bileşimi ve genel dokusu incelenerek adlandırmaları Çizelge 1'de verilmiştir. Petrografik incelemelere göre bölgedeki kayaların metamagmatik kökenli, ileri dinamik metamorfizma etkisiyle kataklazma ve breşik yapılar kazanmış ve yer yer ilksel bileşimlerini yitirmiş oldukları belirlenmiştir. Karmaşık içerisinde çoğunluk sırasına göre; kuvars, plajiyoklaz, alkali feldispat ve amfibol bulunmaktadır. Kayaçalarda; milonitik doku ağırlıklı olmak üzere, lepidogranoblastik, nematoblastik, glomeraporfirik, holokristalin, milonitik ve breşik doku gözlenmektedir. Ayrışmadan dolayı mikroskop altında tanımlanması güç olan minerallerin tespiti amacıyla, ayrışmanın ileri derecede olduğu örneklerin mineralojik özellikleri X-ışınları çözümlemeleriyle (XRD) Ankara Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAUM)'nde Ni filtre, Cu K α radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm kayada kil mineralleri tanımlanarak yarı nicel yüzdeleri Brindley (1980), Gündoğdu (1982) ve Gündoğdu ve Yılmaz (1984) tarafından önerilmiş yaklaşımlara göre hesaplanmıştır. Ayrışma sonucunda illit ve simektit grubu kil mineralleri gözlenmektedir. Kil ve feldispat mineralleri başta olmak üzere; kuvars, kalsit ve analsim mineralleri de XRD incelemeleri sonucu kırınım desenlerinden belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

4.3. Jeokimyasal Özellikler

Metakristalin kayaların jeokimyasal özelliklerini incelemek üzere, sondajların farklı derinliklerinde karot alınabilen seviyelerden, renk ve doku farklılıklarının olduğu kesimlerdeki farklı ayrışma derecesine sahip 11 adet örnek alınmıştır. Analizler, Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarı'nda XRF Spectro X-Lab 2000 cihazı kullanılarak USGS standartlarına (Hillebrand, 1987) göre (G1, G2, WG1, gabro, amfibolit) kalibre edilerek yapılmıştır. Örneklerdeki ana oksit elementler ile tali elementlerin cinsi ve miktarı Çizelge 3'de verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarında bazı değer aralıklarının çok fazla olması, kayaların ayrışma derecelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

5. MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

Asarsuyu vadisi kuzey şevleri metakristalin kayalar içinde açılmış olup, metagranodiyorit, gnays ve amfibolit olarak üç alt kayaç grubuna ayrılmıştır. Kuzey şevleri boyunca Km: 9+500 ile Km: 11+750 arasında Astaldi S.p.A tarafından 19 adet jeoteknik amaçlı sondaj yapılmıştır (Zetaş, 2001). Sondajlar sırasında yeraltısuyu seviyesi derinliği ölçülerek birimleri temsil eden karot örnekleri alınmıştır. Kayaların mineralojik ve petrografik adlanmasına göre jeolojisi haritası ve kesiti hazırlanmıştır (Şekil 4). Km: 9+500 ile Km: 10+150 arasında yüzeyde amfibolit ve altında gnays ve metagranodiyorit, Km: 10+150 ile Km: 11+750 arasında ise yüzeyde gnayslar görülmektedir.

Kuzey şevlerinin farklı kesimlerindeki kayaların dayanımlarını belirlemek amacı ile Schmidt çekici geri tepme sayıları, arazide süreksizliklere dik yönde ve laboratuvarda karot

Çizelge 1. Örnek numarası ve derinliği, mineralojik bileşimi, genel dokusu ve kayaç adı.
 Table 1. Sample number and depth, mineralogical composition, texture and rock type.

Örnek No.	Derinlik (m)	Mineralojik bileşimi	Genel doku	Kayaç adı
BH2	25.3	Plajiyoklaz, tremolit, aktinolit	Glomeraporfirik	Amfibolit
BH3	23.0	Kuvars, plajiyoklaz	Milonitik	Milonitik gnays
BH5	39.0	Titanomanyetit, hematit, tremolit, aktinolit	Monokristalin	Monokristalin granodiyorit
BH9	14.7	Kuvars, feldispat, limonit	Breşik	Amfibolit
BH10	13.0	Tremolit, aktinolit, plajiyoklaz, manyetit ve pirit	Nematoblastik	Amfibolit
BH12	26.0	Plajiyoklaz, kuvars, a.feldispat, tremolit, aktinolit	Nematogranoblastik	Amfibol gnays
BH13	9.6	Kuvars, plajiyoklaz, alkali feldispat	Milonitik	Milonitik gnays
BH14	6.3	Kuvars, feldispat	Kataklastik	Milonitik gnays
BH14	15.5	Kuvars, plajiyoklaz, tremolit, aktinolit, epidot ve kuvars	Breşik	Epidot Amfibolit
BH14	20.5	Kuvars, biyotit, plajiyoklaz serisit	Porfirik	Granodiyorit porfir
BH14	41.1	Plajiyoklaz, ortoklaz, biyotit, kuvars	Lepidogranoblastik	Biyotit gnays
BH15	27.4	Kuvars, plajiyoklaz, serisit, klorit	Milonitik	Milonitik gnays
BH16	27.0	Kuvars, plajiyoklaz ve alkali feldispat	Milonitik	Milonitik gnays
BH17	46.5	Kuvars, plajiyoklaz ve feldispat	Milonitik	Amfibolit
BH19	20.5	Kuvars, a.feldispat plajiyoklaz ve muskovit	Holokristalin	Metagranodiorit
BH20	28.6	Kuvars, plajiyoklaz, alkali feldispat ve biyotit segregasyonları	Lepidogranoblastik	Biyotit gnays
BH21	22.8	Kuvars, alkali feldispat, plajiyoklaz, kalsit, epidot ve klorit	Blastokristalin	Milonitik gnays
N5	Yüzey	Klorit, kuvars, amfibol, manyetit	Milonitik	Metagranodiy.
N6	Yüzey	Kuvars, plajiyoklaz, zeolit	Milonitik	Milonitik gnays
N10	Yüzey	Kuvars, plajiyoklaz, klorit, alkali feldispat	Milonitik	Milonitik gnays
N11	Yüzey	Plajiyoklaz, tremolit, aktinolit, epidot, sfen	Nematoblastik	Amfibolit
N12	Yüzey	Kuvars, plajiyoklaz, ortoklaz, biyotit	Blastokristalin	Biyotit Gnays
N13	Yüzey	Amfibol, plajiyoklaz, kuvars, titanit, epidot, kalsit	Nematoblastik	Amfibolit
N14	Yüzey	Tremolit, aktinolit, plajiyoklaz, kuvars, sfen	Nematoblastik	Amfibolit
N15	Yüzey	Amfibol, uralit, plajiyoklaz, alkali feldispat	Kataklastik	Monzogabro
N16	Yüzey	Plajiyoklaz, alkali feldispat, kuvars, karbonatlaşma	Milonitik	Milonitik gnays
N17	Yüzey	Tremolit, aktinolit, plajiyoklaz, kuvars, titanit ve epidot	Nematoblastik	Amfibolit
N18	Yüzey	Pistasit ve %80 epidot, plajiyoklaz, kuvars	Nematoblastik	Pistasit epidotit
N19	Yüzey	Plajiyoklaz, amfibol, alkali feldispat, plajiyoklaz	Blastoholokristik	Meta monzo gabro
N20	Yüzey	Kuvars, biyotit, kalsit, biyotit	Lepidogranoblast.	Kalk biyotit şist
N21	Yüzey	Kuvars, plajiyoklaz, alkali feldispat, epidot, muskovit, biyotit	Lepidogranoblastik ve milonitik	Milonitik mika gnays
N22	Yüzey	Kuvars, alkali feldispat, biyotit	Milonitik	Milonitik gnays

Çizelge 3. Kayaçların ana oksit ve eser elementlerinin analiz sonuçları.

Table 3. Analysis results of the major oxide and trace elements of the rock samples.

Örnek No.	Birimi	BH2 (25.30)	BH3 (23.00)	BH5 (39.00)	BH8 (14.15-14.75)	BH8 (21.15-21.55)	BH9 (1 4.70)	BH10 (13.00)	BH14 (20.45)	BH15 (8.00-8.30)	BH15 (27.40)	BH18 (7.00-7.20)	BH19 (20.50)	BH20 (28.60)	BH21 (22.75)
Na ₂ O	%	0.105	2.488	1.845	0.104	2.026	2.519	3.670	1.254	3.298	1.112	2.988	2.860	2.932	6.727
MgO	%	5.957	4.879	4.538	7.155	5.731	1.678	0.863	6.533	2.799	3.953	1.978	2.408	2.195	1.918
Al ₂ O ₃	%	18.108	14.367	14.998	14.114	13.457	19.786	13.659	15.274	13.564	16.304	9.642	14.624	12.948	20.207
SiO ₂	%	41.650	54.130	54.430	50.010	56.440	59.110	64.110	51.810	64.210	54.760	74.870	64.320	67.760	56.500
P ₂ O ₅	%	0.018	0.158	0.104	0.034	0.073	0.168	0.091	0.063	0.144	0.184	0.079	0.163	0.184	0.144
SO ₃	%	0.258	0.114	0.123	0.001	0.060	0.013	2.146	0.001	0.004	0.001	0.001	0.028	0.001	0.000
Cl	%	0.007	0.040	0.030	0.009	0.018	0.000	0.008	0.065	0.013	0.001	0.000	0.000	0.005	0.003
K ₂ O	%	0.485	0.414	0.358	0.434	0.306	0.571	0.535	0.397	0.579	0.286	0.345	0.597	0.783	0.733
CaO	%	11.015	7.696	8.043	14.898	10.235	6.628	6.900	10.634	4.775	7.984	3.125	6.525	4.390	7.639
TiO ₂	%	0.606	0.669	0.570	0.389	0.391	0.475	0.250	0.496	0.411	0.513	0.309	0.364	0.464	0.168
V ₂ O ₅	%	0.050	0.034	0.047	0.037	0.024	0.012	0.006	0.041	0.019	0.023	0.012	0.015	0.014	0.010
Cr ₂ O ₃	%	0.035	0.194	0.145	0.056	0.055	0.070	0.023	0.032	0.197	0.071	0.025	0.128	0.375	0.200
MnO	%	0.236	0.213	0.199	0.211	0.172	0.157	0.098	0.267	0.122	0.219	0.075	0.117	0.112	0.069
Fe ₂ O ₃	%	19.602	12.381	13.188	11.007	9.121	6.419	5.571	11.351	7.913	11.471	4.880	6.485	6.250	3.970
Ateş kay.	%	2.179	1.900	1.700	1.402	1.718	2.281	1.618	1.503	1.546	2.020	1.237	1.671	1.296	1.657
TOPLAM	%	100.311	99.678	100.318	99.863	99.828	99.887	99.549	99.719	99.595	98.903	99.566	100.306	99.708	99.945
Co	ppm	118.0	39.9	47.0	43.6	65.0	31.0	165.0	94.0	33.9	43.0	28.9	31.0	30.0	24.0
Ni	ppm	31.3	21.3	9.4	40.2	14.3	11.3	2.4	38.7	17.9	2.4	15.0	10.5	21.8	14.2
Cu	ppm	79.8	57.0	28.5	133.9	47.5	12.7	758.5	39.7	40.4	31.5	48.3	2.3	11.5	4.5
Zn	ppm	172.5	122.6	100.4	62.7	72.8	45.4	1.5	132.1	69.1	106.2	37.7	66.3	48.6	23.9
Ga	ppm	15.1	15.9	14.5	12.9	13.1	14.5	9.3	15.6	12.6	15.9	10.0	12.4	12.3	15.4
Ge	ppm	1.0	0.6	2.7	0.9	1.5	0.9	1.9	1.3	1.6	0.9	1.8	1.1	1.3	1.4
As	ppm	0.9	2.8	1.4	1.0	0.9	0.6	0.7	1.1	2.1	1.7	1.9	1.5	1.4	0.5
Se	ppm	0.5	0.6	0.5	0.5	0.7	0.4	0.8	0.6	0.7	0.5	0.8	0.5	0.6	0.5
Br	ppm	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
Rb	ppm	18.6	9.0	9.5	10.5	6.0	14.2	11.8	7.4	17.1	5.7	7.4	18.3	17.9	17.6
Sr	ppm	71.8	190.7	130.4	146.6	207.0	113.7	89.6	136.9	217.2	190.6	177.1	216.7	232.6	364.1
Y	ppm	6.0	24.5	12.0	10.5	21.8	14.5	8.3	10.0	9.2	10.8	6.4	9.7	8.9	9.3
Zr	ppm	8.6	24.3	36.1	33.6	34.5	179.9	19.9	12.2	24.8	15.9	24.0	14.0	44.1	156.0
Nb	ppm	4.5	4.1	5.0	4.7	8.2	7.7	3.9	5.4	4.1	4.3	4.1	3.8	8.9	3.7
Mo	ppm	2.6	2.4	3.4	4.9	3.3	2.7	2.7	3.8	3.5	3.0	7.2	2.6	2.7	2.5
Ag	ppm	< 1.0	< 0.9	< 1.0	< 1.1	< 1.0	< 0.8	< 0.8	< 1.1	< 0.9	< 1.0	< 0.9	< 0.8	< 0.9	0.6
Cd	ppm	1.1	0.9	1.1	0.7	0.8	0.8	0.9	1.5	1.0	1.0	2.6	0.9	0.5	0.9
In	ppm	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	0.7	0.5	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sn	ppm	1.1	1.8	1.5	1.3	1.8	1.0	0.8	1.2	1.3	1.2	2.1	1.1	1.2	1.0
Te	ppm	1.2	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.3	1.2
Cs	ppm	9.0	3.6	3.7	3.1	4.1	4.6	4.5	3.8	3.6	3.7	3.6	3.5	3.7	3.2
Ba	ppm	87.0	70.8	48.6	62.1	61.6	54.9	57.8	81.4	128.1	73.7	59.5	118.2	334.1	139.0
La	ppm	11.3	9.3	7.6	7.4	13.9	18.2	16.0	7.5	9.5	11.8	11.9	7.3	7.6	11.6
Ce	ppm	10.0	15.6	21.2	10.0	10.0	33.7	31.0	10.0	10.0	16.9	10.4	10.0	25.1	10.0
Hf	ppm	8.0	6.1	5.5	8.2	6.0	5.0	16.0	5.7	5.1	5.4	5.1	3.2	3.5	2.9
Ta	ppm	11.0	8.8	7.0	12.0	8.3	4.8	25.0	8.0	7.1	6.9	7.4	4.0	5.0	4.0
Hg	ppm	2.0	2.0	2.0	1.6	2.6	1.6	2.9	2.2	2.5	1.6	2.8	1.7	2.0	1.8
Tl	ppm	1.8	1.6	1.5	1.4	1.5	1.2	1.4	1.6	1.3	1.4	1.1	0.9	1.3	1.2
Pb	ppm	1.8	1.5	1.5	1.7	3.5	3.6	2.5	1.5	1.8	2.3	1.5	0.6	4.9	2.7
Bi	ppm	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
Th	ppm	2.1	1.4	1.5	1.3	1.5	1.6	2.1	1.4	1.1	1.4	0.6	0.6	0.9	0.8
U	ppm	8.6	7.4	7.7	10.0	9.9	6.2	8.9	9.4	8.3	8.4	11.3	5.5	8.0	7.4

örnekleri üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Arazide, Schmidt çekici geri tepme sayısından dolayı şekilde belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı en düşük 18 MPa, en çok 67 MPa ve ortalama 40 MPa'dır (Çizelge 4). Laboratuvardaki geri tepme sayılarına göre ise, tek eksenli sıkışma dayanımı en az 18 MPa, en yüksek 54 MPa ve ortalama 35 MPa'dır. Laboratuvarda belirlenen nokta yükü dayanım indeksi en düşük 0.054 MPa ve en yüksek 6,208 MPa'dır. Metakristalin kayalarındaki ayrışma dikkate alınarak, özellikle volkanik kayalar için Norbury (1986) ve Koçbay ve Kılıç (2003)'ün önerdikleri görgül eşitlikler kullanılarak nokta yükü dayanım indeksi bilinen karotların tek eksenli sıkışma dayanımları hesaplanmıştır. Sondaj karotlarından seçilen 10 adet karot örneği üzerinde P-dalga hızı en düşük 1613 m/s ve en yüksek 5588 m/s, S-dalga hızı ise en düşük 788 m/s ve en yüksek 2590 m/s'dir. Metakristalin kayaların deneyle belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımları, en düşük 12.7 MPa ve en yüksek 99.9 MPa'dır (Çizelge 5).

Çizelge 4. Kayaların arazide ve laboratuvardaki ortalama Schmidt çekici geri tepme sayısı (SHV) ve yaklaşık tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c).

Table 4. Mean in-situ and laboratory determined Schmidt rebound values (SHV) and approximate uniaxial compressive strength (σ_c) values.

Deney yapılan yer	SHV	σ_c (MPa)	Kayaç tanımı
Km: 8+750	12	18	Amfibolit
Km: 8+750	10	16	Gnays
Km: 8+750	38	65	Gnays
Km: 8+750	10	17	Granodiyorit
Km: 9+000	39	67	Gnays
Km: 10+700	21	28	Gnays
Km: 10+700	23	32	Gnays
Km: 10+700	30	42	Gnays
Km: 11+000	31	51	Amfibolit
Km: 11+000	23	33	Granodiyorit
Km: 11+000	31	51	Granodiyorit
Km: 11+100	35	64	Amfibolit
Km: 11+700	20	38	Gnays
Km: 11+700	27	37	Amfibolit
Km: 11+700	20	40	Amfibolit
BH 2 (25.30)	21	38	Amfibol
BH 3 (23.00)	29	32	Gnays
BH 19 (20.50)	12	18	Granodiyorit
BH 20 (29.60)	21	33	Gnays
BH 21 (22.75)	27	54	Gnays

Çizelge 5. Metakristalin kayaçların tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c), P-dalga hızı (V_p), Birleşik Ayırışma İndeksi (UAI) ve ayırışma derecesi.

Table 5. Unconfined compressive strength (σ_c), P-wave velocity (V_p), Unified Alteration Index (UAI) and weathering degree of the metacrystalline rocks.

Sondaj No.	Derinlik (m)	σ_c (MPa)	V_p (m/s)	UAI	Ayrışma derecesi
BH9	14.7	29.6	4750	0.32	Orta ayrışmış
BH10	13.0	12.7	1613	0.78	Çok fazla ayrışmış
BH12	26.0	17.7	1700	0.76	Çok fazla ayrışmış
BH13	9.6	33.2	4167	0.41	Orta ayrışmış
BH14	6.3	99.9	4569	0.09	Ayrışmamış
BH14	15.5	79.1	4815	0.17	Az ayrışmış
BH14	20.5	44.6	3077	0.50	Orta ayrışmış
BH14	41.1	86.4	5368	0.07	Ayrışmamış
BH15	27.4	28.6	2625	0.61	Fazla Ayrışmış
BH16	27.0	61.9	5588	0.09	Ayrışmamış
BH17	46.5	84.2	5000	0.13	Az ayrışmış

6. AYRIŞMA DERECEŚİNİN BELİRLENMESİ

Metakristalin kayaçların ayrışması, mineralojik ve petrografik özellikler, Birleşik Ayırışma İndeksi ve jeokimyasal özelliklerine göre incelenmiştir. Ayrıca, ISRM (2007) tarafından önerilmiş bozunma sınıflamasına göre, diğer ayrışma sınıflamalarının sonuçları ile karşılaştırmak amacıyla da incelenmiştir.

6.1 Mineralojik ve Petrografik Özelliklere Göre Ayrışma Derecesi

Sondajların farklı derinliklerindeki karotlardan ve yüzeyden alınan örneklerin mineralojik bileşimi, hidrotermal alterasyon (ayrışma) ürünleri ile yüzde oranları kayaç adı da belirtilerek Çizelge 6'da verilmiştir. Hidrotermal alterasyon sonucu killeşme, kloritleşme, karbonatlaşma, serisitleşme, epidotlaşma, demiroksitleşme, çok az silisleşme ve hidrobiyotitleşme görülmektedir.

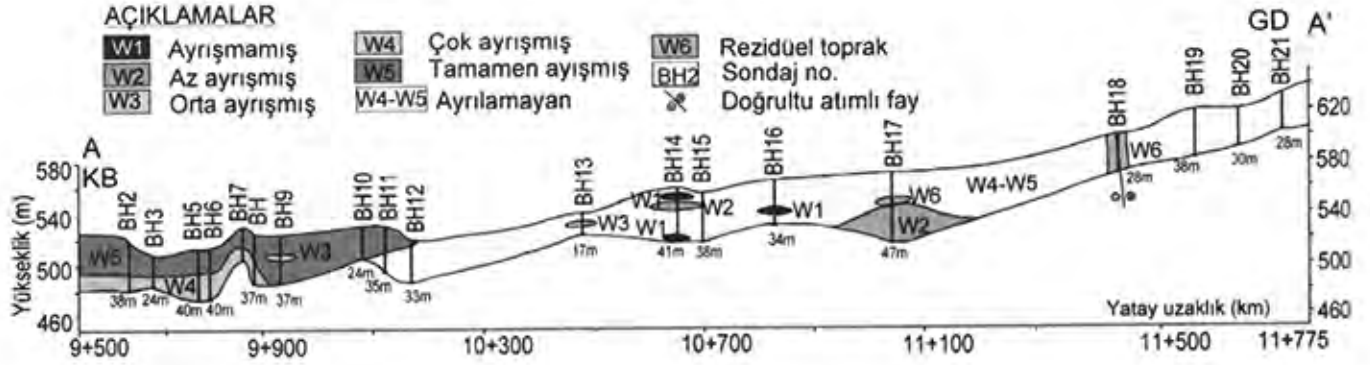
6.2. Birleşik Ayırışma İndeksi (UAI)'ne Göre Ayrışma Derecesi

Karot örneklerinin P-dalga hızları ve tek eksenli sıkışma dayanımlarına bağlı olarak Birleşik Ayırışma İndeksi (UAI) hesaplanarak Çizelge 5'te ve ayrışma derecesine göre yapılan bölgelendirme Şekil 7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Örneklerin mineralojik bileşimleri, ayrışma ürünleri ve oranı ile çeşitli kayaç adları.

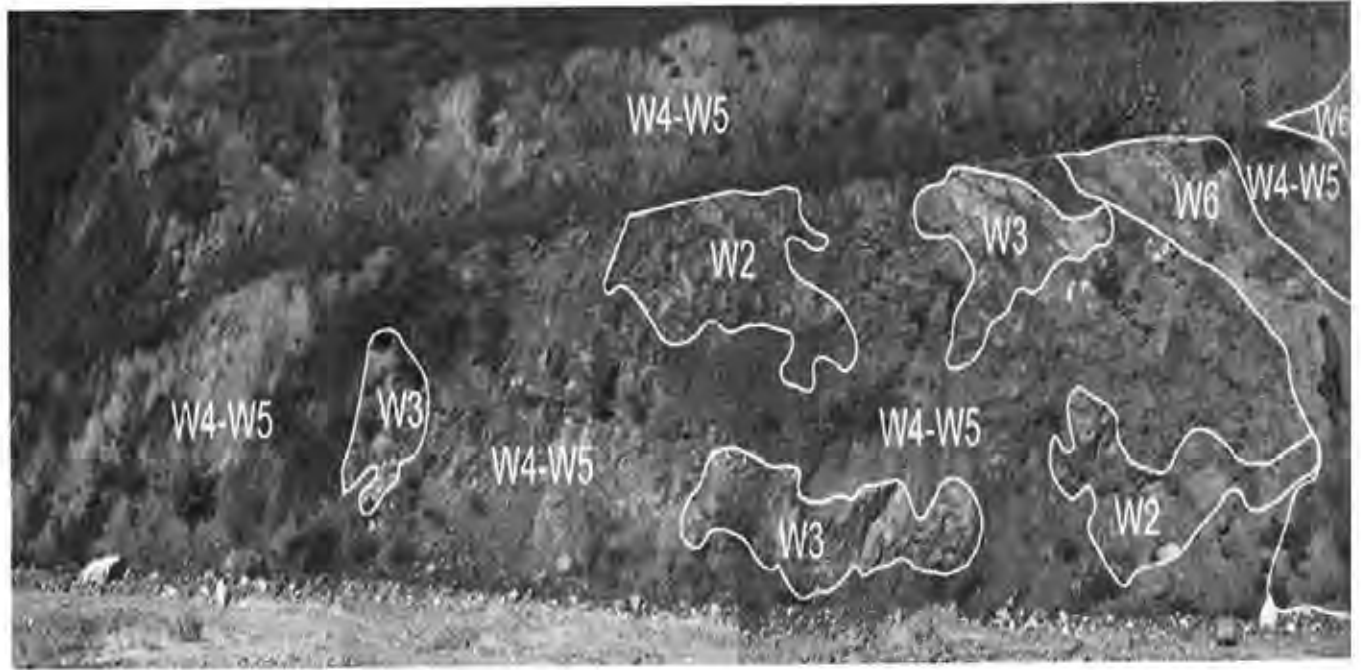
Table 6. Mineralogical composition, weathering products and ratios of various rock types.

Sondaj ve yüzlek no	Derinlik (m)	Mineralojik bileşim	Killeşme (%)	Kloritleşme (%)	Karbonatlaşma (%)	Serisitleşme (%)	Epidotlaşma (%)	Demiroksitleşme (%)	Hidrobiyotitleşme (%)	Silitleşme (%)	Toplam (%)	Kayaç adı
BH2	25.5	Plajiyoklaz, uralit, tremolit, aktinolit	10	15	3						30	Amfibolit
BH3	23.0	Kuars, plajiyoklaz	5	25	10						40	Milonitik gnays
BH5	39.0	Titanomanyetit, hematit, tremolit, aktinolit	5	15	5						25	Monokristalin granodiyorit
BH9	14.7	Kuars, limonit, alkali feldispat			15			30			45	Amfibolit
BH10	13.0	Tremolit, aktinolit, plajiyoklaz, manyetit ve pirit	20			5			3		28	Amfibolit
BH12	26.0	Plajiyoklaz, kuvars alkali feldispat ve amfibol	20	5			2				27	Amfibol gnays
BH13	9.5	Kuars, plajiyoklaz alkali feldispat	15		10						25	Milonitik gnays
BH14	6.3	Kuars, feldispat						5		25	30	Milonitik gnays
BH14	15.5	Kuars, plajiyoklaz epidot ve kuvars	30		20						50	Amfibolit
BH14	20.5	Kuars, plajiyoklaz serisit,	10		60			3			73	Granodiyorit porfir
BH14	41.0	Plajiyoklaz, alkali feldispat, kuvars	20		5	3					28	Biyotit gnays
BH15	27.5	Kuars, plajiyoklaz serisit, klorit	10	20				3			33	Milonitik gnays
BH16	27.0	Kuars, plajiyoklaz ve feldispat	10	10		5					25	Milonitik gnays
BH17	46.5	Kuars, plajiyoklaz ve alkali feldispat	10		20	3					33	Amfibolit
BH19	20.5	Kuars, plajiyoklaz alkali feldispat ve muskovit			10	5	5				20	Meta granodiyorit
BH20	28.5	Kuars, a.feldispat plajiyoklaz, biyotit	5	3		5					13	Biyotit gnays
BH21	22.7	Kuars, plajiyoklaz kalsit, alkali feldispat, epidot ve klorit	5	10		10					25	Milonitik gnays
N6	Yüzey	Kuars, plajiyoklaz, zeolit		10	2			5			22	Milonitik gnays
N5	Yüzey	Klorit, kuvars, plajiyoklaz, alkali feldispat, amfibol, manyetit	10	10		2					27	Meta granodiyorit
N10	Yüzey	Kuars, plajiyoklaz klorit, alkali feldispat	10		5	15					30	Milonitik gnays



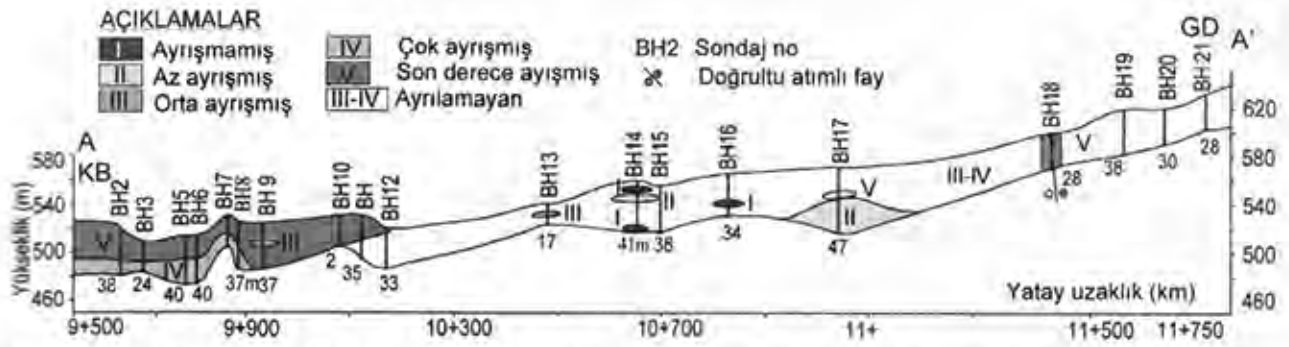
Şekil 5. Metakristalin kayaçların ISRM (2007)'ye göre ayrışma derecesinin bölgeleştirilmesi.

Figure 5. Zonation of the weathering degree of the metacrystalline rocks based on ISRM (2007).



Şekil 6. Km: 11+000'deki kuzey şevindeki gnaysın ISRM (2007)'ye göre ayrışma sınıflaması (W1: Taze; W2: Az bozunmuş; W3: Orta derecede bozunmuş; W4: Çok bozunmuş; W5: Tamamen bozunmuş).

Figure 6. Classification of the gneiss based on degree of weathering (ISRM 2007) on the northern slope at section 11+000 km. (W1: Fresh; W2: Slightly weathered; W3: Moderately weathered; W4: Highly weathered; W5: Extremely weathered).



Şekil 7. Metakristalin kayaçların UAI ayrışma sınıflamasına göre sınıflaması.

Figure 7. Classification of the metacrystalline rocks based on UAI alteration classification.

6.3. Jeokimyasal Özelliklere Göre Ayrışma Derecesi

İnceleme alanındaki sondaj karotlarından farklı ayrışma derecelerini temsil eden toplam 11 örnek üzerinde jeokimyasal analizler yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları kullanılarak ayrışma dereceleri; Ruxton oranı (RO) (Ruxton, 1968), Parker indeksi (PI) (Parker, 1970), değiştirilmiş ayrışma potansiyeli indeksi (MWPI) (Vogel, 1973), kimyasal alterasyon indeksi (CIA) (Nesbitt ve Young, 1982) ve kimyasal ayrışma indeksi (CIW) (Harnois, 1988) değerlerine göre belirlenmiştir. Ruxton oranı, Parker indeksi ve değiştirilmiş ayrışma potansiyeli indeksi azaldıkça ayrışma artmaktadır. Genel olarak kimyasal alterasyon indeksi ve kimyasal ayrışma indeksi arttıkça ayrışma artmaktadır. Toplam 11 örnek üzerinde yapılan deneylerden elde edilen MWPI, CIA, ateşte kaybı LOI ve UAI karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir. Kayaç örneklerinin ayrışma derecesi, “çok fazla ayrılmış” ile “ayrışmamış” sınıfları aralığındadır.

6.4. ISRM (2007)’ye Göre Bozunma Derecesi

Sondajlardan alınan karotlar incelenerek Km 9+500 ile Km: 11+750 arasındaki mikrokristalin kayaçların ayrışma dereceleri gözlemsel olarak ISRM (2007) tarafından önerilmiş ölçütlere göre belirlenmiştir. Bölgede hakim olan aktif tektonik, topoğrafik eğimin dikliği, yeraltı ve yerüstü sularının etkisi, süreksizliklerin sık aralılı olmaları ayrışma derecesinin çok kısa mesafelerde değişmesine neden olmuştur. Yol yarmalarında “ayrışmamış”tan “tamamen ayrılmış” sınıfına kadar amfibol, gnays ve metagranodiyoritler bulunmaktadır. Sondaj karotlarından alınan örneklerin petrografik incelemesi, kimyasal analiz sonuçları ve ayrışma derecesi dikkate alınarak ISRM (2007)’e göre ayrışma sınıflaması Şekil 5’deki jeoloji kesitinde ve Gümüşova – Gerede otoyolu Km:11+000’de kuzey şevlerindeki gnaysın ayrışma sınıflaması da Şekil 6’da gösterilmiştir. Bazı kesimlerde süreksizlik hatları boyunca derinlerden gelen hidrotermal sıvının sıcaklık, basınç ve kimyasal etkileri sonucu metakristalin karışık içinde “ayrışmamış” ile “tamamen ayrılmış” kayaçları yan yana görmek mümkün olabilmektedir. ISRM (2007) sınıflamasına göre yüzeyden derinlere inildikçe bozunmanın azalması beklenirken, bu durum hidrotermal alterasyona uğramış mikrokristalin kayaçlarda görülmemektedir.

SONUÇLAR

İnceleme alanında temel birim, Devoniyen öncesi yaştaki Yedigöller formasyonu içerisinde amfibolit, metagranodiyorit ve gnays gibi metamorfizmaya uğramış magmatik kayalardan oluşmaktadır.

İleri derecede ayrılmış milonitik gnaysın tek eksenli sıkışma dayanımı ortalama 28.6 MPa'dır. Orta ayrılmış sınıfta ortalama 35.8 MPa, az ayrılmış amfibolit tek eksenli sıkışma dayanımı ortalama 81.7 MPa'dır. Ayrılmamış gnaysın tek eksenli sıkışma dayanımı ise, ortalama 80.9 MPa'dır. Metakristalin kayalardan alınan karot örneklerinin P-dalga hızı çok fazla ayrılmış sınıfında ortalama 1656 m/s, fazla ayrılmış sınıfında 2625 m/s, orta ayrılmış sınıfında 3998 m/s, az ayrılmış sınıfında 4908 m/s ve ayrılmamış sınıfında 5079 m/s'dir.

Metakristalin kayalardan alınan karot örneklerinin ayrışma derecesi Birleşik Ayrışma İndeksine göre, BH14 (6.3), BH14 (41.1) ve BH16 (27) numaralı gnays örnekleri "ayrılmamış"; BH14 (15.5) ve BH17 (46.5) numaralı amfibolitler "az ayrılmış"; BH9 (14.7) numaralı amfibolit, BH13 (9.6) nolu gnays ve BH14 (20.5) numaralı granodiyorit "orta ayrılmış"; BH15 (27.4) numaralı gnays "fazla ayrılmış"; BH12 (26.0) numaralı gnays ve BH10 (13.0) numaralı amfibolit "çok fazla ayrılmış" tır.

Sondajların farklı derinliklerine ait karotlardan ve yüzeyden alınan örneklerin mineralojik bileşimi; ayrılmaya bağlı killeşme, kloritleşme, karbonatlaşma, serisitileşme, epidotlaşma, demiroksitleşme ve silisleşme oranları belirlenmiştir. Buna göre ayrışma sonucu; killeşme, kloritleşme, karbonatlaşma, serisitileşme, epidotlaşma, demiroksitleşme ve kısmen silisleşme görülmektedir.

Petrografik incelemeler sonucu bölgedeki kayaların metamagmatik karışık oluşturduğu ve ileri dinamik metamorfizma etkisiyle milonitik ve breşik yapılar kazanmış ve yer yer ilksel bileşimlerini yitirmiş oldukları tespit edilmiştir.

Mikropetrografik yaygın ayrışma türleri, çok fazla ayrılmış sınıfında, killeşme, fazla ayrılmış sınıfında kloritleşme, orta ayrılmış sınıfında karbonatlaşma, killeşme ve demiroksitleşme, az ayrılmış sınıfında killeşme ve karbonatlaşma, ayrılmamış sınıfında ise az oranda kloritleşme, killeşme ve silisleşme görülmektedir.

ISRM (2007)'ye ve Kılıç (1999) tarafından önerilen ayrışma dereceleri tanımlamalarına göre hazırlanan kesitlerdeki ayrışma dereceleri uyum göstermesine karşın, ISRM (2007) sınıflamasında düşey yöndeki "tamamen ayrılmış" tan "ayrılmamış" a doğru beklenen değişim, bölgede hidrotermal ayrışmanın ve metamorfizmanın etkin olmasından dolayı gözlenememektedir. Birleşik Ayrışma İndeksi (UAI)'nin bozunma (weathering) için değil, hidrotermal ayrışma (hydrothermal alteration) için önerilmiş olduğu dikkate alındığında, bunun beklenen bir sonuç olduğu, volkanik ve kristalin kayalarda hidrotermal alterasyon etkisi olduğundan, UAI ayrışma sınıflaması daha güvenilir sonuçlar verebilecektir.

Kimyasal indekslerden ateşte kayıp (LOI), değiştirilmiş ayrışma potansiyeli indeksi (MWPI) ve kimyasal alterasyon indeksi (CIA) değerleri aynı aralıklar arasında olup, metakristalin kayalar “taze” ile “tamamen bozunmuş” kayaç sınıfı arasında değişmektedir.

KAYNAKLAR

- ANON, 1995. The description and classification of weathered rocks masses for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 207-242.
- ASTM D2845-96, 1996a. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D5731-95, 1996b. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D2938-96, 1996c. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimen. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Aydın, M., Serdar, S., Şahintürk, Ö., Yazman, M., Çokuğraş, R., Demir, O. ve Özçelik, Y., 1987. Çamdağ (Sakarya) Sünnicedağ (Bolu) yöresinin jeolojisi. *TJK Bülteni*, 30, 1-14
- Barka A. and Lettis, W., 2000. Geologic Characterization of Fault Rupture Hazard: Astaldi S.p.A. Report No: 45.110//R/2270.
- Brindley, G.W., 1980. Quantitative X-ray mineral analysis of clays. In: *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*. G.W. Brindley and G.Brown (eds.), London Mineralogical Society, pp. 125-195.
- Dalgıç, S., 1994. Anadolu Otoyolu Bolu Dağı geçidinin mühendislik jeolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gupta, A. S., and Rao, S.K., 2000. Weathering effect on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56, 257-274.
- Gündoğdu, M. N., 1982. Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik- mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Gündoğdu, M. N. ve Yılmaz, O., 1984. Kil mineralojisi yöntemleri, I. Ulusal Kil Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Bildiriler Kitabı, 319-330.

- Gürocak, Z., and Kılıç, R., 2005. Effect of weathering on geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 4, pp 373-381.
- Harnois, L., 1988. The CIW index. *Sedimentary Geology*, 55, 319-322.
- Hillebrand, W. F., 1987. Some principles and methods of analysis applied to silicate rocks, in analyses of rocks with a Chapter on Analytical Methods, Laboratory of the United States Geological Survey, 1880-1896, Frank Wigglesworth Clarke and W. F. Hillebrand, U.S. Geological Survey Bulletin, No. 148 (1897) pp. 15-64.
- Iliev, I.G., 1966. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico mechanical properties. *Proceedings of First Congress of International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, pp. 142-144.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, edited by R. Ulusay and J. A. Hudson, , Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey.
- İrfan, T.Y., and Dearmann, W. R., 1978. The emgineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 11, 233-244.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun tektonik birlikleri. *MTA Dergisi*, 66, 20-34.
- Kılıç, R., 1999. The Unified Alteration Index (UAI) for mafic rocks. *Enviromental and Engineering Geoscience*, 4, 475-483.
- Kılıç, R. ve Bilgehan, R., P., 1999. Volkanit arazilerde yer seçimine yeni bir yaklaşım. *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 17, 111-119.
- Koçbay, A., and Kılıç R., 2003. The effect of alteration degree of basalt using as a natural construction material in Çorum, Turkey. *Proceedings of Industrial Minerals and Building Stones*.
- Koçbay, A., 2003. Osmancık – Çorum yöresindeki bazaltların ayrışma karakteristiklerinin ve derecesinin incelenmesi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara.
- Komoo, İ. and Yaakup, J., 1990. Engineering propertes of weathered metamorphic rocks in Peninsular Malaysia. *Proceedings of the International Association for Engineering Geology and the Environment Congress*, Rotterdam, pp. 665-672.

- Nesbitt, H.W., and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Norbury, D.R., 1986. The point load test. Geological Society, Engineering Geology Special Publication No.2, pp. 325-329.
- Parker, A., 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geology Magazine*, 501-504.
- Price, D.G., 1993. A Suggested method for the classification of rock mass weathering by a rating system: *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 26, 69-76.
- Ruxton, B.P., 1968. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology*, 76, 518-527.
- Şengör, A. M., C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution: of Turkey plate tectonics approach. *Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Tuğrul, A., and Gürpınar, O., 1997. The effect of chemical weathering on the engineering properties of Basalts, Turkey. *Environmental and Engineering Geoscience*, III(2), 225-234.
- Ündül, Ö., 2007. Ayırışmanın Çınarcık barajı göl alanındaki (Bursa) ultramafik kayaçların mühendislik özelliklerine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vogel, D.E., 1973. Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the superior province, Villebond Township, Southcentral Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 4, 2080-2085.
- Yurdakul, M., 2006. Bolu Asarsuyu vadisindeki metakristalin kayaçların jeomekanik özellikleri ve ayrışma derecelerinin incelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- ZETAŞ Zemin Teknolojileri A.Ş., 2010. Anadolu Otoyolu, Gümüşova-Gerede, KM9+270-KM11+750 arası için jeoteknik mühendislik raporu ve yeni deprem katsayısını kullanarak otoyol dolgularının duraylılığının değerlendirilmesi. 35 s. Ankara.

İSTANBUL METROSU SANAYİ İSTASYONU KUZEY YOLCU SALONU DUVARLARINDA OLUŞAN DEFORMASYONLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Evaluation of Displacements on the Northern Concourse Walls of the Sanayi Station of
the İstanbul Metro*

Yılmaz MAHMUTOĞLU¹, Bahattin KİMENÇE²

¹İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

²İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

ÖZ

Bu çalışmada, İstanbul Metrosu'nun 4. Levent-Ayazağa etabı kapsamındaki Sanayi İstasyonu kuzey yolcu salonunun kazısı sırasında, batı duvarında oluşan aşırı deformasyonlar değerlendirilmiştir. Yaklaşık 15 m derinliğindeki temel kazısı Karbonifer yaşlı orta-çok ayrışmış grovaklar içerisinde açılmıştır. Kazı alanı, kazı taban kotundan 3 m daha derine inen ankastre fore kazıklarla önceden desteklenecek şekilde tasarılmış, buna göre fore kazık uygulaması yapılmıştır. Ancak fore kazıklar yapıldıktan sonra, kazı taban kotu yaklaşık 6 m daha derin olacak şekilde projede değişikliğe gidilmiştir. Mevcut kazıkların askıda kalması nedeniyle, kazıya başlanmadan önce statik proje revize edilmiş, anılan kotlarda kazık topukları üzerine 2.6 m bindirmesi olan ankrajlı ve donatılı perde beton öngörülmüştür. Yüzeyden derine doğru ilerletilen kazı adımları sırasında, kazısı yapılan basamaklar kazıklara dayanan göğüs kafesi kirişleri üzerine yerleştirilen ankrajlarla desteklenmiştir. İmalat süresince oluşabilecek deformasyonlar kirişler üzerine yerleştirilen reflektörler yardımıyla ölçülerek denetlenmiştir. Bu ölçümlerden, kazı çukurunun uzun eksenine paralel karşılıklı duvarlardan birisinde istenmeyen deformasyonların olduğu görülmüştür. İstasyon kazısı boşluğunun batı duvarı orta kısmında oluşan kümülatif deformasyonların kazı boşluğu yönündeki bileşeni 94 mm'ye erişmiştir. Sonuçta duvarın arkasında bulunan, genişliği yaklaşık kazı derinliği kadar olan bir bölgede bulunan yapılar deformasyonlardan etkilenmiştir. Çalışmada, istasyon kazısının denetlenmesi amacıyla yapılan gözlem ve ölçümler irdelenmiş, kazı ortamının davranışı tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Derin kazı, grovak, hareket izleme, İstanbul Metrosu, yerdeğiştirme.

ABSTRACT

In this study, large deformations occurred at the western wall of the north concourse of the Sanayi Station between 4. Levent and Ayazağa belonging to the İstanbul Metro were evaluated by geotechnical monitoring survey. The excavation with a depth of 15 m has been carried out in Carboniferous moderately to highly weathered greywackes. In the primary stage of the project, the fore piles exceeding up 3 m below the excavation bottom and along the periphery of excavation area were foreseen to avoid the harmful deformation. However, after

the completion of piling, excavation project was revised and the bottom level was lowered approximately 6 m below the end points of the piles. For this reason, the new condition was analyzed statically and anchored concrete curtain overlying 2.6 m of lower parts of previously constructed piles was purposed for supporting of the walls. The steps of top to bottom excavation were supported by the pre-stressed anchorages systematically installed along the concrete beams. During the construction, possible deformations were measured and monitored by reflectors which were installed on the concrete beams. By these measurements, it was recognized that harmful deformations reaching up to 94 mm total component toward to the excavation pit took place at the central part of the western wall. As a result, some of surface structures were affected in a zone adjacent to deep excavation. The data obtained from the monitoring survey of this deep excavation are evaluated and behavior of the excavation walls is discussed in this contribution.

Keywords: Deep excavation, greywacke, movement monitoring, İstanbul Metro, displacement.

1. GİRİŞ

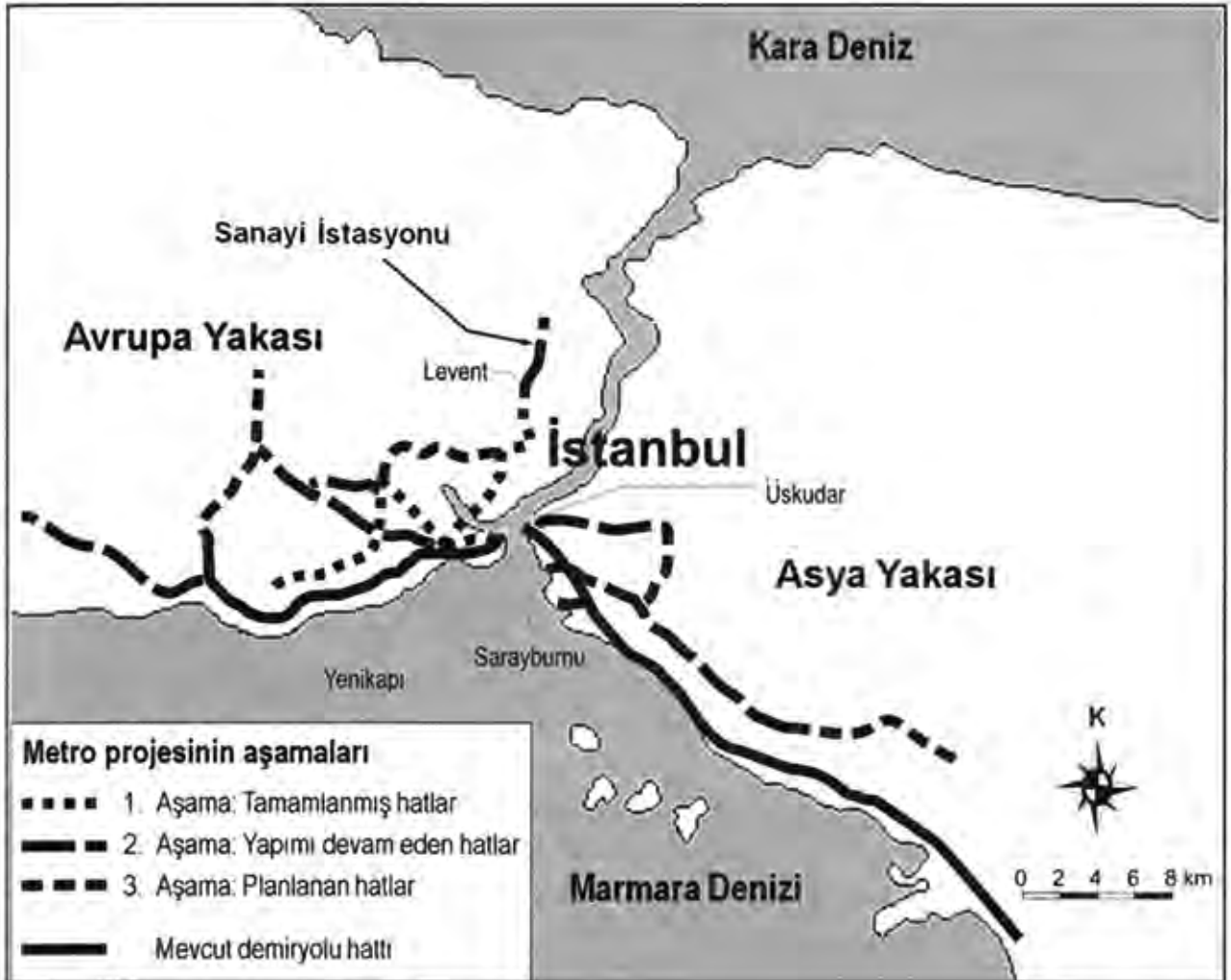
Kazı ortamı ve çevresinin güvenliğini geçici olarak sağlamak amacıyla kent içinde yapılan derin kazılar genellikle kazı öncesinde desteklenmekte ve kazı boşluğu derine doğru aşamalı olarak büyütülmektedir. Oluşturulan dik ve derin duvarların kaymaya ve dönmeye karşı güvenliği çoğunlukla nihai kazı kotunun altına kadar inen zemin veya kayaya ankastre kazıklarla sağlanır. Kazı ortamı nitelikleri, kazı boşluğunun geometrisi, imalat yöntemi ve kazı duvarı arkasında oluşacak aktif basınçlar gibi sınır koşulları kazık malzemesi, kazık çapı ve sıklıklarının boyutlandırılmasında dikkate alınan parametrelerdir. Çoğu kez, kazı duvarlarının güvenliği yalnızca kazıklarla sağlanamadığından, kazılar aşamalı şekilde derinleştirilmekte, kazı duvarları ankraj ve yatay destek elemanları ile desteklenmektedir.

Kazı aynasının aşamalı büyütülmesi serbest açıklığın kendini desteksiz tutma süresi kavramı ile ilişkilidir ve tünel mühendisliğinde sıkça kullanılan bir yaklaşımdır (Lauffer, 1958). Ayrıca, boyut değişiminin direnç üzerindeki etkisi jeoteknik problemlerin çözümünde dikkate alınan önemli bir parametredir. Öte yandan, aynı süreksizlik özelliklerine sahip ortam içerisinde kazı kesitinin büyütülmesi sonucunda sağlam kayadan (tek cisim ortamı), kaya kütlesi (çok cisim ortamı) davranışına nasıl geçildiği iyi bilinmektedir (Hoek ve Brown, 1980). Önceki araştırmalar, kaya yapısı etrafında birden fazla gerilme kemerinin oluşabileceğini (Sauer, 1976) ve gerilme kemerlerinin kayanın zamana bağımlı davranışı nedeniyle genişleyen plastik zonlara bağlı olarak, ani sıçramalarla kaya yapısından nasıl uzaklaşacağı ortaya konmuştur (Yüzer ve Vardar, 1986). Ortam dokusu içerisindeki birim elemanlar arasındaki bağın (kohezyonun) zayıflatılması veya koparılmasının dayanım ve davranış üzerindeki etkileri Mahmutoglu (1998 ve 2006) tarafından tartışılmıştır.

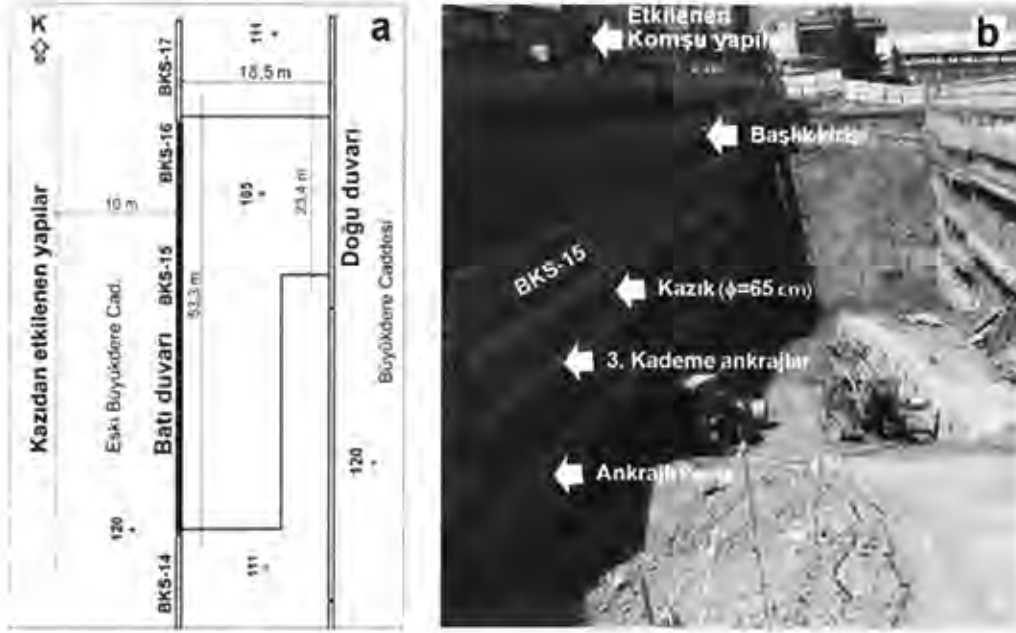
4. Levent-Ayazağa hattı üzerindeki, Sanayi İstasyonu kuzey yolcu salonuna ait kazı boşluğunun uzun eksenini yaklaşık kuzey-güney doğrultusundadır (Şekil 1). Kazı çukurunu batıdan

sınırlayan duvarda, zamanla komşu yapıları etkileyen deformasyonlar oluşmuştur. Aynı doğrultudaki doğu duvarında ise, aynı kazı ve destekleme yöntemi uygulanmış olmasına rağmen, kayda değer deformasyonlar oluşmamıştır. Birbirine paralel bu iki duvarın aynı kota kadar inen kazı aynalarının genişliği farklıdır. Kazı alanında yapılan imalatlar ve duvarların plandaki görünümü Şekil 2a’da verilmiştir. Komşu yapılar için hasar oluşturabilecek kritik deformasyonların olduğu batı duvarı yatayda diğer duvarın yaklaşık iki katı uzunluğa sahiptir. Aşamalı olarak imal edilen duvarlarda benzer jeolojik ortam koşullarının geçerli olduğu belirlenmiştir.

Çağdaş uygulamalarda, çevre güvenliği açısından risk taşıyan derin kazılar yerinde yapılan ölçüm ve gözlemlerle denetlenmektedir. Bu çalışmaya konu olan kazı boşluğu da imalat süresince kirişler üzerine yerleştirilen reflektörler yardımıyla izlenmiştir. Kazık başlık kirişleri ve perde beton üzerinde seçilen noktalar düzenli olarak ölçülerek kazı duvarlarının duraylılığı denetlenmiştir.



Şekil 1. İstanbul Metrosu Projesi’ne ait hatlar ve Sanayi İstasyonu’nun konumu.
Figure 1. The lines of the İstanbul Subway Project and location of the Sanayi Station.



Şekil 2. Sanayi İstasyonu kuzey yolcu salonu kazı alanının ölçeksiz planı (a) ve kazı ve sağlamlaştırma aşamaları (b).

Figure 2. The steps of top to bottom excavation and supporting elements in northern concourse of the Sanayi Station (a) and the sketch of the excavation area (b).

2. KAZI ORTAMI ÖZELLİKLERİ

Sanayi Mahallesi İstasyonu Kuzey yolcu salonu kazı duvarı aynaları yerinde yapılan çalışmalarla incelenmiştir. Kazı boşluğu Trakya formasyonunun kiltası ve çamurtaşından oluşan ileri derecede ayrılmış düzeyi içerisinde açılmıştır. Kazı duvarları boyunca oluşturulmuş fore kazık, ankraj göğüs kafesi kirişleri, kazık başlık kirişi ve kazı çukurunun tabanına yakın olan 6.5 m'lik kesimde uygulanan ankrajlı perde betonun örttüğü alanların dışındaki noktalarda zemin profili açıkça izlenebilmiştir. Kazı ortamı pratik açıdan geçirimsiz olup, duvarların üst kesiminde yüzey suyu ve yapay etkiler nedeniyle yerel nemlenmeler gözlenmiştir.

Derin kazı duvarlarında yapılan incelemelerde, konkors kazısının batı ve doğu duvarının benzer zemin profiline ve süreksizlik özelliklerine sahip oldukları görülmüştür. Kazı duvarında derinliğin fonksiyonu olarak tanımlanan ayrışma dereceleri, ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlamalara göre Çizelge 1'de, bu zonları temsil eden görüntüler ise Şekil 3'te verilmiştir. Kesitin üst kısımlarını yapay dolgu ve tümüyle ayrışarak artık zemine dönüşmüş kaya ürünü malzeme oluşturur. Bu zonun kalınlığı 3-3.5 m'dir. Bu zonun altında kimyasal olarak ayrışarak ilksel rengi ve bileşimi değişmiş ve tümüyle ayrışmış kaya zonu bulunmaktadır. Tümüyle ayrışmış bu zonun kalınlığı ise yer yer 4-4.5 m'ye ulaşmaktadır. Kırmızımsı sarı bu zon, kazı duvarı aynalarında genellikle süreklilik göstermektedir. Laboratuar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, bu zonu oluşturan malzemenin davranışı su içeriği ile önemli ölçüde değişmektedir. Bu zondan alınan örnekler üzerinde yapılan serbest şişme deneylerinde (ISRM, 2007) % 0.5'e varan birim şişme deformasyonları elde edilmiştir.

Çizelge 1. Kazı duvarlarında ayrışma derecesinin derinliğe bağlı değişimi ve homojen zonların makaslama dayanımı ve birim hacim ağırlıkları.

Table 1. Variation of degree of weathering by depth and shear strength and unit weight of homogenous zones at concourse walls.

Derinlik (m)	Tanım	Simge*	Görünür Özellikler	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
3.0-3.5	Artık zemin	VI	Kaya malzemesinin tamamı zemine dönüşmüştür. Kütleli yapısı ve dokusu tamamen bozulmuştur. Oluşan malzeme genellikle homojen olup, siltli ve killidir.	1-15	26	18
3.5-8.0	Tamamen ayrılmış kaya	V	Malzemenin tamamı zemine dönüşmüştür. Kayanın birincil yapısı kısmen korunmuştur. Ayrılmış tırn kumludur ve suya doyurulduğunda elle şekil verilebilir hale gelir.	5-15	26	18
8.0-15.0	Çok ayrılmış kaya	IV	Kaya tamamen renk değişimine uğramış olmasına rağmen doku büyük ölçüde korunmuştur. Kütleli yapısı ise kısmen korunmuştur.	20	30	20
>15.0	Orta derecede ayrılmış kaya	III	Renk değişimi kısmidir. Yapı ve dokusu tamamen korunmuştur. Süreksizlikle genellikle demirce zengin kil dolguludur. Birim kaya elemanlarının köşeleri elle koparılabılır.	>20	36	24

* : ISRM (2007) tarafından önerilmiş ayrışma derecesi tanımlama ve simgeleri kullanılmıştır.

Kazı kesitinin üst kısmını oluşturan 3-3.5 m kalınlığındaki artık zemin, pratik açıdan geçirimsiz, üst kesimlerinde yüzey suyu ve yapay etkiler nedeniyle yerel nemlenmeler.

3.5-15 m arasındaki zon, tamamen-çok ayrılmış kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı ardışıklı grovak.

15 m derinlikten sonraki orta derecede ayrılmış zon, sık ve düzensiz süreksizlikler içerir.



Şekil 3. Sanayi İstasyonu kuzey yolcu salonu duvarlarında karşılaşılan ayrışma derecesinin derinliğe bağlı değişimi.

Figure 3. The variation of degree of weathering by depth at the walls of northern concourse of the Sanayi Station.

Arazi gözlemleri, araştırma sondajı ve laboratuvar deneyi verilerinden hareketle kazı kesiti- nin 8-15 metrelerinin yüksek derecede ayrıışmış kayadan oluştuğu saptanmıştır. Bu kesimde, kayanın dokusunu oluşturan tanelerin % 50'sinden fazlası ayrıışarak ilksel özelliklerini yitir- miştir. Taneler arası bağ önemli düzeyde zayıflamış olup, kayaç geçiş ortamı niteliğinde ve süreksizlik yüzeyleri genellikle mangan sıvalıdır.

Kazı duvarlarında farklı kalınlığa sahip ezilme zonlarıyla sıkça karşılaşılmasına rağmen, ortamın duraylılığını denetleyebilecek kritik konumlu makro yapısal elemanlar (fay) sap- tanamamıştır. Kimyasal ayrışma yerel olarak karşılaşılın ezilme zonları boyunca daha da derinlere ulaşabilmektedir.

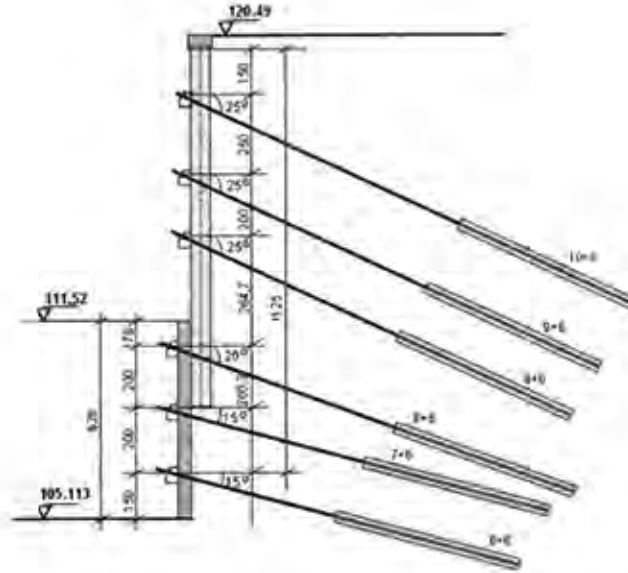
Kaya türü ve ayrışma derecesinin belirlenmesi amacıyla kazı yüzeylerinde yapılan gözlem- ler istasyonun kazısı öncesinde bu bölgede yapılan sondaj verileri ve hazırlanan zemin pro- fili ile uyumludur. Destekleme elemanlarının boyutlandırılmasında Çizelge 1'de belirtilen özellikler kullanılmıştır. Bu çizelgedeki makaslama dayanımı parametreleri, projelendirme öncesinde yapılan sondajlardan alınan karotlar üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyi sonuçlarından hareketle belirlenmiştir. Anılan deneyler İTÜ Maden Fakültesi Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı'nda yapılmıştır.

3. KAZI VE DESTEKLEME SİSTEMİ

İncelenen duvarların kazı ve destekleme sistemi başlangıçta üç kademededen oluşan ankrajlı fore kazık olarak planlanmıştır. Bu tasarımda kazık uçlarının 1.3 metresinin ankastre çalıştı- rılması öngörülmüştür. Kazı taban kotu kazıkların oluşturulması aşamasında planlanmış ve kazık boyları bu kota göre tasarlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, kazı öncesinde kazı alanı çevresinde çapı 65 cm, aralıkları ise 130 cm olan fore kazıklar oluşturulmuştur.

Ancak yolcu salonu kazısına başlanacağı aşamada, projede değişiklik yapılarak kazı derin- liğinin 5 m artırılması gündeme gelmiştir. Bu aşamaya gelinceye değin tüm kazıklar imal edildiğinden, kazık boylarının uzatılması mümkün olmamış ve başlangıçta öngörülen kazı kotunun altındaki kesimin desteklenmesi kazıklar üzerine 2.6 m bindirmesi olan ankraj- lı perde şeklinde tasarlanarak proje değişikliği yapılmıştır. Projede, öngerilmeli ankrajlarla destekli ve aralıklı kazıklarla oluşturulan ilk üç kazı kademesinin bulunduğu kesimde ank- rajların yatay yöndeki aralıkları 2.6 m, alt kotta yer alan perde betonun bulunduğu kesimde ise 2 m'dir.

Yüzeyden itibaren ilk üç sıra ankrajın eğimi 25°, perde beton üzerinden yapılanların (son üç sıranın) eğimi ise 15° ve 20°'dir. Tüm ankrajların kök uzunlukları 6 m olup, gövde uzun- lukları en üstten kazı tabanına doğru kademeli olarak azaltılmıştır (Şekil 4). Projelendirme aşamasında ankraj servis yükleri 32 ton olarak öngörülmüştür. Ankrajlarla destekli aralıklı kazıklardan oluşan destekleme sistemi PLAXIS, ankrajlı perde ise SAP2000 yapısal analiz programı yardımıyla Erdinç (2006) tarafından boyutlandırılmıştır.



Şekil 4. Kuzey yolcu salonu kazı duvarlarında uygulanan kademeli kazı ve destekleme sistemi.

Figure 4. Excavation steps and support system at northern concourse walls.

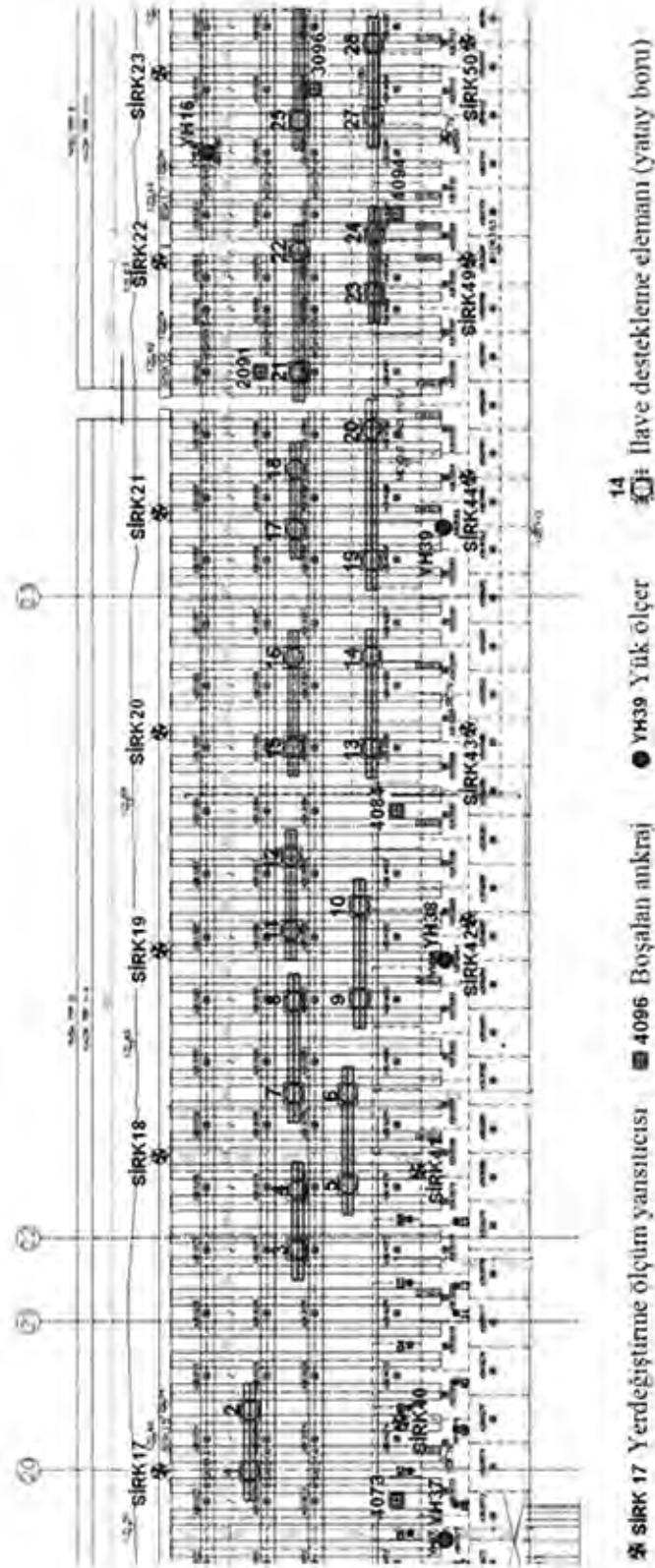
4. KAZI DUVARLARININ İZLENMESİ

4.1. Yansıtıcı Okumaları

Kuzey konkors yapısına ait duvarlar, kazıkları bağlayan başlık kirişleri, komşu yapılar ve kazı duvarı yüzeyine yerleştirilen yansıtıcıların periyodik okunması yöntemiyle izlenerek denetlenmiştir. Optik olarak yapılan ölçümlerin günlük olarak yapılması öngörülmüş, deformasyon artışlarının fark edilmesi anından itibaren ölçüm sıklığı arttırılmıştır. Kazı duvarı aktif destekleme elemanlarını oluşturan öngerilmeli ankrajlardan bazıları ise, kafalarına yerleştirilen yük hücresi yardımıyla kontrol edilmektedir (Şekil 5).

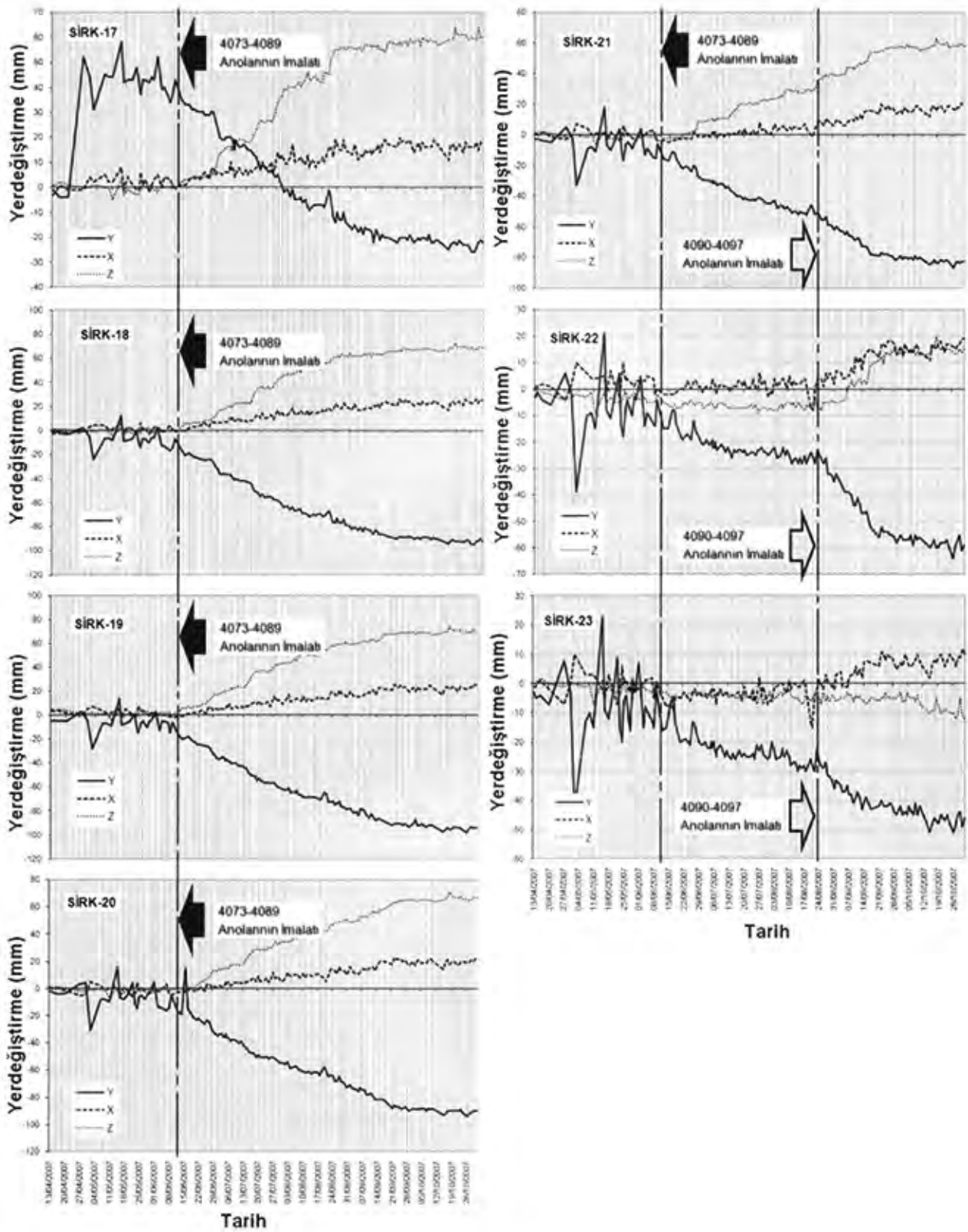
Öte yandan, kazı boşluğunu doğu ve batıdan sınırlayan boşluğun uzun eksenine paralel konumlu duvarlarda aynı kazı ve destekleme sistemi uygulanmasına rağmen, batı duvarında istenmeyen deformasyonlar oluşmuştur. Kazı boşluğu yönünde (Y) 95 mm'ye varan deformasyonlar duvarın arkasında bulunan Eski Büyükdere Caddesini ve bu yola komşu bazı yapıları etkilemiştir (Şekil 2b).

Kazık başlık kirişleri ve duvar üzerine yerleştirilen yansıtıcılar yardımıyla ölçülen deformasyonların zamanla değişimi her ölçüm noktası için ayrı ayrı irdelenmiştir. Şekil 5 de gösterilen yansıtıcıların düşey hizasında ve kazı duvarının alt kotunda bulunan ankrajlı perde beton anolarının kazı tarihleri de bu değerlendirmede dikkate alınmış ve yer değiştirme-zaman eğrileri üzerine işlenmiştir (Şekil 6). Bu eğrilerden de görüleceği üzere, ankrajlı perde beton seviyesine kadar olan imalatlarda kayda değer bir deformasyon oluşmamıştır. Ancak ankrajlı perde anolarının kazısıyla birlikte deformasyonlar hızla artmaya başlamıştır. Bu noktalar için deformasyonların artmaya başladığı tarihler ile ankrajlı perde beton anolarının kazı tarihleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 2'de sunulmuştur.



Şekil 5. Kuzey yolcu salonu batı duvarı üzerine yerleştirilen izleme noktaları, ankraj yükü ölçüm hücreleri, kazı destekleme sistemine ilave edilen yatay elemanlar ve boşalan ankrajların konumları.

Figure 5. The locations of the monitoring points, load cells fixed onto anchor heads, horizontal elements added to supporting system and released anchorages on the western wall of the northern concourse.



Şekil 6. Kuzey yolcu salonu batı duvarındaki yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi (Y ve Z sırasıyla yatay ve düşey yöndeki yerdeğiştirmelere karşılık gelmektedir).

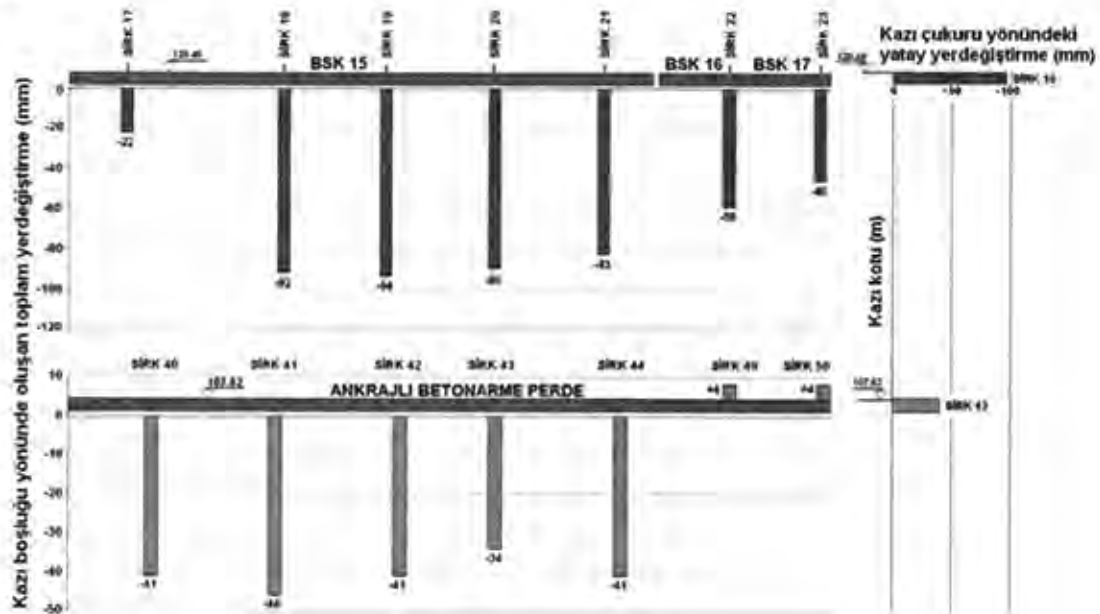
Figure 6. Variations of displacements by time at the western wall of northern concourse (Y and Z refer to horizontal and vertical displacements, respectively).

Çizelge 2. Yansıtıcılarda okunan deformasyonların artış gösterdiği tarihler (t_1) ve ölçüm noktalarının altında bulunan beton perde anosu kazı tarihleri (t_2).

Table 2. Dates referring to increase in displacements recorded by the reflectors (t_1) and dates of the excavation steps of concrete curtain under the monitoring points (t_2).

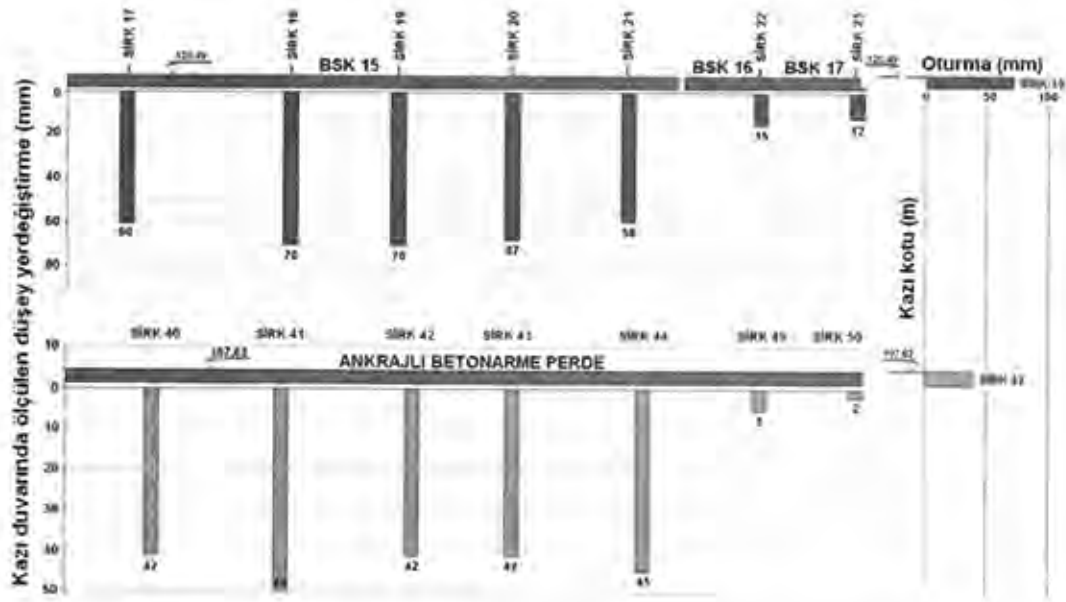
Yansıtıcı No.	Ano No.	Deformasyon okuma ve kazı tarihleri	
		t_2	t_1
SİRK 17	ASK 4073 ve AKS 4074	6-12.6.2007	12.6.2007
SİRK 18	ASK 4078	12.6.2007	12.6.2007
SİRK 19	ASK 4081, AKS 4082 ve ASK 4083	5-13.6.2007	12.6.2007
SİRK 20	ASK 4085 ve AKS 4086	3-13.6.2007	15.6.2007
SİRK 21	ASK 4088 ve AKS 4089	13-20.6.2007	25.6.2007
SİRK 22	ASK 4092 ve AKS 4093	9.6.2007	10.6.2007
SİRK 23	ASK 4096 ve AKS 4097	27.8.2007	27.8.2007

Başlık kirişleri üzerine (120.49 m kotunda) ve kazı duvarı yüzeyine (107.62 m kotuna) yerleştirilen reflektörler yardımıyla okunan kümülatif deformasyonların duvar boyunca son durumları Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 7’de kazı boşluğu yönünde, Şekil 8’de ise düşey yönde oluşan toplam yer değiştirmeler görülmektedir. Bu şekillerden anılan duvarın kazı boşluğu yönünde yer değiştirdiği açıkça görülmektedir. Şekil 7’nin sağ tarafında gösterilen düşey kesitten yer değiştirme miktarının derinlikle azaldığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu durum; batı duvarında yatayda yer değiştirme, düşeyde ise bir dönmenin olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Farklı kotlarda, kazı alanına doğru yatay yer değiştirmelerin batı duvarı boyunca değişimi.

Figure 7. Variation of horizontal deformations towards to excavation area at different elevations along the western wall.



Şekil 8. Farklı kotlardaki toplam oturmaların kazı duvarı boyuncaki değişimi.

Figure 8. Variation of total subsidence at different elevations along western wall.

Deformasyonların özellikle ilk sıra ankrajlı perde beton ano kazıları ile eş zamanlı artmaya başladığı Çizelge 2'deki tarihlerden ve Şekil 6'da verilen deformasyon-zaman grafiklerinden açıkça anlaşılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, alt kotlarda yapılan kazılar nedeniyle kazık tabanlarının serbest hale gelmesi oluşan aşırı deformasyonların başlıca nedenidir. Bu uygulamayla kazık uçları kısa süre bile olsa serbest hale gelmiş, kazı duvarı arkası aktif hale gelerek istenmeyen yatay ve düşey deformasyonlar gelişmiştir.

Öte yandan bu duvara paralel kazı çukurunun doğusundaki duvarda (Maslak yolu tarafı) aynı tip kazı destekleme sistemi uygulanmış ve yoğun trafik yüklerine rağmen dikkate değer deformasyonlar oluşmamıştır. Bu duvarın nihai kazı kotuna (105.11 m) inen kısmının genişliği, aşırı deformasyonların olduğu batı duvarının aynı kota inen kısmının genişliğinin yaklaşık yarısı kadardır. Bu veriden hareketle, kazı duvarı genişliğinin (sistem büyüklüğü) ortam davranışı üzerinde olumsuz etki yaptığı düşünülebilir. Geçici elemanlarla desteklenen ortamda, etkilenen bölge zamanla büyümüş, destek sistemi üzerine gelen aktif yükler ise zamanla artmıştır. Bu durum, ankraj başlarına yerleştirilen yük ölçerlerden de açıkça anlaşılmaktadır.

4.2. Ankraj Davranışları

Kazı duvarları, kazı kademelerine bağlı olarak, derinliğe doğru uzunlukları azalan 6 sıra halindeki ankrajlarla desteklenmiştir. Ankrajların kök uzunluğu 6 m olup, kazı cephesi üzerindeki konumları Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Kazıkların yer aldığı üst kotlardaki ilk üç sırada yatay aralıkları 2.6 m, perde betonunun bulunduğu kesimde ise 2 m'dir. Proje-de ankraj öngerme yüklerinin 32 ton olarak öngörülmesine rağmen, uygulama aşamasında

ankrajlar tasarlanan servis yükleri üzerinde gerildikten sonra bu yükler 40 tona düşürülerek kilitlenmiştir. Batı duvarındaki 4 ankraj kafasına yük hücresi monte edilmiş, bu ankrajların davranışları günlük okumalarla kayda geçirilmiştir.

Yerinde yapılan incelemeler sırasında, kazı duvarında bulunan tüm ankrajların kafaları kontrol edilmiştir. Bu kontrollerde 5 ankrajın devre dışı kaldığı saptanmıştır. Boşalan ankrajların konumları Şekil 5'deki duvar planı üzerine işaretlenmiştir. Bu ankrajların üçü perde (4. kazı kademesinde), ikisi ise kafes girişleri üzerinde bulunmaktadır. Çizelge 3'de başlık girişi numarası (kazı duvarının adı), boşalan ankrajların kazı kademeleri, boşalan ankraj numaraları ve bu noktalara en yakın konumdaki yansıtıcılarda ölçülen kümülatif yatay ve düşey deformasyon miktarları verilmiştir. Bu çizelgeden de anlaşılacağı üzere, ankrajlı perde üzerindeki boşalan ankrajlardan ikisi BSK-15 no.lu kazık başlık girişinin en fazla yerdeğiştirdiği bölgenin içine düşmektedir. BSK-15 no.lu kazık başlık girişinde ölçülen kümülatif deformasyonlar boşalan ankrajlarla ilişkilendirilerek (Çizelge 3), bu duvar üzerindeki tüm ankrajların boşalma riski taşıdıkları belirlenmiştir.

Çizelge 3. Boşalan ankrajların konumları ve bu ankrajlara en yakın reflektörlerde okunan kümülatif yatay ve düşey deformasyonlar.

Table 3. The locations of loosening anchors and total horizontal and vertical displacement measured at nearest reflector.

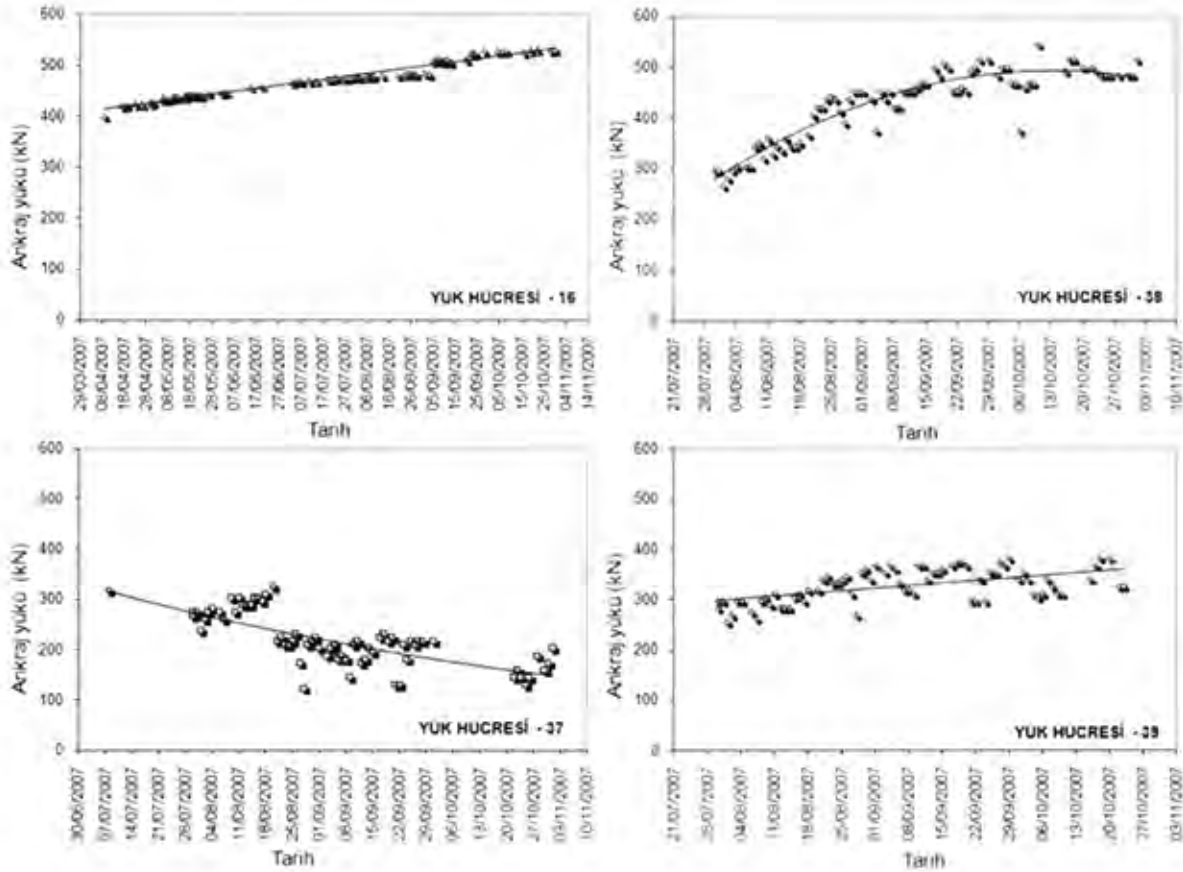
Giriş No.	Kademe No.	Ankraj No.	Reflektör No.	Deformasyon (mm)	
				Yatay	Düşey
BSK 15	4	ASK 4073	SİRK 40	-41	42
	4	ASK 4084	SİRK 42	-41	42
BSK 16	2	ASK 2091	SİRK 22	-59	15
BSK 17	3	ASK 3096	SİRK 23	-46	12
	4	ASK 4094	SİRK 49	4	5

Ankraj yüklerinin zamanla değişimi Şekil 9'daki grafikler üzerinde gösterilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi, ankraj yükleri zamanla üç noktada önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, ankrajların kazı boşluğu yönünde oluşan dönme nedeniyle çekildiğini göstermektedir. Ancak YH 37 no.lu yük hücresinin bağlı olduğu ankraj ise, aksine bir davranış göstermiştir. Bu ankraj başlangıçta 30 tonluk bir kuvvete kilitlenmiş, 31.9.2007 tarihi itibarıyla ankraj kuvveti yaklaşık 20 tona düşmüştür. Bu durum, ankrajın kök bölgesinden zamanla sıyrılmakta olduğu anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, boşalan 5 ankrajın köklerinin ortam içindeki ezilme zonlarına bağlanmış olabileceği de düşünülebilir. Bu tür zayıf ortamların sabit gerilmeler altında zamana bağlı akma davranışı gösterdiği bilinmektedir.

4.3. İlave Destekleme Elemanları

Kuzey yolcu salonu batı duvarındaki 95 mm'ye varan deformasyonlar kazı duvarının duraylılığı ile oluşturulan boşluk ve çevresinin güvenliğini tehdit eder hale gelmiştir. Kazı duvarının batısında bulunan Eski Büyükdere Caddesi ve bu caddeye komşu kaldırım ve yapılar kısmen etkilenmiştir. Anılan bölgede aşamalı olarak gelişmiş, birbirine paralel gerilme

çatlakları oluşmuştur. Yerinde yapılan gözlemlerden çatlak açıklıklarının birkaç santimetre düzeyinde olduğu, yapıların taşıyıcı elemanlarında ise önemli bir hasarın henüz oluşmadığı anlaşılmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. Ankraj yüklerinin zamana bağlı değişimi.

Figure 9. Variation of anchor load with time.



Şekil 10. Kuzey yolcu salonu batı duvarına paralel yapı döşemelerinde ve kaldırımında oluşan çatlaklar.

Figure 10. Fractures occurred on the floors of structures and pavement parallel to the western wall of the northern concourse.

Gelinen noktada, duvarda oluşan aşırı deformasyonlardan dolayı ek önlem alma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu durum projeci tarafından değerlendirilmiş ve mevcut iksa sisteminin güçlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu aşamada yapılan analizler sonucunda, zamanla artması muhtemel deformasyonları önlemek ve destek sistemini oluşturan elemanların mevcut donatı ve yerleşimleri ile emniyet sınırlarının üstünde yüklenmesini engellemek amacıyla, kazı duvarına bu bölgede çelik boru desteğinin konulması önerilmiştir. Bu öneri dikkate alınarak, destekleme sistemine eklenen 28 adet çelik boru ($\phi=813/14.2$ mm) yardımıyla duvarın güvenliği sağlanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Batı duvarındaki aşırı yerdeğiştirmeden sonra destekleme sistemine ilave edilen yatay elemanlar.

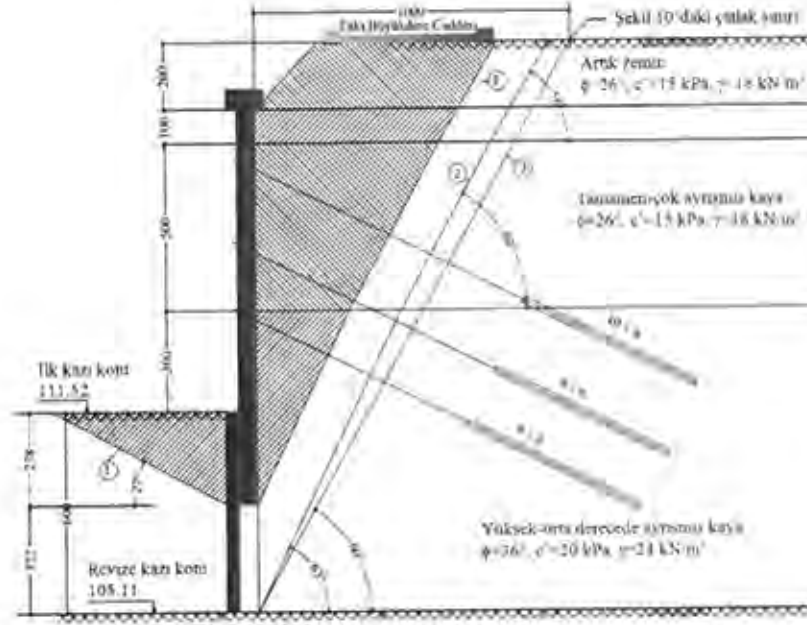
Figure 11. Horizontal elements added to support system after large displacements at the western wall.

Yeni oluşturulan durum değerlendirildiğinde, bu uygulamayla oluşması muhtemel deformasyonlar engellenmiş, kazı boşluğu ve çevresinin güvenliği sağlanmıştır. Bu durum Şekil 6'da verilen yer değiştirme-zaman grafiklerinden de açıkça anlaşılmaktadır.

4.4. Statik Açıdan Durum Değerlendirmesi

Yerinde yapılan ölçümler ve uygulama birlikte değerlendirildiğinde, iki önemli hususun irdeelenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Birinci durumda; mevcut kazı duvarı aktif toprak basıncını dengeleyen pasif toprak basıncı ve 3 adet ankraj kuvvetiyle duraylıdır. Ancak, kazıkların önündeki pasif basınç etkisi yapan kesim alındığında denge bozulmaya başlamış olup, henüz ankrajlı perdenin ankrajının yapılmamış olmasından dolayı kazıklar dönmeye başlamıştır.

Zemin yüzeyinde saptanan çatlağın duvar arkasından itibaren uzaklığının 10 m civarında olması, aktif kamanın projelendirme aşamasındaki hesaplarda kabul edilen kayma yüzeyine yakın olduğunu göstermektedir (Erdinç, 2006). Dolayısıyla ankraj elemanlarının köklerinin aktif kama içinde olmadığı anlaşılmış olup, dönmenin kazıkların tabandan serbest hale gelmesiyle oluştuğu anlaşılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Yolcu salonu duvarlarının tipik en kesiti ve teorik toprak kamalar.

Figure 12. Typical cross section of concourse walls and theoretical earth wedges.

İlk kazı durumu (1), ikinci kazı durumu (2), tüm zemin seviyeleri için $\phi=30^\circ$ alınarak ölçüm sonrası durum (3) Şekil 12’de ayrı ayrı gösterilmiştir.

Herhangi bir dış yük (q) ile yüklenmiş bir zeminde genel olarak aktif yanal basınç,

$$\sigma_{y,a} = K_a(q + \gamma z) - 2c\sqrt{K_a} \cdot z \quad (1)$$

pasif toprak basıncı,

$$\sigma_{y,p} = K_p(q + \gamma z) + 2c\sqrt{K_p} \cdot z \quad (2)$$

gerilme çatlağının uzunluğu

$$z_k = \frac{2c - q}{\gamma} \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (3)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir (Rosenak, 1969).

Bu eşitliklerde;

$\sigma_{y,a}$: Aktif yanal basınç

$\sigma_{y,p}$: Pasif toprak basıncı

K_a : Aktif toprak basıncı katsayısı

K_p : Pasif toprak basıncı katsayısı

q : Dış yük

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

c : Kohezyon

ϕ : İçsel sürtünme açısı

z_k : Gerilme çatlağının derinliğidir.

Bu eşitlikler kullanılarak, Şekil 12'de 1, 2 ve 3 rakamlarıyla gösterilen durumlara göre hesaplanan toprak basıncı ve moment değerleri Çizelge 4'de verilmiştir. İkinci ve üçüncü durumda dönmeye karşı koyan moment ile deviren moment arasındaki oran (Mk/Md) artmasına rağmen, kazı duvarı dönerek yer değiştirmiş ve dengesi bozulmuştur. Bunun nedeni karşı koyan moment etkin hale gelmeden oluşan denge bozulmasıdır. Diğer bir ifadeyle, pasif toprak etkisi kaldırıldıktan hemen sonra denge bozulmuş ve sistem kritik hale gelmiştir.

Çizelge 4. Sanayi İstasyonu yolcu salonunun batı duvarının üç farklı durumu için yapılan duraylılık analizi sonuçları.

Table 4. The results of stability analyses for three different cases of the western wall of the concourse of Sanayi Station.

	1. Durum: Ankraj yok, fore kazıklar ankastre	2. Durum : Ankraj var, kazı kotu değiştirilmiştir	3. Durum: Kazı sonrası oluşan çatlağının aynadan uzaklığına göre $\phi=30^\circ$ alınması durumu
Aktif zemin yüksekliği (m)	13.78	17.00	17.00
Aktif toprak basıncı (kN)	343.9	555.9	655.8
Karşı koyan kuvvet (kN)	446.4	930.0	930.0
Toplam deviren moment (kN.m)	1615.6	3113.8	3283.8
Karşı koyan moment (kN.m)	413.0	3255.0	3255.0
Mk/Md	0.26	1.04	0.99

Mk/Md: Karşı koyan momentin döndüren momente oranı

Diğer taraftan; kazı boşluğunun uzun kenarının (53.3 m) üst noktaları, düzgün yayılı yük ile yüklenmiş basit bir kirişin elastik eğrisine benzer şekilde yatay olarak yer değiştirmiştir (Şekil 13). Kazı boşluğunun karşı paralel ve kısa kenarında (23.4 m) kayda değer bir yatay yer değiştirmenin oluşmadığı belirlenmiştir. Bu durum, sistem büyüklüğünün (boyut etkisi) deformasyonlar üzerindeki etkisi olarak yorumlanabilir.

Düzgün yayılı yük ile yüklenmiş bir basit kirişte elastik eğri denklemi,

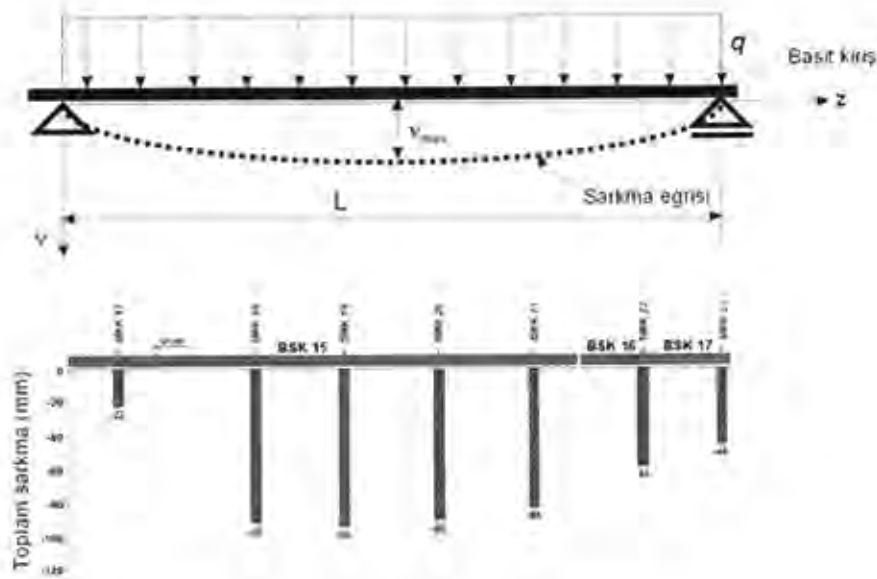
$$v = \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{24} qL^3 z - \frac{1}{12} qL^2 z^2 + \frac{1}{24} z^3 \right) \quad (4)$$

en fazla sarkma ise ($z=L/2$ halinde),

$$v_{\max} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (5)$$

eşitliklerinden belirlenebilir.

Bu eşitliklerde; v , E , I ve L sırasıyla sarkma, elastisite modülü, atalet momenti ve kiriş açıklığını göstermektedir.



Şekil 13. Düzgün yayılı yük ile yüklenmiş basit kiriş ve batı duvarında ölçülen yatay yer değiştirmeler.

Figure 13. Simple beam loaded by uniform force and measured horizontal displacements at the western wall.

Bu çalışmada irdelenen kazı duvarı basit bir kiriş olarak göz önüne alınır ise, uzun kenarı $L_1=53.3$ m, kısa kenarı ise $L_2=23.4$ m olmak üzere, birbirine paralel iki duvardaki yatay yer değiştirme oranı;

$$\frac{v_{1\max}}{v_{2\max}} = \frac{L_1^4}{L_2^4} \quad (6)$$

eşitliğinden belirlenebilir. Buna göre, duvarın uzun olduğu tarafta yatay yer değiştirme, $v_{1\max}=94$ mm olarak ölçüldüğünden, kısa kenarlı duvardaki yatay yer değiştirme $v_2=3.5$ mm olarak hesaplanmıştır. Yerinde yapılan ölçümlerin doğruladığı bu değer ihmal edilecek düzeydedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sanayi İstasyonu kuzey yolcu salonu kazının denetimi için yapılan ölçümlerin sonuçları, istenmeyen deformasyonların aynı kota kadar inen ve yatayda uzunluğu fazla olan batı duvarında geliştiğini göstermektedir. Daha kısa olan diğer duvarlarda kayda değer deformasyonlar ölçülmemiştir. Kazı alanını sınırlayan karşılıklı duvarlarda, kendi içerisinde homojen sayılabilecek ve derine doğru ayrışma derecesi giderek azalan zonlar söz konusudur. Ancak sistemin büyütülmesinin (kazı kesitinin büyütülmesi) dayanım ve davranış üzerindeki olumsuz etkisi dikkate alındığında, laboratuvar deneyi sonuçlarından hareketle, bu zonlar için öngörülen makaslama dayanımının hangi boyutlardaki kazılar için geçerli olabileceği konusu

tartışmaya açıktır. Yolcu salonu kazısının tasarımı ve boyutlandırılması aşamasında yapılan değerlendirmelerde, ortam davranışı üzerinde etkili olan sistem büyüklüğünün etkisi gözden kaçırılmıştır. Kazı ortamı ve çevresinin güvenliğini tehdit eder boyuta ulaşan deformasyonların 4. kademe kazıları, dolayısıyla imalat işlemi ile ilişkili olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Ölçüm sonuçlarından, hareketi engellemek amacıyla sonradan destek sistemine ilave edilen yatay boruların yatay yöndeki ötelenmeyi engellediği saptanmıştır. Destek sisteminin durumu ve oluşan yerdeğiştirme miktarları birlikte değerlendirildiğinde, açılan boşluğa kalıcı betonarme çerçeve (nihai taşıyıcı yapı) yerleştirilmeden yatay destek durumundaki boruların alınmasının duraysızlık riski oluşturacağı görülmüş, bu nedenle anılan boruların boşluğa yerleştirilecek yapının taşıyıcı elemanları oluşturulduktan sonra kesilerek alınması önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- Erdinç, E., 2006. İstanbul Metrosu 4. Levent-Ayazağa kesimi depo hatları ve bağlantı inşaatı, Sanayi İstasyonu kazı iksa hesap raporu, Yüksel Proje, 41. (yayınlanmamış rapor).
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. Institutions of Mining and Metallurgy, London.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1976-2006. R. Ulusay, and J.A. Hudson (eds.), Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Lauffer, H., 1958. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau, Geologie und Bauwesen, 24(1), 46-51.
- Mahmutoğlu, Y., 1998. Mechanical Behaviour of Cyclically Heated Fine Grained Rock, Rock Mechanics and Rock Engineering, 31(3), 169-179.
- Mahmutoğlu, Y., 2006. The effects of strain rate and saturation on a micro-cracked marble, Engineering Geology, 82(3), 137-144.
- Rosenak, S. 1969. Zemin Mekaniği. (Çev: Toğrol, E ve Tümay, M), İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı 749.
- Sauer, G., 1976. Spannungsumlagerung und Oberflächensenkung beim Vortrieb von Tunneln mit geringer Überdeckung. Inst. Boden und Felsmech. Uni., Klie, Helf 67.
- Yüzer, E. ve Vardar, M., 1986. Kaya Mekaniği. İ.T.Ü. Vakfı Yayını, İstanbul.

İSTANBUL'DA ÜRETİLEN FARKLI KÖKENLİ AGREGALARIN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

*The Effects of Different Originated Aggregates Produced in İstanbul
on Concrete Properties*

Burcu GÜLER¹, Atiye TUĞRUL¹, Selahattin HASDEMİR², Sabah YILMAZ ŞAHİN³

¹ İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul

² Set Beton Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Ambarlı, İstanbul

³ İstanbul Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul

ÖZ

İstanbul hızla gelişen ve büyüyen bir yerleşim, sanayi ve ticaret merkezi olarak Türkiye ve Dünya'da yeniden yapılanma açısından ön sıralarda yer almaktadır. Bu büyüme ve gelişmenin getirdiği hızlı ve çağdaş yapılanmanın gereği, kaliteli agrega ihtiyacı artmaktadır. İstanbul'daki agrega ihtiyacının bir bölümü, özellikle Avrupa yakasındaki Ayazağa-Cebeci ve Çatalca Bölgeleri'nde yayılım gösteren kumtaşı ve kireçtaşlarından sağlanmaktadır. Bu çalışmada; İstanbul'un Avrupa yakasındaki Ayazağa-Cebeci-Çatalca bölgelerindeki taş ocaklarından alınan kumtaşları ve kireçtaşlarının jeolojik, mineralojik ve petrografik özelliklerinin yanı sıra, standart agrega ve beton deneyleri ile beton agregası olarak kullanılabilirlikleri agrega kalitesi dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; araştırılan tüm kayalar beton üretiminde kullanılabileceği; ancak, Çatalca ve Cebeci bölgelerindeki kireçtaşlarının daha uygun özelliklere sahip oldukları anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Agrega, beton özellikleri, İstanbul, kireçtaşı, kumtaşı.

ABSTRACT

İstanbul, which is rapidly developing and growing up as a settlement area and industry and trade center, is one of the most important city from the point of reconstruction both in Turkey and the world. The demand of high quality aggregate is increased because of this expansion and development which is brought out fast and modern construction. A part of aggregate requirement in İstanbul is obtained from sandstones and limestones which are widespread in the Ayazağa-Cebeci and Çatalca regions in the European side. In this study; geological, petrographical and mineralogical characteristics of the sandstones and limestones taken from the quarries in Ayazağa, Cebeci and Çatalca regions and also their usability as concrete aggregate with the standard aggregate and concrete tests were correlated from the point of aggregate quality. Based on the results obtained, the rocks studied can be used in concrete production, however, limestone aggregates quarried in the Çatalca and Cebeci regions have more suitable properties.

Key words: Aggregate, concrete properties, İstanbul, limestone, sandstone.

1. GİRİŞ

İstanbul gibi yapılaşmanın hızla arttığı büyük şehirlerde kaliteli beton üretiminin yaygınlaşması, beton bileşiminin yaklaşık % 75'ini oluşturan agrega niteliğinin önemini de arttırmıştır. Beton teknolojisindeki gelişmeyle birlikte günümüzde basınç dayanımı 120 MPa'ı aşan betonlar yapılarda kullanılabilir. Orta ve yüksek dayanımlı betonlarda, su/çimento oranının az olmasından dolayı, agrega türü ve dayanımı oldukça önemlidir. Bu nedenle, kaliteli beton üretebilmek için taze ve sertleşmiş beton performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan agreganın seçiminde dikkatli olunmalıdır. Kayaçların yapısal özellikleri, kimyasal ve mineralojik bileşimleri, petrografik özellikleri ve ayrışma dereceleri, bunlardan üretilen agregaların tane şekli, tane yoğunluğu, dayanımı, dayanıklılığı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı vb. özelliklerini kontrol eder (Ramsay vd., 1974; Fookes, 1980 ve 1991; Al-Jassar ve Hawkins, 1991; Edet, 1992; Williams ve McNamara, 1992; Uribe-Afif, 1994; Akpokodje ve Hudec, 1994, Zarif vd., 2003). Ayrıca agreganın şekli ve yüzey pürüzlülüğü betonda agrega ile çimento arasında kurulacak bağın kuvvetini belirler (Zarif vd., 2003).

Farklı agrega türleri üzerinde araştırmalar yapan Gutierrez ve Canovas (1996), Taşdemir (1998) ve Poitvein (1999); betonun kıvamını etkileyen temel agrega özelliğinin su emme, diğer özelliklerin ise; tane şekli, tane boyu dağılımı, en büyük tane boyutu olduğunu vurgulamışlardır. Poitevin (1999) ayrıca, kireçtaşı agregalarının betonda kullanılabilirliğinin en önemli ölçütlerinden birinin Los Angeles parçalanma dayanımı olduğunu belirtmiştir. De Larrard ve Belloc (1997) ile Özturan ve Çeçen (1997) ise; beton sınıfına göre agrega tercihinin yapılabileceğini, normal ve yüksek dayanımlı betonda agrega sınıfının değiştirilerek daha iyi sonuçlar alınabileceğini vurgulamışlardır. İstanbul'daki kireçtaşlarını agrega kalitesi yönünden değerlendiren Zarif vd. (2003); kireçtaşlarının bileşim ve dokusal olarak farklılıkları üzerinde durmuşlar ve çalışmalarında İstanbul'un kireçtaşlarının agrega olarak birçok alanda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Tuğrul vd. (2006 ve 2008); feldispatik kumtaşları ve kuvarsitlerin betonda agrega olarak kullanılabilirliklerini araştırmışlardır. Bu araştırmacılara göre; kuvarsitlerin kullanılabileceği, feldispatik kumtaşlarının ise ancak iri agrega olarak düşük-orta dayanımlı betonlarda uygun olabileceği belirlenmiştir.

Alkali-agrega reaksiyonunun normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerine etkisini inceleyen Erdoğan (1992), Wakizaka (2000) ve Marzouk ve Langdon (2003); kayaç türünün, tane veya kristal boyutunun, gözenekliliğinin, ortamın nem ve sıcaklığı ile pH değerinin reaksiyon hızını etkilediğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmada; İstanbul'un Ayazağa-Cebeci ve Çatalca bölgelerindeki (Şekil 1) kumtaşı ve kireçtaşı agregalarının yüksek dayanımlı betonda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırmalarda, öncelikle Ayazağa-Cebeci ve Çatalca bölgelerindeki kumtaşı ve kireçtaşı ocaklarından, laboratuvar deneyleri için örneklemeye yapılmış ve bu örneklerden ince kesitler hazırlanarak, polarizan mikroskopta bu kayaçların petrografik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, kumtaşı ve kireçtaşlarının kimyasal bileşenlerinin beton dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkilerinin saptanması için kimyasal analizler de yapılmıştır. İncelenen örnekler üzerinde agrega kalitesini belirlemek amacıyla, standart agrega deneyleri yapılmıştır. Örnekler ayrıca, hızlandı-

rılmış harç çubuğu deneyleri ile alkali-agrega reaksiyonu yönünden de araştırılmıştır. Öte yandan, çalışma kapsamında kullanılan kireçtaşlarının ve kumtaşlarının beton özelliklerine etkilerinin araştırılması amacıyla, laboratuvarda üretilen agregalar ile deneme betonları hazırlanmış ve bunların dayanım özellikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Örneklerin alındığı alanların yer bulduru haritası.

Figure 1. Map showing the sampling locations.

2. KAYAÇLARIN JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Çalışma kapsamında deneme betonlarında agrega olarak kullanılacak olan kireçtaşı ve kumtaşlarının jeolojik özellikleri ve ocaklardaki genel görünüşleri Çizelge 1 ve Şekil 2’de sunulmuştur. Yapılan petrografik ve mineralojik incelemelerin sonuçları ise aşağıdaki paragraflarda tartışılmıştır.

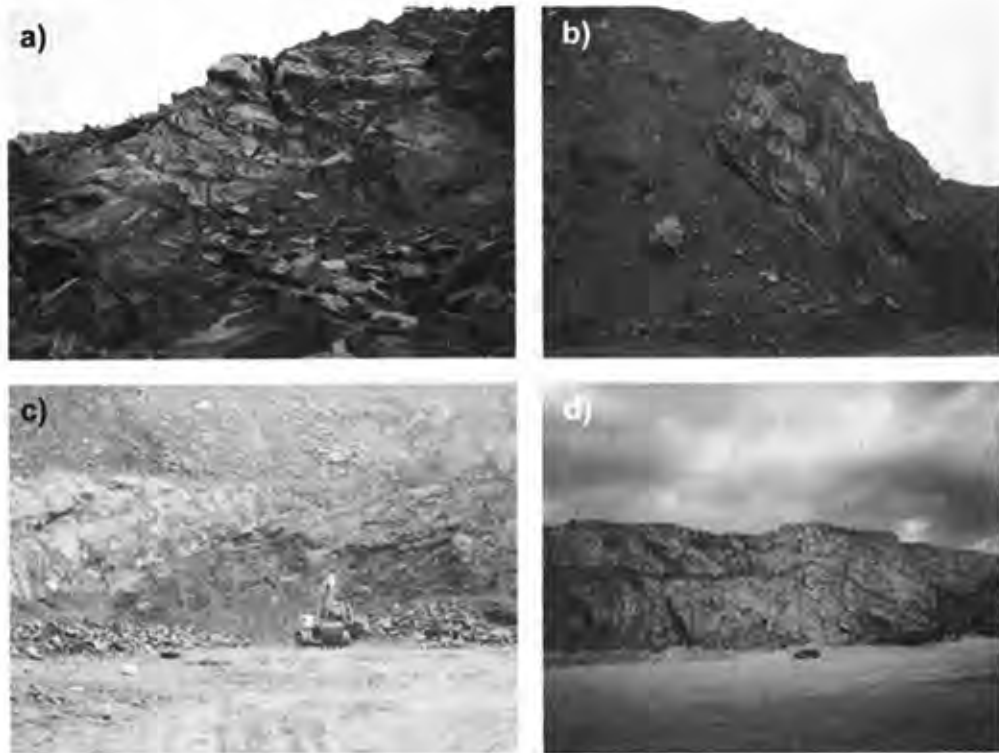
Ayazağa bölgesinden alınan kumtaşları, Trakya formasyonuna ait olup, ince-orta taneli, iyi boyplanmalı ve yuvarlak az köşeli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu kumtaşlarının mineralojik bileşim olarak; kuvars, feldispat, mika minerallerinden, çimento olarak da karbonat bağlayıcı (sparit ve mikrit) ve çok az da kil bağlayıcıdan oluştuğu görülmüştür. Kumtaşları bileşenlerinin yaklaşık yüzde oranları ile Folk (1962)’a göre “subarkoz” olarak sınıflandırılmıştır. Dokusal özellikleri bakımından bazı örnekler ise, “ince-orta taneli kumtaşı” olarak tanımlanmıştır (Şekil 3a). Ayazağa bölgesinden alınan kumtaşlarına ait tüm kayaç X-ışınları kırınım desenleri değerlendirildiğinde, mikroskobik incelemelerden elde edilenlere benzer bulgular elde edilmiştir (Şekil 4a).

Çizelge1. Kumtaşı ve kireçtaşlarının jeolojik özellikleri.

Table 1. Geological characteristics of the sandstones and limestones studied.

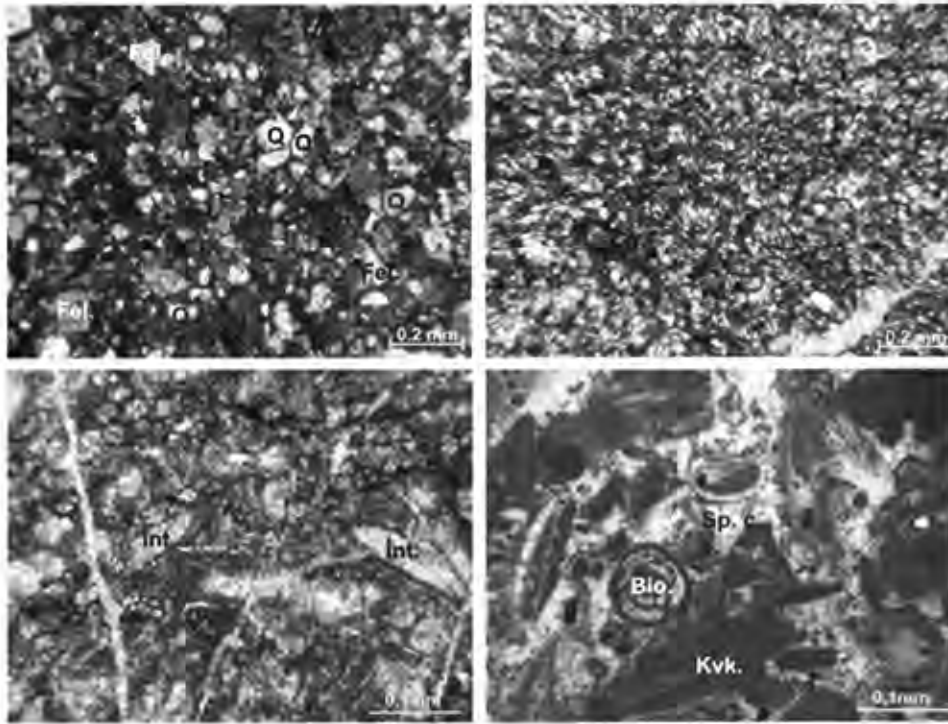
Örnek kodu	Alındığı yer	*Formasyon	Kayaç türü	Genel özellikler	*Yaş
AKT	Ayazağa	Trakya formasyonu	Kumtaşı	Grimsi-siyah, çakıltası, silttaşı ve şeyl ardalanmalı, aşırı derecede kıvrımlı ve kırıklı, çapraz tabakalı, yer yer diyabaz daykı.	Karbonifer
CBKT	Cebeciköy	Trakya formasyonu	Kumtaşı	Gri, orta-kalın tabakalı, şeyl ile ardalanmalı, yer yer diyabaz ve andezit daykı.	Karbonifer
CBKÇ	Cebeciköy	Trakya formasyonu-Cebeci kireçtaşı üyesi	Kireçtaşı	Siyah, killi kireçtaşı ve karbonatlı şeyl ile ardalanmalı, kıvrımlı ve kırıklı, foraminifer, mercan ve brakiyopod fosilli.	Karbonifer
ÇKÇ	Çatalca	Kırklareli kireçtaşı	Resifal kireçtaşı	Açık sarı-beyaz bol çatlaklı, mercan fosilli.	Eosen

*Yurtsever ve Çağlayan, 2002'den alınmıştır.



Şekil 2. İncelenen kireçtaşı ve kumtaşlarının saha görünümüleri: (a) Ayazağa kumtaşı, (b) Cebeciköy kumtaşı, (c) Cebeciköy kireçtaşı, (d) Çatalca kireçtaşları.

Figure 2. Field aspects of the investigated limestones and sandstones: (a) Ayazağa sandstone, (b) Cebeciköy sandstone, (c) Cebeciköy limestone, (d) Çatalca limestones.



Şekil 3. İncelenen kireçtaşı ve kumtaşlarının polarizan mikroskop görüntüleri: (a) Ayazağa kumtaşı (Q: kuvars, Fel.: Feldispat), (Çift Nikol, 25X), (b) Cebeciköy kumtaşı, (Çift Nikol, 25X), (c) Cebeciköy kireçtaşı (İnt.: İntraklast), (Çift Nikol, 63X), (d) Çatalca kireçtaşları (Sp. ç.: Sparit çimento, Bio.: Biyoklast), (Çift Nikol, 63X).

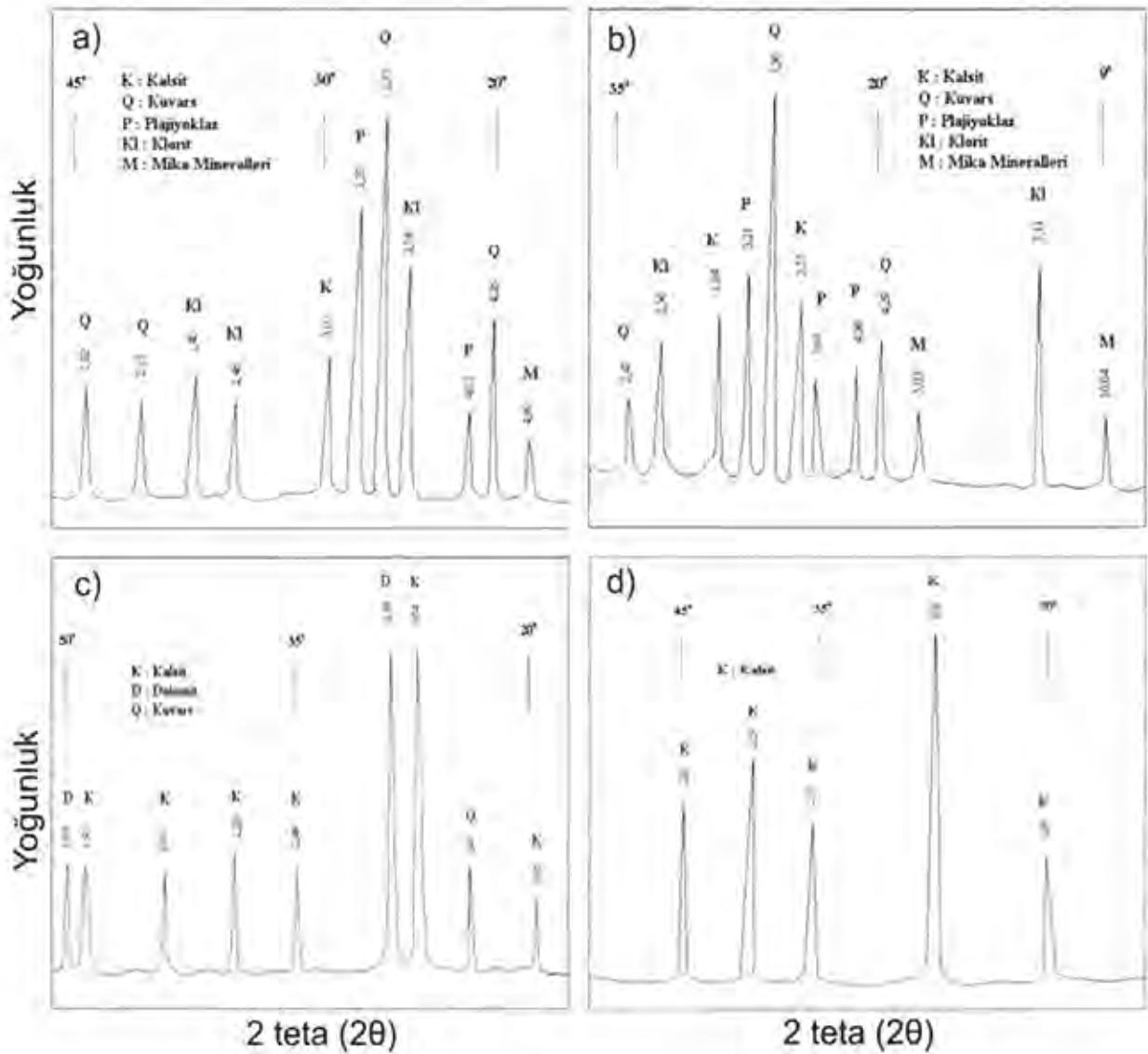
Şekil 3. *Polarizan microscope photographs of the investigated limestone and sandstones: (a) Ayazağa sandstone, (Q: Quartz, Fel.: Feldspar), (Crossed nicol, 25X), (b) Cebeciköy sandstone, (Crossed nicol, 25X), (c) Cebeciköy limestone, (Int.: Intraclast), (Crossed nicol, 63X), (d) Çatalca limestones (Sp. ç.: Sparite cement, Bio.: Bioclast), (Crossed nicol, 63X).*

Trakya formasyonuna ait Cebeci bölgesi kumtaşları; ince taneli, bol kırık ve çatlaklı, iyi boyanmalıdır. Bileşim olarak; kuvars, feldispat, mika mineralleri ile çimento olarak da çok az karbonat bağlayıcıdan oluşmaktadır. Kumtaşları bileşenlerinin yaklaşık yüzde oranları kullanılarak Folk (1962) sınıflamasına göre “subarkoz” olarak sınıflandırılmıştır. Dokusal özellikleri ile tane boyu dikkate alındığında ise; bazı örnekler “ince taneli kumtaşı” veya “meta-silttaşı” olarak da tanımlanmıştır (Şekil 3b). Cebeci bölgesinden alınan kumtaşına ait X-ışınları kırınım desenleri incelendiğinde, mineralojik bileşimin optik mikroskopik incelemelerle uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 4b).

Trakya formasyonunun Cebeciköy bölgesinde yüzeylenen Cebeci kireçtaşı üyesinden alınan kireçtaşları; az kristallenmiş sparit çimentolu kayaçlar ile fosilli mikritik çimentolu kayaçlar olarak tanımlanmıştır. Kayacın içerisinde yer yer yuvarlak fosil kalıntılara ya da kavkılara rastlanmaktadır. Kireçtaşları; bileşenlerinin yaklaşık yüzde oranları kullanılarak Folk (1962) sınıflamasına göre “intra-biyosparit” veya Dunham (1962) sınıflamasına göre tane destekli oldukları için “tane taşı” olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3c). Cebeci bölgesinden alınan kireçtaşına ait tüm kayaç X-ışınları kırınım desenlerine göre karbonatlı kayaçlar ço-

ğunlukla kalsit minerallerinden, daha az olarak da dolomit minerallerinden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, çok az da olsa, kuvars saptanmıştır (Şekil 4c).

Çatalca bölgesinde yüzeylenen Kırklareli kireçtaşıdan alınan örnekler ise, resifal kireçtaşı olarak tanımlanmış olup, bol fosil ve kavkı parçalarıyla, allokem ve mikrosparit türü otokemlerden oluşmaktadır. Kayaç içerisinde intraklast (kireçtaşı parçası) ve mercan fosilleri gözlenmiştir. Kireçtaşları; bileşenlerinin yaklaşık yüzde oranları kullanılarak Folk (1962)'a göre "intra-biyo mikrosparit" ve tane destekli oldukları için de, Dunham (1962)'a göre "tane taşı" olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3d). Çatalca bölgesinden alınan kireçtaşına ait tüm kayaç X-ışınları kırınım desenlerinde birimin tamamen kalsitten oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 4d).



Şekil 4. İncelenen kireçtaşı ve kumtaşlarının XRD analiz sonuçları: (a) Ayazağa kumtaşı, (b) Cebeciköy kumtaşı, (c) Cebeciköy kireçtaşı, (d) Çatalca kireçtaşları.

Figure 4. XRD analysis results of the investigated limestone and sandstones: (a) Ayazağa sandstone, (b) Cebeciköy sandstone, (c) Cebeciköy limestone, (d) Çatalca limestones.

3. KUMTAŞI VE KİREÇTAŞI AGREGALARININ KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Kumtaşı agregalarının içerdiği, betonun katılaşmasına veya sertleşmesine zarar veren, betonun dayanıklılığını azaltan ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşüren kimyasal bileşenlerinin etkilerinin saptanması için; TS EN 1744-1 (2000)'e göre, suda ve asitte çözünen sülfat, toplam kükürt, klorür ve humus içerikleri belirlenmiştir ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Kumtaşı ve kireçtaşı agregalarının kimyasal özellikleri.

Table 2. Chemical properties of sandstone and limestone aggregates.

Agrega kaynağı	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
Suda çözünen sülfat içeriği (%)	0.06	0.11	0.16	0.03
Asitte çözünen sülfat içeriği (%)	0.67	0.62	0.36	0.67
Klorür içeriği (%)	0.11	0.06	0.06	0.05
Toplam kükürt içeriği (%)	0.23	4.08	9.08	0.12
Humus içeriği			YOK	

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Agregaların Özellikleri

Ocaklardaki kırma-eleme tesislerinden alınan agregalar üzerinde tane boyu dağılımı, metilen mavisi, kum eşdeğeri, tane yoğunluğu, su emme, gevşek birim ağırlık, yassılık indeksi, Los Angeles parçalanma, Micro-Deval aşınma ve magnezyum-sülfat ($MgSO_4$) deneyleri ile hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmıştır (Güler, 2006).

Agregaların tane boyu dağılımları TS EN 933-1 (1999)'e göre belirlenmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3'de gösterilmiştir. Bu çizelgede görüldüğü gibi, agregaların tane boyu dağılımları benzerlik sunmaktadır.

İnce agregalar üzerinde TS EN 933-9 (2001)'ya uygun olarak yapılan metilen mavisi deney sonuçları Çizelge 4'de verilmiştir. Bu çizelgede görüldüğü gibi, metilen mavisi değeri en fazla AKT ve CBKT'de bulunmaktadır. TS EN 933-8 (2001)'e göre yapılan kum eşdeğeri deney sonuçlarına göre askıda kalan zararlı malzeme miktarı en çok CBKÇ'de, en az ise AKT'de bulunmaktadır (Çizelge 4). Tane yoğunluğu ve su emme oranı TS EN 1097-6 (2002) esas alınarak yapılmıştır. En yüksek tane yoğunluğu AKT'ye aittir. Su emme oranlarından en yüksek AKT ve CBKT örneğine aittir. Agregaların gevşek birim ağırlık değerleri ise TS EN 1097-3 (1999)'a göre belirlenmiştir. Bu değerlere göre; en yüksek gevşek birim ağırlık CBKÇ'ye, en düşük olan ise ÇKÇ'ye aittir (Çizelge 4).

Çizelge 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan agregaların tane boyu dağılımları.

Table 3. Grain size distributions of the aggregates used in experimental studies.

Elek aralığı (mm)	Kırmataş kumu (0-4mm)				Kırmataş (4-11.2mm)				Kırmataş (11.2-22.4mm)			
	% Geçen											
	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
31.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16.0	100	100	100	100	100	100	100	100	75	64	80	61
8	100	100	100	100	68	58	56	47	1	2	3	0
4	96	99	97	100	2	10	3	3	0	1	0	0
2	62	76	73	99	0	4	1	1	0	0	0	0
1	40	53	49	83	0	1	0	0	0	0	0	0
0.5	26	41	31	58	0	1	0	0	0	0	0	0
0.25	17	14	21	14	0	1	0	0	0	0	0	0

Çizelge 4. Kireçtaşı ve kumtaşı agregalarının özellikleri.

Table 4. Properties of the limestone and sandstone aggregates.

Agrega deneyleri		AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
Metilen mavisi absorpsiyonu (g/Kg)		1.8	1.8	1.2	1.6
Kum eşdeğeri (%)		36	65	83	78
Doygun yüzey kuru tane yoğunluğu (Mg/m ³)	0-4 mm	2.68	2.68	2.67	2.61
	4-11.2 mm	2.71	2.70	2.70	2.60
	11.2-22.4 mm	2.72	2.71	2.71	2.61
Su emme değeri (%)	0-4 mm	1.6	1.6	1.3	1.2
	4-11.2 mm	0.7	0.7	0.8	2.2
	11.2-22.4 mm	0.7	0.5	0.4	1.7
Gevşek birim ağırlık (Mg/m ³)	0-4 mm	1497	1618	1635	1410
	4-11.2 mm	1366	1395	1351	1350
	11.2-22.4 mm	1414	1350	1357	1320
Los Angeles katsayısı (500 devir) (%)		20	22	18	25
Micro-Deval katsayısı (%)		19	17.5	17	24
Magnezyum sülfat değeri (%)		10	12	9	8
Yassılık indeksi (%)		19	20	13	14
Şekil indeksi değeri (%)		18	19	7	10

Agregalar üzerinde TS EN 1097-2 (2000)'e uygun olarak yapılan Los Angeles parçalanma deneyi sonucu Çizelge 4'te verilmiştir. Buna göre; en yüksek Los Angeles katsayısı ÇKÇ'e, en düşük ise CBKÇ'ye aittir. TS EN 1097-1 (2002)'ye uygun olarak yapılan Micro-Deval aşınma deneyi sonucunda, aşınmaya karşı en yüksek direnci %17 ile CBKÇ örneği, en düşük

direnci ise %24 ile ÇKÇ örneği göstermiştir (Çizelge 4). Magnezyum sülfat deneyi TS EN 1367-2 (1999) esas alınarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek magnezyum sülfat değeri %12 ile CBKT örneğine, en düşük değer ise ÇKÇ örneğine aittir. Yassılık indeksi deneyi TS EN 933-3 (1999) esas alınarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek yassılık indeksi değeri CBKT'ye, en düşük ise CBKÇ'ye aittir. (Çizelge 4). Şekil indisi deneyi TS EN 933-4 (1999)'e göre yapılmıştır ve en yüksek şekil indisi değeri CBKT'ye aittir.

Kumtaşı agregalarının alkali-silis reaksiyonu yönünden değerlendirilmesi amacıyla, ASTM C 1260 (1999)'da verilen hızlandırılmış harç çubuğu deney yöntemi kullanılmıştır. Bu deneyle, kumtaşı agregalarının çimento hamuruyla oluşturabileceği reaksiyon sonucu, genişlemesine bağlı olarak boy uzamaları belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I 42.5 R) özellikleri TS EN 197-1 (2002), TS EN 196-2 (2002)'ye göre belirlenmiş ve sonuçlar Çizelge 5'de sunulmuştur. Deneyler, en az üç örnek üzerinde yapılmış olup, genişleme oranları 7, 16, 21 ve 28 günlük dönemler halinde sunulmuştur (Çizelge 6). Kumtaşı örneklerinin 7, 14, 16 ve 21 günlük boyca uzama yüzdelerinin karşılaştırması ise Şekil 5'de sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü gibi, hızlandırılmış harç çubuğu deneylerinde en fazla uzama AKT kodlu örnekte gelişmiştir.

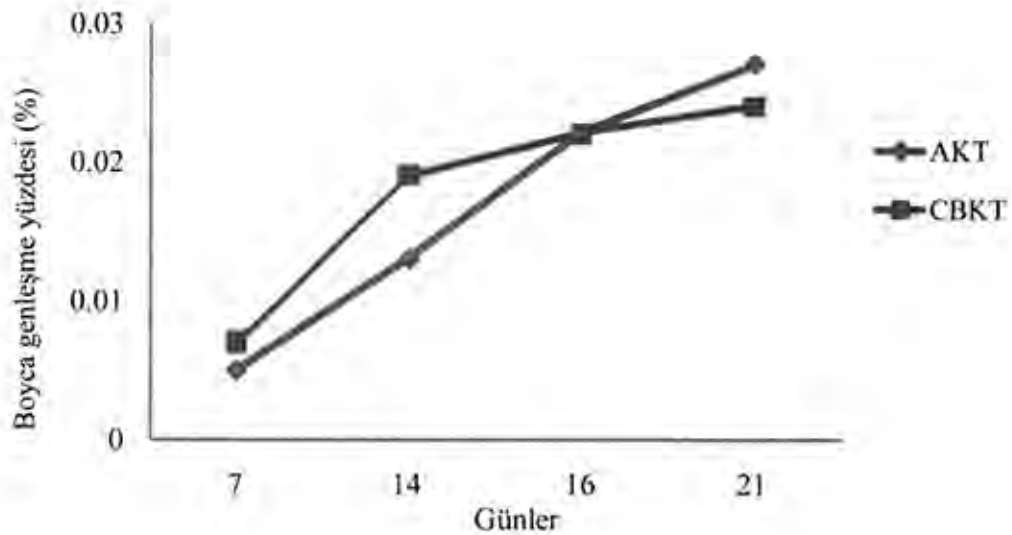
Çizelge 5. Deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I 42.5 R) özellikleri.

Table 5. Properties of the cement (CEM I 42.5 R) used in the experiments.

Kimyasal özellikler	Deney sonuçları
Kızdırma kaybı (%)	2.25
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.25
Magnezyum oksit (MgO) (%)	1.30
Kükürt trioksit (SO ₃) (%)	3.25
Klorür (Cl-) (%)	0.01
SiO ₂ (%)	20.28
Al ₂ O ₃ (%)	4.96
Fe ₂ O ₃ (%)	2.82
CaO (%)	64.48
K ₂ O (%)	0.64
Na ₂ O (%)	0.21
Fiziksel özellikler	
Priz başlangıcı (hh:mm)	03:30
Priz sonu (hh:mm)	04:30
Hacim genişmesi (mm)	1
Özgül yüzey (cm ² /gr)	3647
Mekanik özellikler (Basınç dayanımı)	
2 gün	33.3
7 gün (N/mm ²)	47.2
28 gün	56

Çizelge 6. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi sonuçları.
Table 6., Results of the accelerated mortar bar tests.

	7. Gün	14. Gün	16. Gün	21. Gün
	(%)			
AKT	0.006	0.014	0.022	0.026
	0.005	0.008	0.014	0.019
	0.004	0.016	0.030	0.036
Ortalama	0.005	0.013	0.022	0.027
CBKT	0.005	0.015	0.019	0.021
	0.008	0.018	0.022	0.024
	0.007	0.023	0.026	0.027
Ortalama	0.007	0.019	0.022	0.024



Şekil 5. 7, 14, 16 ve 21 günlük genleşme değerlerinin değişimi.
Figure 5. Changes in expansion values at 7, 14, 16 and 21 days.

4.2. Agregalar ile Üretilen Deneme Betonları ve Özellikleri

Agregaların beton özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla laboratuvarında 8 seriden oluşan deneme betonları üretilmiştir. Taze betonda yapılan deneyler; kıvam tayini, yoğunluk deneyi ve hava içeriği, sertleşmiş betonda yapılan deneyler ise, basınç ve yarmada çekme dayanımı tayinidir.

Çalışma kapsamında kumtaşı ve kireçtaşı agregaları kullanılarak, çimento dozajları farklı (300 kg/m^3 ve 400 kg/m^3) iki beton karışımı hazırlanmıştır (Çizelge 7). Beton karışımları için en uygun tane boyu dağılımı seçilmiş, aynı tür kum ve çimento kullanılmış ve su/çimen-

to oranı sabit tutulmuştur. Beton örnekleri üzerinde gerçekleştirilen araştırmalarda, TS EN 206-1 (2002) Standartları'nda önerilen yöntemler esas alınmıştır.

Üretilen deneme betonlarında CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 5'de sunulmuştur. Bu çizelgede görüldüğü gibi, kullanılan çimentonun özellikleri TS EN 197-1 (2002)'de verilen ölçütlere uygundur.

Üretilen deneme betonlarında, iki farklı katkı maddesi kullanılmıştır. 300 kg/m³ çimento dozajıyla hazırlanan betonlarda WRDA 90 W (Akışkanlaştırıcı ve su azaltıcı katkı maddesi) kullanılırken, 400 kg/m³ çimento dozajıyla hazırlanan betonlarda ise, DARACEM 200 (süper akışkanlaştırıcı ve yüksek oranlı su azaltıcı beton kimyasalı) kullanılmıştır (Çizelge 7).

Çizelge 7. Deneme betonlarının bileşimleri.

Table 7. Compositions of testing concretes.

	Karışım 1*				Karışım 2**			
	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
Su/çimento	0.68	0.72	0.65	0.66	0.46	0.50	0.45	0.45
Çimento (kg/m ³)	300	300	300	300	400	400	400	400
Su (kg/m ³)	205	215	195	198	185	198	178	180
Doğal kum (kg/m ³)	534	509	506	522	517	490	488	503
Kırma kum (kg/m ³)	255	269	296	265	247	259	285	255
Kırmataş (4-11.2 mm) (kg/m ³)	442	454	447	444	428	437	431	429
Kırmataş (11.2-22.4 mm) (kg/m ³)	591	564	598	553	572	544	576	534
Katkı miktarı (kg/m ³)	1.80	1.80	1.80	1.80	4.80	4.80	4.80	4.80

* Karışım 1'de WRDA 90 W kimyasal katkı kullanılmıştır.

** Karışım 2'de DARACEM 200 kimyasal katkı kullanılmıştır.

4.3. Taze Beton Deneyleri

Taze beton kıvamının (veya işlenebilirliğinin) ölçülebilmesi için TS EN 12350-2 (2002)'de önerilen çökme yöntemi kullanılmıştır. İşlenebilirlik özelliğinin sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığına önemli derecede etki etmesi nedeniyle üretilen tüm betonları gerçekçi bir şekilde karşılaştırmak amacıyla çökme değeri sabit tutulmuştur. Karışımların tümünde çökme değerinin 150 mm olması sağlanmıştır (Çizelge 8).

Taze betonun yoğunluğu TS EN 12350-6 (2002)'daki, hava içeriği ise TS EN 12350-7 (2002)'deki esaslara uygun olarak belirlenmiştir. Çizelge 8'den görüldüğü gibi, taze betonun yoğunluğu birinci ve ikinci karışımda en çok CBKÇ'de; hava içeriği birinci karışımda CBKT'de, ikinci karışımda ise ÇKÇ'de elde edilmiştir.

Çizelge 8. Taze beton deney sonuçları.

Table 8. Test results of fresh concrete.

	Karışım 1				Karışım 2			
	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
Çökme (mm)	150	150	150	150	150	150	150	150
Taze beton yoğunluğu (kg/m ³)	2348	2320	2369	2295	2343	2333	2372	2302
Taze beton hava içeriği (%)	2	3.4	2.5	3.1	4.2	3.8	4	5.1

4.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş betonun dayanım özelliklerini belirleyebilmek için Çizelge 7’de özellikleri verilen betonlarla (150x150x150)mm boyutunda küp örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler, üretimden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılarak 202 °C’de kirece doygun su ile dolu kür havuzunda bekletilmiştir. Dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla, basınç ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. TS EN 12390-3 (2003)’e göre 2., 7. ve 28. günde yapılan basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 9’da sunulmuştur. Bu çizelgede görüldüğü gibi, her iki karışım için 2., 7. ve 28. günlerdeki basınç dayanımı en çok ÇKÇ kodlu örneğe aittir. Örnek yaşının 28. gününde TS EN 12390-6 (2002)’ye göre yapılan yarmada çekme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek çekme dayanımı birinci karışım için ÇKÇ’ye, ikinci karışım için ise CBKÇ’ye aittir (Çizelge 9).

Çizelge 9. Sertleşmiş beton deney sonuçları.

Table 9. Test results of hardened concrete.

		Karışım 1				Karışım 2			
		AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ	AKT	CBKT	CBKÇ	ÇKÇ
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	20.6	21.5	26.8	27.3	33.0	34.2	39.0	48.5
	7 gün	31.8	29.4	37.3	37.6	44.4	44.1	50.0	56.1
	28 gün	40.4	37	46.3	47	50.3	52.2	58.3	58.4
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	28 gün	3.5	3.15	3.4	3.9	4.2	4.0	4.7	4.3

5. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Agregalarda bulunan sülfatlar, betonun toplam sülfat içeriğini artırarak betonda zararlı etkilere neden olabilir. Sülfatın zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru arasındaki bağı olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar (Tosun vd., 2003). Çalışmada elde edilen sonuçlara göre; Cebeci bölgesinde üretilen kumtaşı ve kireçtaşı agregalarının suda çözülebilen sülfat içeriği diğer agregalardan daha fazladır (Çizelge 2).

Bu durum, Cebeci bölgesindeki taş ocaklarında kırık zonları boyunca görülen pirit minerallerinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, incelenen agregaların asitte çözünebilen sülfat içerikleri %0.8'den az olduğundan, TS 706 EN 12620 (2003)'e göre değerlendirildiklerinde $AS_{0.8}$ kategorisinde yer almaktadırlar.

Belirli koşullar altında agregalarda mevcut olan kükürt bileşikleri, sülfatları oluşturmak üzere beton içinde indirgenebilirler. Bu bileşikler, ayrıca betonda şişmeye bağlı bozulmaya sebep olurlar. TS 706 EN 12620 (2003), toplam kükürt içeriğinin %1'den az olmasını önermektedir. Cebeci bölgesindeki taş ocaklarında görülen hidrotermal alterasyona bağlı olarak gelişen pirit minerallerinde oksitlenme ile sülfatın açığa çıkması söz konusudur. Bu nedenle, bu bölgede üretilen agregalardaki toplam kükürt miktarı diğer bölgelerde üretilen agregalara oranla çok daha fazladır (Çizelge 2).

Klorürler, miktarları büyük oranda agrega kaynağına bağlı olarak, agregalarda sodyum ve potasyum tuzları halinde bulunabilirler. Bu tür tuzlar, betonun toplam klorür içeriğini arttırarak betonda kullanılan donatının korozyonuna neden olabilir (TS 706 EN 12620, 2003). İncelenen kireçtaşlarının ve kumtaşlarının klorür içerikleri de oldukça düşüktür (Çizelge 2).

Ayazağa-Cebeci kumtaşları ve Cebeci-Çatalca kireçtaşlarında, TS EN 1744-1 (2000)'e göre organik madde tayini için yapılan deneylerde çözelti renginin referans örnekten açık olması, bu kumtaşı ve kireçtaşlarının organik madde içermediğini göstermektedir.

İnce agregalarda çok ince tanelerin kalitesinin belirlenmesinde metilen mavisi ve kum eşdeğeri deney sonuçları kullanılmaktadır. Metilen mavisi deneyi ince agrega içindeki kil, demir oksit ve organik madde miktarını sınıflandırmak için ISSA (1989) tarafından önerilen bir deney yöntemidir. Deney sonucu, ince agrega içinde potansiyel olarak bulunan zararlı malzemenin miktarını gösterir (Kandall vd., 1998; Yool vd., 1998). Düşük absorbsiyon değerleri, absorbsiyonu düşük olan kilin az olduğunu (Stapel ve Verhoef, 1989), kum eşdeğeri ise, ince agregalarda kil ya da toz gibi malzemelerin bağıl oranını gösterir. İncelenen agregaların metilen mavisi değeri 1.2-1.8 g(boya)/kg(örnek), kum eşdeğerleri % 36-83 arasındadır. Kumtaşı agregalarının metilen mavisi değerleri diğer agregalara oranla daha yüksektir. Ayrıca, incelenen agregaların çoğunda metilen mavisi değeri arttıkça kum eşdeğerinin düştüğü görülmektedir (Çizelge 4). Yüksek metilen mavisi değeri; ya da düşük kum eşdeğer yüzdesi agrega kalitesinin düşüklüğüne işaret etmektedir. Nitekim, Eryurtlu vd. (2004), kum eşdeğeri yüksek bir ince agreganın beton özelliklerine olumlu etki ettiğini belirtmişlerdir.

Agrega su emme oranı, agreganın fiziksel ve mekanik özelliklerine ve dayanıklılığa etki eder (Smith ve Collis, 2001). İncelenen agregaların su emme yüzdeleri farklı tane boylarında % 0.4-2.2 arasında değişmektedir (Çizelge 4). Örneklere ait su emme yüzdeleri, içerdikleri kil, feldispat ve mika minerallerinin varlığı ve oranları ile yoğun çatlaklar ve faylanma nedeniyle gelişen ayrışmaya bağlıdır (McNally, 1998). Su emme değeri yüksek agregalar beton karışım suyunun miktarını arttıracığından, dayanımda azalmaya neden olur. Su emme deneyi verilerine göre, tüm örneklere ait su emme değerleri TS 706 EN 12620 (2003) tarafından önerilen üst sınır olan % 3'ten küçüktür.

Agrega dayanımının tayini için yapılan Los Angeles deneyi sonucundaki parçalanma değeri, tane dayanımı hakkında bilgi vermektedir (McNally, 1998). Parçalanma değeri ne kadar az ise, tanelerin mekanik etkilere karşı dayanımının o derece yüksek olduğu kabul edilir. İncelenen agrelarda bu değer % 25'i geçmemektedir (Çizelge 4). Dolayısıyla betonda kullanım yönünden oldukça yeterli parçalanma değerine sahiptirler. TS 706 EN 12620 (2003)'e göre, incelenen agregaların parçalanma dirençlerine göre kategorileri, LA_{20} ve LA_{25} 'dir. Agregaların dayanımının tayininde kullanılan diğer bir yöntem de Micro-Deval deneyidir. Deney sonucunda agregaların aşınmaya karşı göstermiş oldukları direnç belirlenmektedir. TS 706 EN 12620 (2003)'e göre; incelenen agregaların Micro-Deval katsayıları % 17-24 arasında değiştiğinden, kategorileri MDE_{20} - MDE_{25} 'dir. (Çizelge 4). Agregalar her iki deney sonucuna göre değerlendirildiklerinde; Cebeci bölgesinde üretilen kireçtaşları en yüksek, Çatalca bölgesinde üretilen kireçtaşları ise en düşük dayanıma sahiptirler.

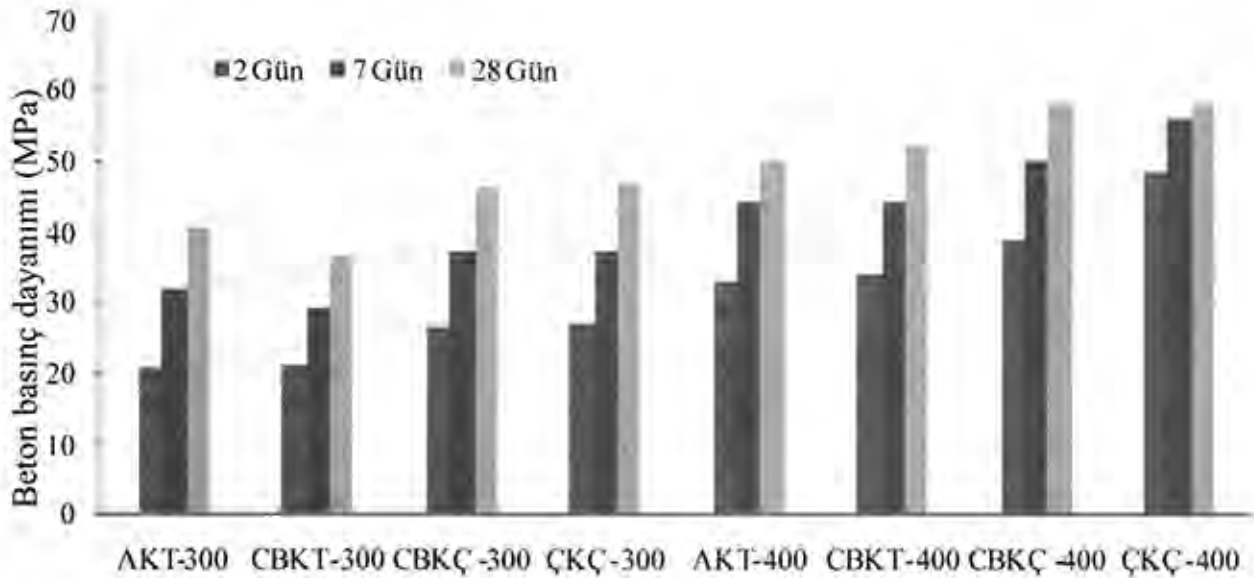
Atmosferik koşullara maruz kalan betonlar için önemli özelliklerden biri de, agreganın donma-çözülme direnci olup, bu özellik agreganın gözenekliliği, su emmesi ve boşluk yapısı ile denetlenmektedir. Agreganın parçalarının çok fazla su emmesi durumunda, donma sırasında hacim değişikliğini gözenekler karşılayamamakta ve bu agregalar kullanılarak imal edilmiş betonda tahribat ortaya çıkmaktadır (Fookes, 1980). TS 706 EN 12620 (2003) tarafından iri agregalarda dona dayanıklılık tayini için kullanılan magnezyum sülfat değerinin % 18'den daha az olması istenmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre; tüm agregaların magnezyum sülfat değeri % 12'in altında olup, yine aynı standarda göre kategorileri MS_{18} 'dir (Çizelge 4).

Agregaların yassılık indekslerinin yüksek olması, dayanımlarının düşük olmasına neden olmaktadır. Yassı taneler ayrıca agregaların yüzey alanını artırdığından, üretilen betonların su/çimento oranını yükseltmekte ve dolayısıyla betonun dayanımını düşürmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan Ayazağa ve Cebeci kumtaşı agregalarındaki yassılık indeksi değerlerinin Cebeci ve Çatalca kireçtaşı agregalarına göre daha yüksek oluşu (Çizelge 4), kumtaşlarının kırıklı çatlaklı yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kumtaşı agregalarının süreksizlik yüzeylerine paralel bir şekilde kırılması da, yassılık değerlerini artırmaktadır. Öte yandan, üretim süreci de agreganın tane şeklinde önemli bir parametredir. TS 706 EN 12620 (2003)'ye göre incelenen agregaların yassılık indekslerine göre kategorileri FI_{20} 'dir.

Agrega araştırmalarında, agreganın tanelerinin şeklinin bilinmesi son derece önemlidir. Agreganın tanelerinin şekli, beton üretiminde iri agregalar için söz konusu olup, daha çok betonun mukavemeti üzerinde etkisi vardır (Baradan, 1991). Beton karışımında fazlaca bulunan biçimsiz agreganın taneleri ayrıca, güç pompalanma ve sıkıştırma işleminin daha zor gerçekleşmesine neden olmaktadır. Taze betonun en önemli özelliği sayılan işlenebilmeyi; agreganın tane boyu dağılımı, en büyük tane boyu, tane şekli ve tanelerin yüzey pürüzlülüğü etkilemektedir (Fookes, 1980). Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre (Çizelge 4); Ayazağa ve Cebeci kumtaşı agregalarındaki şekil indeksi değerlerinin Cebeci ve Çatalca kireçtaşı agregalarına göre daha yüksek oluşu kumtaşlarının bileşim ve dokuları ile mikroçatlaklarından kaynaklanabilir. Ayrıca, yassılık indeksinde olduğu gibi, şekil indeksinde de üretim sürecinin önemi büyüktür. TS 706 EN 12620 (2003)'ye göre incelenen agregaların şekil indeksi açısından kategorileri; SI_{20} 'dir.

Kumtaşlarının ve kireçtaşlarının betonda oluşturabileceği zararlı reaksiyonların araştırılması amacıyla hızlandırılmış harç çubuğu deneyi ASTM C 1260 (1999)'a uygun olarak yapılmıştır. Bu standartta 16 günlük genleşme oranlarına göre değerlendirme yapılması gerektiği belirtilmektedir. Buna göre; 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. Deney verilerine göre; çalışmada kullanılan bütün örnekler zararlı reaksiyonlara neden olmaz. Alkali-silis reaksiyonunun etkilerini belirlemede kullanılan ve benzer deney yöntemlerinden biri olan CSA A23.2-25A (1994)'da ise, 14 günlük genleşme oranları dikkate alınmaktadır. Bu standarda göre; 14 günlük genleşmelerin % 0.1'den fazla olması durumunda, agregalar reaksiyon açısından sakıncalı olarak değerlendirilmektedir. Genel değerlendirmede, tüm örneklerin kullanıldığı harç çubuklarındaki 14 günlük genleşme yüzdesi standart sınırın altındadır (Çizelge 6 ve Şekil 5).

Kumtaşı agregaları, kireçtaşı agregalarına kıyasla; $0.2-0.6 \text{ gr}_{(\text{hoya})}/\text{kg}_{(\text{örnek})}$ daha fazla metilen mavisi değeri ile % 5-7 daha yüksek yassılık indeksi ve % 8-12 yine daha yüksek şekil indeksine sahiptir. Bu değerler, çimento dozajı 300 kg/m^3 olan 1. karışımdaki su miktarını $10-20 \text{ kg/m}^3$, çimento dozajı 400 kg/m^3 olan 2. karışımdaki su miktarını ise $5-20 \text{ kg/m}^3$ artırmıştır. Böylece; kumtaşı agregaları ile üretilen betonların basınç dayanımları, kireçtaşı agregalarıyla üretilen betonların basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında; 1. karışıma ait sertleşmiş betonun 28 günlük basınç dayanımı 7-10 MPa, 2. karışıma ait sertleşmiş betonun 28 günlük basınç dayanımı ise 6-8 MPa daha düşüktür (Şekil 6).



Şekil 6. Kumtaşı ve kireçtaşı agregalarına ait beton basınç dayanım değerleri.

Figure 6. Uniaxial compressive strength values of the sandstone and limestone aggregates.

Çimentonun hidratasyonu sırasında bazı kristal yapıları bileşenler (örneğin Ca(OH)_2) ilk önce çökerek agrega yüzeyini ince bir tabaka halinde kaplamaktadır. Eğer çökelen bu ince tabakanın kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirine uygunsa, bu

yapılar aralarında bir süreklilik oluşturarak bir bağ meydana getirmektedirler. Epitaksik bağlanma olarak anılan bu tip bağ kireçtaşı agregaları kolayca gerçekleştirebilmektedir (Tasong vd., 1998). Cebeci ve Çatalca kireçtaşından oluşan betonda ara yüzey Ayazağa ve Cebeci kumtaşlarından oluşan betona göre daha iyidir. Çatalca kireçtaşıyla üretilen betonun dayanımının, az da olsa, Cebeci kireçtaşıyla üretilen betonun dayanımından fazla olması, Çatalca kireçtaşının tamamen kalsit mineralinden oluşmasından kaynaklanabilir. Bu da, agrega bileşiminin betonun dayanımı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Betonların 28. gündeki yarmada çekme dayanımları değerlendirildiğinde, incelenen agregalarla üretilen tüm beton örneklerinin birbirlerine yakın dayanıma sahip oldukları anlaşılmıştır. Çimento dozu arttırıldığında, üretilen deneme betonlarının yarmada çekme dayanımlarında az oranda artışlar görülmüştür (Çizelge 9).

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ayazağa-Cebeci ve Çatalca Bölgeleri'nden alınan kumtaşı ve kireçtaşı agregalarıyla yapılan deneylerden elde edilen verilere göre; incelenen agregalar kimyasal, fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri yönünden beton agregası kullanılabilirler. Özellikle kireçtaşları, beton agregası olarak kullanılabilirlik yönünden daha uygun özelliklere sahiptir.

Betonun dayanımını arttıran en önemli faktörlerden biri kullanılan agregaların özellikleridir. Kayaçların petrografik özellikleri, mineralojik ve kimyasal bileşimleri, yapısal özellikleri (çatlak ve mikroçatlaklar) ile sertlik ve dayanımları, bu kayaçlardan üretilen agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Nitekim araştırmalar sırasında, farklı agregalar ile üretilen deneme betonlarının bileşimleri, granülometreleri, su/çimento oranları aynı tutulduğu halde, farklı basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu duruma, CaCO_3 bileşimli kireçtaşı agregalarının, çimento hamuruyla epitaksik bağlanma yaparak en iyi aderansı sağlamaları neden olmuştur. Agregalar için en uygun üretim süreci ve gereç seçimi de, üretilen agreganın yassılık ve şeklini, dolayısıyla betonun dayanımını etkileyen önemli parametredir.

KATKI BELİRTME

Bu araştırma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği tarafından T-785/27122005 sayılı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar; İstanbul Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Murat Yılmaz ve Jülide Başalan ile SET Beton A.Ş.'den Bora Yağlı ve Gediz Tancan'a laboratuvar ve arazi çalışmalarındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Akpokodje, E.G., and Hudec, P.P., 1994. The influence of petrology and fabric on the engineering properties of concretionary laterite gravel aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 27, 39-50.

- Al-Jassar, S., and Hawkins, A.B., 1991. The Carboniferous limestone of the Bristol area: a review of the influence of the lithology and chemistry on its use as a geomaterial. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24, 143-158.
- ASTM C 1260, 1999. Standard method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (mortar bar method). *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.02, Concrete and Aggregates, pp.648-651.
- Baradan, B., 1991. Yapı malzemesi II (Bağlayıcı Maddeler, Agregat, Beton). *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları*, No: 207, s. 204.
- CSA (Canadian Standards Association), 1994. Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. A23.2-25A, *Methods of Test for Concrete*, Canadian Standards Association, Ontario, Canada, pp. 236-242.
- De Larrad, F., and Belloc, A., 1997. The influence of aggregate type on the compressive strength of and high strength concrete. *ACI Materials Journal*, 94, 417-426.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: W.E. Ham (ed.), *Classification of Carbonate Rocks*, American Association Petroleum Geologist, 1, 108-121.
- Edet, A., 1992. Physical properties and indirect estimation of microfractures using Nigerian carbonate rocks as examples. *Engineering Geology*, 33, 71-80.
- Erdoğan, M., 1992. Alkali karbonat reaksiyonunun gelişim mekanizması ve nedenleri. *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, 13, 41-47.
- Eryurtlu, D., Işık M. ve Öztekin E., 2004. Kum eşdeğerliği deneyinin beton performansı üzerine etkisinin incelenmesi. *Beton 2004 Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 604-614.
- Folk, R.L., 1962. Spectral subdivision of limestone types. In: W.E. Ham (ed.), *Classification of Carbonate Rocks*, American Association Petroleum Geologist, 1, 62-84.
- Fookes, P.G., 1980. An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 123, 207-229.
- Fookes, P.G., 1991. Geomaterials. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24, 3-15.
- Gutierrez, P.A., and Canovas, M.F., 1996. High performance concrete requirements for constituent materials and mix proportioning, *ACI Materials Journal*, 93, 233-241.
- Güler, B., 2006. İstanbul Ayazağa-Cebeci-Çatalca bölgelerindeki agrega kaynaklarının yüksek dayanımlı betonda kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- ISSA (International Slurry Seal Association), 1989. Test method for determination of methylene blue absorption value (MBV) of mineral maggregate filler and fines. ISSA Bulletin, pp.145.
- Kandall, P. S., Lynn C.Y., and Parker, F., 1998. Tests for plastic fines in aggregates related to stripping in asphalt paving mixtures. National Center of Asphalt Technology Report No. 98-3, Auburn University, Alabama.
- Marzouk, H., and Langdon, S., 2003. The effect of alkali aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. Cement and Concrete Composites, 25, 549-556.
- McNally, G.H., 1998. Soil and rock construction materials. E and FN Spon, London.
- Özturan, T., and Çeçen, C., 1997. Effect of aggregate type on the mechanical properties of concretes with different strengths. Cement and Concrete Research, 27, 165-170.
- Poitevin, P., 1999. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. Cement and Concrete Composites, 21, 89-97.
- Ramsay, D.M., Dhir, R.K., and Spence, I.M., 1974. The role of rock and clast fabric in the physical performance of crushed-rock aggregate. Engineering Geology, 8, 267-285.
- Smith, M.R., and Collis, L. (eds.), 2001. Agregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geological Society, Engineering Geology Special Publication 17, London.
- Stapel, E.E., and Verhoef, P.N.W., 1989. The use of the methylene blue adsorption test in assessing the quality of basaltic tuff rock aggregate. Engineering Geology, 26, 233-246.
- Tasong, WA., Cripps, J.C., and Lynsdale, C.J., 1998. Aggregate-cement chemical interactions. Cement and Concrete Research, 28, 1037-1048.
- Taşdemir, C., 1998. The influence of aggregate type on the mechanical properties of concrete. Proceedings of the 12th European Ready Mixed Concrete Congress, Lisbon, pp.633-640.
- Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H. ve Baradan, B., 2003. Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi. 5. Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, s.17-26.
- TS EN 196-2, 2002. Çimentonun kimyasal analizi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.27.

- TS EN 197-1, 2002. Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.21.
- TS EN 206-1. Beton: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.63.
- TS EN 933-1, 1999. Agregaların tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.8.
- TS EN 933-3, 1999. Tane şekli tayini-yassılık endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.6.
- TS EN 933-4, 2001. Tane şekli tayini-şekil indisi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.6.
- TS EN 933-8, 2001. İnce tanelerin tayini-kum eşdeğeri deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.12.
- TS EN 933-9, 2001. İnce tanelerin tayini-metilen mavisi deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.10.
- TS EN 1097-1, 2002. Aşınmaya karşı direncin tayini-Mikro Deval. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.8.
- TS EN 1097-2, 2000. Parçalanma direncinin tayini için metodlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.25.
- TS EN 1097-3, 1999. Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.9.
- TS EN 1097-6, 2002. Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.24.
- TS EN 1367-2, 1999. Magnezyum sülfat deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.8.
- TS EN 1744-1, 2000. Kimyasal analiz. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.40.
- TS EN 12350-2, 2002. Taze betonda çökme (slamp) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.4.
- TS EN 12350-6, 2002. Taze betonda yoğunluk tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.6.
- TS EN 12350-7, 2002. Taze betonda hava içeriğinin tayini-basınç metodları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.15.

- TS EN 12390-3, 2002. Deney numunelerinde basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.12.
- TS EN 12390-6, 2002. Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.8.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s.40.
- Tuğrul, A., Kara, G., Ündül, O. ve Ertuğrul, C., 2006. İstanbul Çatalca bölgesindeki kuvarsitlerin alternatif beton agregası olarak değerlendirilmesi. 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul, s.179-193.
- Tuğrul, A., Kara, G., Yılmaz, M., Ündül, Ö. ve Buldum, M., 2008. İstanbul'un Anadolu yakasındaki kumtaşlarının beton üretiminde kullanılabilirlikleri. Beton 2008: Hazır Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, s. 130-144.
- Uribe-Afif, R., 1994. Study of petrous aggregates for concrete in Zimapan arch dam in Mexico. Proceedings of 7th International IAEG Congress, pp. 3229-3233.
- Wakizaka, Y., 2000. Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. Engineering Geology, 56 (1-2), 211-221.
- Williams, D.M., and McNamara, K., 1992. Limestone to dolomite to dedolomite conversion and its effect on rock strength: a case study. Quarterly Journal of Engineering Geology, 24, 131-135.
- Yool, A.I.G., Lees, T.P., and Freid, A., 1998. Improvements to the methylene blue dye test for harmful clay in aggregates for concrete and mortar. Cement and Concrete Research, 28, 1417-1428.
- Yurtsever, A. ve Çağlayan M.A., 2002. 1:100 000 ölçekli açınsama nitelikli türkiye jeoloji haritaları No:65, İstanbul F-21 ve G-21 paftaları. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, s.30.
- Zarif, İ.H., Tuğrul, A. ve Dursun, G., 2003. İstanbul'daki kireçtaşlarının agrega kalitesi yönünden değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 16, 61-70.

AYRIŞMANIN DUNIT VE DİYORİTİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dunite and Diorite

Ömer ÜNDÜL, Atiye TUĞRUL

İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul

ÖZ

Kaya ortamlarında gerçekleştirilen mühendislik çalışmalarında kaya kütlelerinin dayanımını azaltan ayrışma araştırmacılar tarafından dikkate alınmaktadır. Ayrışmamış ve/veya az ayrışmış ultramafik kayaçların genel olarak sert ve sağlam kaya sınıfında olduğu bilinmektedir. Ayrışma derecesinin artması ile bu tür kayaçların dayanımı azalmaktadır. Bu çalışmada, Bursa-Orhaneli bölgesinde yüzeyleyen dunit ve diyoritlerin mühendislik özelliklerinin ayrışmaya bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla, sahada çalışma alanının jeolojisi incelenmiş, gözlemsel olarak ayrışma dereceleri tespit edilmiş ve süreksizlik özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvarda kayaçların mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik özellikleri ile ultrasonik dalga hızları ve suda dağılmaya karşı duraylılık indeksleri belirlenerek ayrışmaya bağlı değişimleri saptanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, dunit ve diyoritler fiziksel ve ağırlıklı olarak kimyasal ayrışma ile hidrotermal alterasyona uğradıkları tespit edilmiştir. Ayrışma derecesinin artmasıyla, dunit ve diyoritlerin özgül ağırlık, kuru ve doymun birim hacim ağırlık, ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinde azalmalar, su emme ve etkin gözeneklilik değerlerinde ise artışlar gözlenmiştir. Dunitlerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimlerin serpantinleşmeye bağlı olduğu, diyoritlerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimlerin ise; mikro kırıkların artmasına, mineraller arası bağın zayıflamasına ve tane boyundaki küçülmeye bağlı olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ayrışma, diyorit, dunit, fiziko-mekanik özellikler, Orhaneli.

ABSTRACT

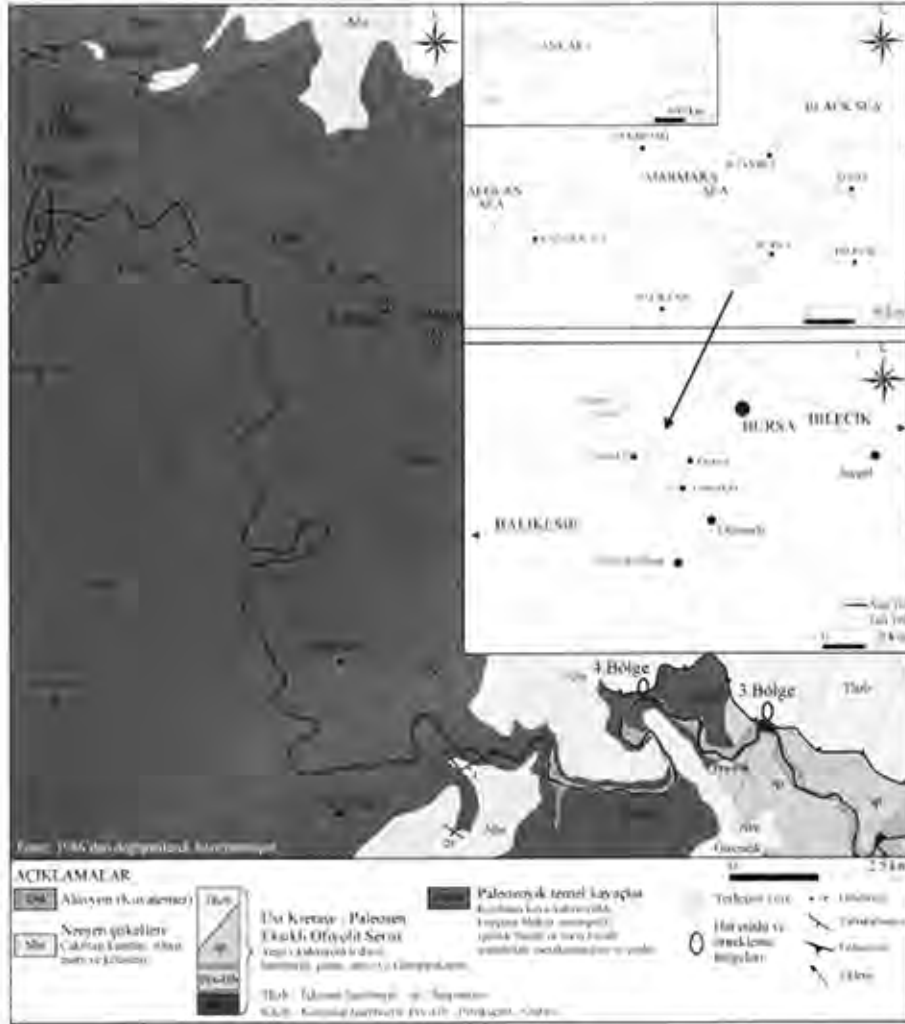
Weathering that reduces the strength of the rock mass is taken into account by researchers in engineering studies that are carried on rock masses. It is known that fresh and/or slightly weathered ultramafic rocks are generally hard and sound rock types. As the degree of weathering increases the strength of these rocks decreases. In this study, variation of engineering properties of dunites and diorites cropping out in Bursa-Orhaneli region due to weathering was investigated. For the purpose, the geological properties of the study area were investigated, the weathering grades and discontinuity properties were determined by field observations. The mineralogical, petrographical and physico-mechanical properties with ultrasonic velocities and slake durability index were determined in laboratory by considering the vari-

ations due to weathering. Based on the evaluation of the data obtained, it was concluded that the dunite and diorite have been affected by the chemical and physical weathering processes and hydrothermal alteration. As the weathering grades increase the specific gravity, dry and saturated unit weights, ultrasonic velocities and uniaxial compressive strength of dunites and diorites sharply decrease, while the water absorption and effective porosity values increase. It is stated that the changes of engineering properties of dunites are associated with serpentinization and changes in engineering properties of diorites are associated with the increase of microcracks, the weakening of the bonding between minerals and the decrease in grain size.

Keywords: *Weathering, diorite, dunite, physico-mechanical properties, Orhaneli.*

1. GİRİŞ

Ayrışma, kaya ve zeminlerin yüzeyde ve/veya yüzeye yakın derinliklerde kimyasal, fiziksel ve biyolojik süreçlerin etkisi altında kil, demiroksit ve diğer ayrışma ürünlerine dönüşmesi ve parçalanması olayı (Ollier, 1984; Selby, 1993; ANON, 1995) olup, kaya malzemesinin ve kütlesinin özelliklerinde değişime neden olmaktadır. Bu sebeple ayrışma derinliği ve ayrışma derecelerinin belirlenmesi, mühendislik çalışmaları öncesinde yapılması gereken önemli çalışmalardandır. Ayrışma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla magmatik kayalarda, (örneğin; Sowers, 1971; Currey, 1977; Kılıç, 1995 a, b; Tuğrul ve Gürpınar 1997; Kılıç, 1999; Kılıç ve Bilgehan, 1999; Arel ve Tuğrul, 2001; Das vd., 2005; Orhan vd., 2006; Arıkan vd., 2007; Ceryan, 2008), metamorfik kayalarda (örneğin; Komoo ve Yaakub, 1990; Price ve Velbel, 2003) ve sedimenter kayalarda (örneğin; Chigira ve Oyama, 1999; Tuğrul ve Zarif, 2000; Avigad vd., 2005; Turkington ve Paradise, 2005) çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, hem malzeme hem de kaya kütlesi ölçeklerinde genel ayrışma sınıflamasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır (Little, 1969; Deere ve Patton, 1971; ANON, 1972, 1977 ve 1995; ISRM, 2007). Ultramafik kayaların ayrışma özelliklerinin arazide gözlenebilmesinde, ayırt edilebilmesinde ve laboratuvar çalışmaları için standartlara ve önerilmiş yöntemlere uygun deney örneği hazırlanmasında güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bunun yanı sıra, serpantinitlede mühendislik özelliklerinin değerlendirildiği ve ayrışmaya değinilen çalışmalar da bulunmaktadır (Kılıç vd., 1998; Brideau vd., 2007; Diamantis vd., 2009). Bu çalışmada; Bursa-Orhaneli bölgesinde yüzeylenen dunit ve diyoritlerin petrografik ve fiziko-mekanik özelliklerinin ayrışma dereceleri ile değişimleri araştırılmıştır. Araştırma arazide onaltı dunit (Şekil 1; 1., 2., 3. ve 4. bölgeler) ve dört diyorit profili (Şekil 1; 5. ve 6. bölgeler) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, ANON (1995) tarafından önerilmiş olan altı dereceli ayrışma sınıflaması kullanılmıştır. Çalışılan profillerde renk değişimleri, çatlak sistemleri, kaya dokusunun orijinal durumunun ne kadar korunduğu, kaya-zemin oranları ve dayanım değişimleri dikkate alınmıştır. Laboratuvarda ise, ince kesitler üzerinde petrografik incelemeler ile fiziksel özelliklerin belirlenmesine yönelik deneyler, tek eksenli sıkışma dayanımı, ultrasonik dalga hızları ve suda dağılmaya karşı dayanım deneyleri yapılmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru ve jeoloji haritaları.
Figure 1. Location and geological maps of the study area.

2. İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde Paleozoyik yaşlı temeli oluşturan metamorfik kayalar ile bunları bindirmelerle üzerleyen Mesozoyik (Üst Kretase) dönemine ait birimler gözlenmektedir. Bu birimler; Senozoyik (Miyosen-Pliyosen) yaşlı karasal çökeller tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir. Bölgedeki yüksek debili nehirler hafif engebeli arazilerde alüvyon birikintileri oluşturmuştur. Özellikle ayrışma etkisi ile serbestlenen irili ufaklı bloklar yamaç molozlarını oluşturmaktadır. Bu çalışma, pek çok araştırmacı (Özkoçak, 1969; Bingöl, 1974; Okay vd., 1998, Manav vd., 2004) tarafından araştırılmış olan ve Orhaneli ofiyoliti olarak adlandırılan (Emre, 1986) Üst Kretase-Paleosen yaşlı kayalar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanının neredeyse tamamını kapsayan ofiyolit içerisinde, ideal bir ofiyolit istifinde en altta bulunması gereken tektonitler, ofiyolit oluşum sürecinde ve sonrasında geçirdiği yoğun tektonizma sonucu istifin en üst kesimlerinde bulunmaktadır. İstif alttan üste doğru; yeşilimsi kahverenkli, alacalı koyu yeşil kümülat harzburjitler, bunların içerisindeki krom içeren dunit seviyeleri ve kümülat harzburjitleri kesen piroksenit ve mikrogabro damarlarından oluşmaktadır. Kümülat harzburjitlerin üzerinde ise, piroksenit gablo ile bunların da üzerindeki serpantinitle istifte yer almaktadır (Emre, 1986).

Arazi gözlemleri ile araziden alınan örnekler üzerinde yapılan petrografik çalışmaların ışığında; ofiyolit istifinde dunit, harzburgit, lertzolit, piroksenit ve bunların çeşitli derecelerde serpantinleşmiş seviyeleri ile serpantin ve diyorit türü kayalar olduğu belirlenmiştir. Orhaneli Ofiyoliti Miyosen-Pliyosen yaşlı çakıltası kumtaşı, siltaşı, marn ve kiltaşlarından oluşan Burmu formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülmektedir (Özkoçak, 1969; Emre, 1986).

3. İNCELENEN KAYAÇLARIN LİTOLOJİK VE PETROGRAFİK ÖZELLİKLERİNİN AYRIŞMAYA BAĞLI DEĞİŞİMLERİ

Arazi çalışmalarından elde edilen örneklerden dunitlere ait 82 ve diyoritlere ait 49 ince kesit hazırlanmıştır. Farklı ayrışma derecelerine sahip farklı seviyelerden alınmış örneklerden hazırlanan ince kesitler üzerinde polarizan mikroskobu ile mineral türleri, ayrışmış mineral yüzdeleri ve opak mineral yüzdeleri belirlenmiştir. Ayrıca mikroçatlak durumuna göre de değerlendirmeler yapılmıştır. İncelemelerde, kayalarındaki hidrotermal alterasyon etkileri de göz önünde bulundurulmuştur. İncelenen kayaların genel petrografik özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. İncelenen kayaların petrografik özellikleri.

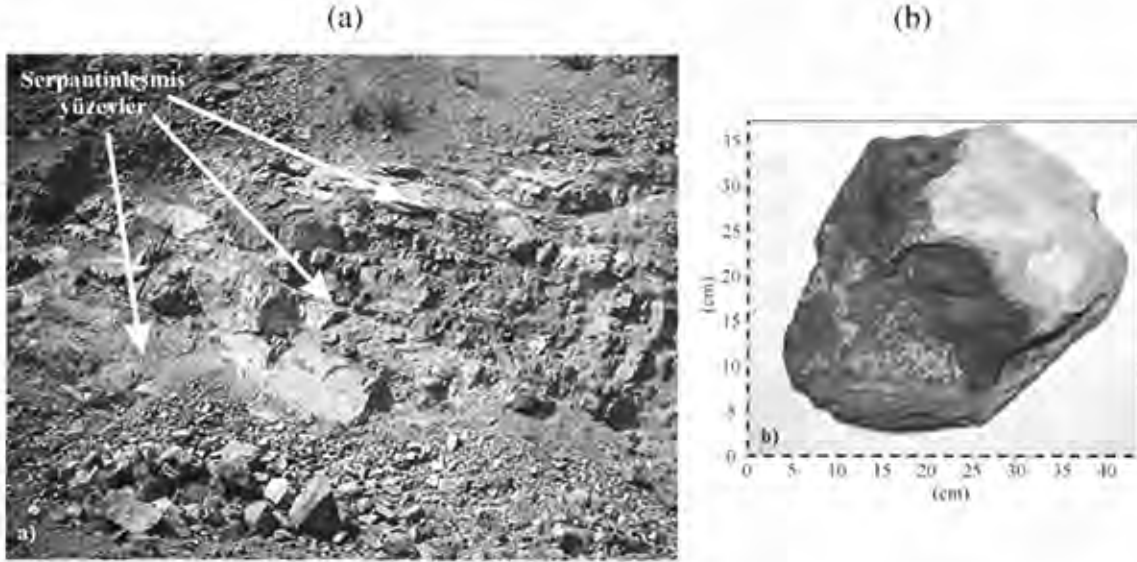
Table 1. Petrographical properties of the investigated rocks.

Kayaç ismi	Mineralojik bileşim	Ayrışma ile gelişen mineraller
Dunit	%90'dan fazla olivin (Genelde, forsterit ve fayalit minerallerinden oluşmaktadır).	Serpantin, brunit, iddingsit, demir oksit, kil mineralleri, talk ve yer yer karbonat gelişimi.
Diyorit	Taze plajiyoklaslar (An_{22-40}), amfibol (genel olarak tremolit/aktinolit, daha az olarak da hornblend türünde), çok az miktarda da piroksen ve kuvars içermektedir.	Amfibol minerallerinden tremolit - aktinolit oluşumları, epidot, klorit, albit veserisit gelişimi. Plajiyoklaslar da kil mineralleri, serisit, silis, klorit gelişimi söz konusudur.

3.1. Dunitlerin Litolojik ve Petrografik Özellikleri

Orhaneli Ofiyoliti içerisindeki dunitler genelde; alacalı koyu yeşil, kahverengi ve siyahımsı, yer yer çok çatlaklı, çatlaklı ve ender olarak masif şekilde gözlenmektedir. Taze yüzeyleri boyunca siyaha yakın çok koyu yeşil ve siyah renklere sahiptir. Ayrışma dereceleri arttıkça yüzeyleri farklı tonda kahverengiye dönüşmekte, çekirdek taşları ise mat siyah renkte gözlenmektedir. Ayrışma derecesinin artmasıyla siyah mat kesim kaybolmakta ve demir oksitçe zenginleşen kahverengili bölge kayacın tüm rengini oluşturmaktadır (Şekil 2a ve 2b). Ayrışma derecesinin artmasıyla kayaç tamamen serpantinleşmektedir. Bu durumda kayaç yüzeyi, çok az beyaz bantların bulunduğu çeşitli tonlarda yeşilin hakim olduğu, kaygan, pürüzsüz, sabunsu-yagşı ve yer yer hafif dalgalı bir görünüm almaktadır. Kayacın içine doğru kaygan-

lık azalmakta, ancak siyahımsı koyu yeşil renk karakteristik olarak kendisini korumaktadır. Ender de olsa, çok az pürüzlü kesimlere rastlanmıştır. Dunitlerin süreksizlik aralığı taze-az ayrılmış seviyelerde ortalama 95.6 cm iken ileri derecede ayrılmış seviyelerde 17.4cm'e düşmektedir (Ündül, 2007). Dunit bileşimli kayalarda, özellikle süreksizlik yüzeyleri boyunca değişik seviyelerde serpantinleşme, asbestleşme, serisitleşme, killeşme, talklaşma, karbonatlaşma ve kloritleşme saptanmıştır.



Şekil 2. Dunitlerin çevresinde serpantinleşme ve demir oksitleşme oluşumu: (a) serpantinleşmiş yüzeylerin görünümü, (b) dunitin çevresinde gelişen demir oksitleşme ve serpantinleşmenin görünümü.

Figure 2. Serpentinization and iron oxide formation around dunite: (a) view of serpentinized surfaces, (b) view of iron oxide formation and serpentinization around dunite.

İncelenen dunitlerin bileşimlerinde %90'ın üzerinde olivin mineralinin yanı sıra, %5-9 arası orto- ve klino-piroksen belirlenmiştir. Ayrıca kromit cevherleşmeleri ile manyetit türü opak minerallere de % 5'ten az oranlarda rastlanılmıştır. Dunitlerin ana bileşeni olan olivin minerali $[(Mg, Fe)_2SiO_4]$, genelde forsterit (Mg_2SiO_4) ve fayalit (Fe_2SiO_4) minerallerinden oluşmaktadır. İnce kesitlerde, ortorombik kristal yapısı ve yüksek optik engebe gözlenmiştir. Dunitler, sarımsı yeşilden, yeşil-koyu yeşil ve siyaha kadar değişen renklere sahiptir.

Dunitlerin bünyelerine suyun girmesi nedeniyle ayrışmaları sonucu en yaygın ve en önemli olarak serpantinleşme ve brusitleşme gelişmektedir. Bunların yanı sıra, iddingsitleşme, demir oksitleşme (FeO), killeşme, talklaşma ve yer yer karbonatlaşmalar hakimdir.

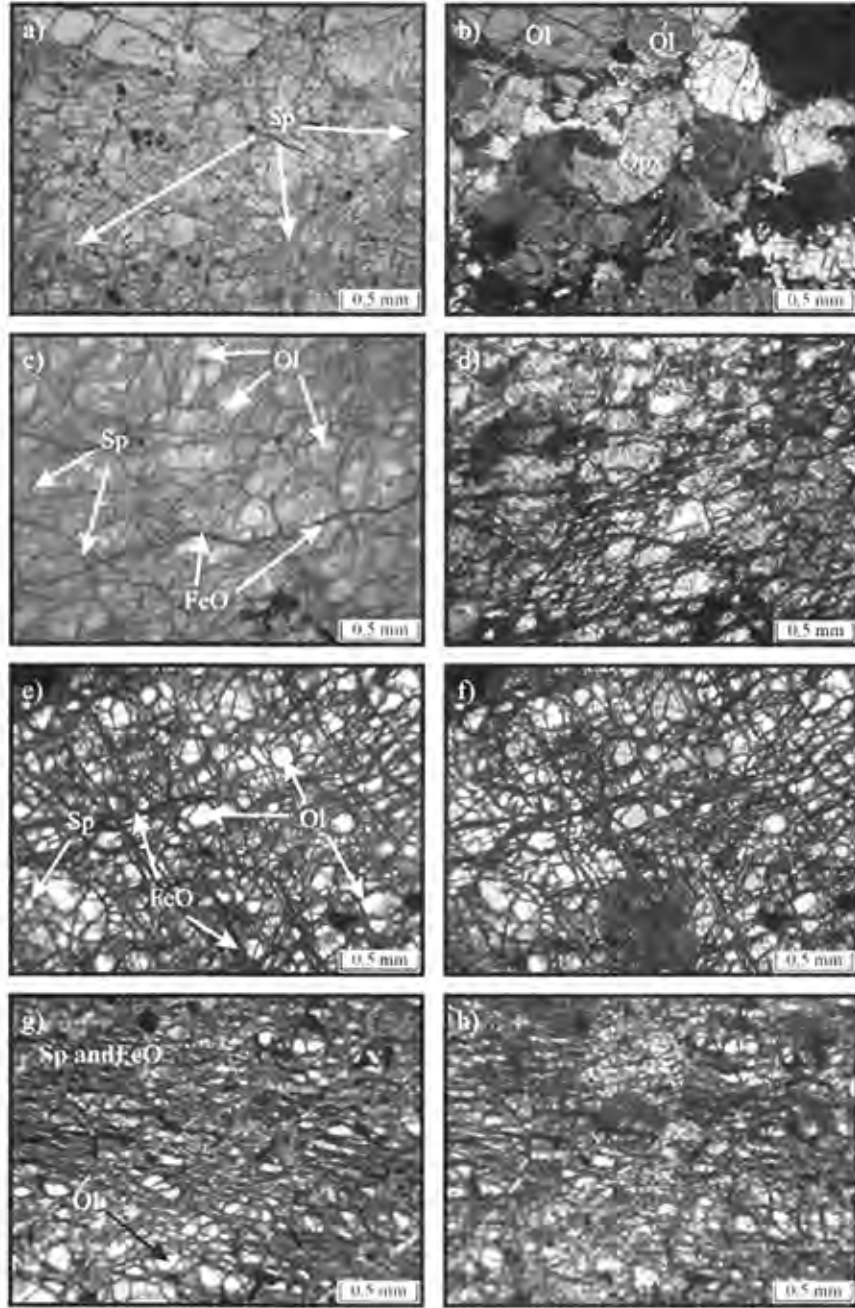
Petrografik incelemeler sırasında; serpantinleşme derecesine göre krizotil ve lizardit türü serpantin mineralleri tayin edilmiştir. Tipik elek dokusunun çok net olarak gözlemlendiği örneklerde manyetit, kromit vb. opak cevher minerallerine rastlanmıştır. Ayrışma derecesinin artmasıyla olivin minerallerinin tamamen serpantinleşmesinden dolayı sadece dokuları gözlenebilmiştir. Ayrıca, en az üç yönlü mikroçatlak sistemleri de belirlenmiştir.

Tam kristalli tanesal doku ile birlikte elek dokusuna sahip örneklerde serpantinleşmenin yanı sıra, killeşme, talklaşma, karbonatlaşma, opaklaşma ve demir oksitleşmeler gözlenmiştir. Ayrıca % 5-9 arasında değişen miktarlardaki piroksenlerde bastitleşmeler tespit edilmiştir. Farklı ayrışma seviyelerine ait ince kesit örneklerinin ayrıntılı petrografik incelemelerinden elde edilen veriler Çizelge 2’de sunulmuştur. Ayrışmamış dunitte ait piroksence zengin zon ve tanesal doku ile az ayrışmış, orta derecede ayrışmış ve orta-ileri derecede ayrışmış seviyelere ait polarizan mikroskop görüntüleri Şekil 3’te sırasıyla sunulmuştur.

Çizelge 2. Farklı derecelerde ayrışmış dunitlere ait petrografik özellikler.

Table 2. Petrographical properties of dunit with different weathering grades.

	W I	W II	W III	W IV
Petrografik tanımlama	Kısmen serpantinleşmiş dunit	Az serpantinleşmiş dunit	Serpantinleşmiş dunit	Serpantinleşmiş dunit
Bileşim	Olivin ve enstatit.	Çok az miktarda korunmuş olivin bulunmakta.	Krizotil türü serpantin mineralleri yaygın.	Krizotil türü serpantin mineralleri yaygın
Doku	Tüm kristalli tanesal doku.	Ağsı doku, tüm kristalli tanesal doku.	Kısmen elek dokusu, kısmen lifsi serpantin.	Kısmen elek dokusu, kısmen lifsi serpantin.
Ayrışma türleri	Çatlaklar boyunca yer yer serpantinleşmiş ve adacıklar şeklinde korunmuş olivin. Çok az talklaşma, az oranda demiroksit minerallerine dönüşüm ile çok az killeşme ve epidotlaşma.	Çatlaklar boyunca serpantinleşme, talklaşma ve karbonatlaşma.	Genişleyen çatlaklar serpantin mineralleriyle, adacıkların içi ise demir oksit ve kil mineralleri ile dolmuş. Lifsi serpantin mineralleri gelişmiş.	Olivinler tamamen serpantinleşmiş, adacıklar küçülmüş.
Opak mineraller	Çatlaklar boyunca opaklaşma mevcut. Yer yer kromit, nadiren manyetit bulunmakta.	Kromit, nadiren manyetit.	Manyetit ve kromit	Manyetit ve kromit
Mikroçatlak durumu	Hem olivin hem piroksenlerde mikroçatlaklar mevcut. Mikroçatlaklar serpantin ve opak minerallerle, daha büyük çatlaklar ise kalsit mineralleri ile dolmuş.	Birbirini kesen çatlaklar ve mikroçatlaklar mevcut. Kalın olanlar serpantin mineralleri ile dolmuş.	Düzensiz çatlaklar, en az üç egemen çatlak yönü ve bunlara aykırı çatlaklar.	Düzensiz, farklı yönlerde çatlaklar ve bunları kesen ikincil çatlaklar mevcut
I _p	Ortalama	2.30	2.11	0.70
	En küçük	1.67	1.63	0.41
	En büyük	2.78	2.68	0.98

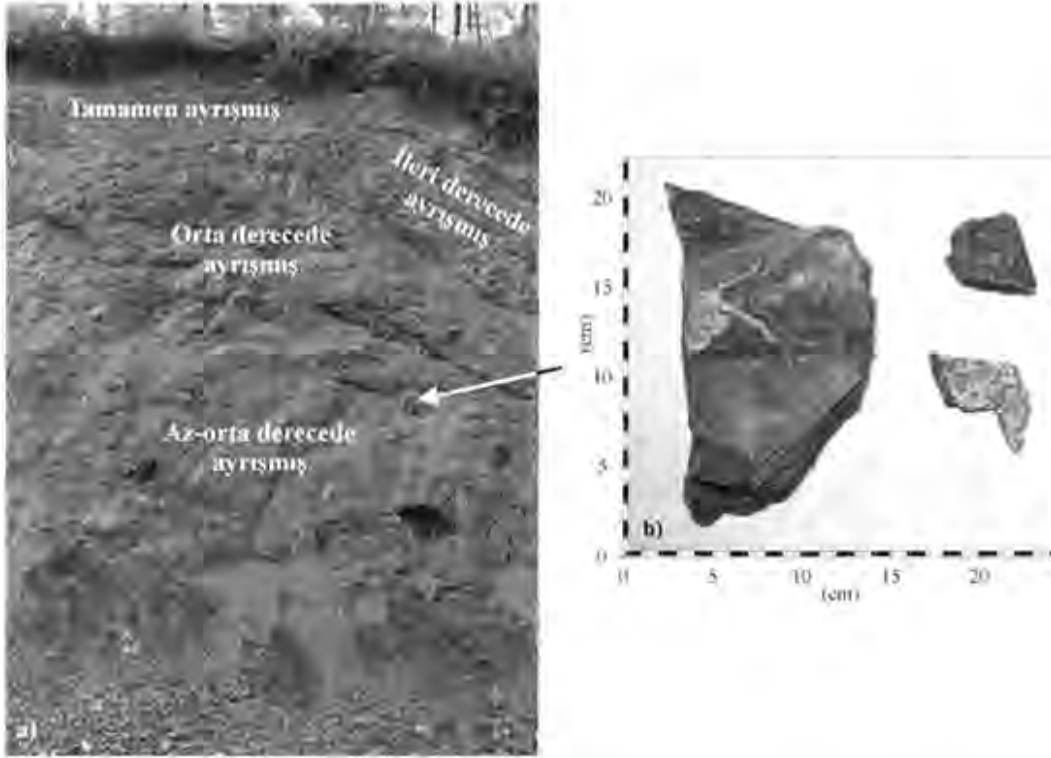


Şekil 3. İncelenen dunitlerin polarizan mikroskop görüntüleri: (a) taze dunit – tek nikol, (b) taze dunit – çift nikol, (c) az ayrıışmış dunit – tek nikol, (d) az ayrıışmış dunit – çift nikol, (e) orta derecede ayrıışmış dunit – tek nikol, (f) orta derecede ayrıışmış dunit – çift nikol, (g) ileri derecede ayrıışmış dunit – tek nikol, (h) ileri derecede ayrıışmış dunit – çift nikol. (Ol: olivin, Sp: serpantin, FeO: demir oksitleşmeler, Opx: ortopiroksen).

Figure 3. Photomicrographs of dunite: (a) unweathered dunite - parallel nicols, (b) unweathered dunite - crossed nicols, (c) slightly weathered dunite - parallel nicols, (d) slightly weathered dunite - crossed nicols, (e) moderately weathered dunite - parallel nicols, (f) moderately weathered dunite - crossed nicols, (g) highly weathered dunite - parallel nicols, (h) highly weathered dunite - crossed nicols. (Ol: olivine, Sp: serpentine, FeO: iron oxide, Opx: orthopyroxene).

3.2. Diyoritlerin Litolojik ve Petrografik Özellikleri

Çalışma alanındaki diyoritlerin taze kesimleri beyazımsı gri renklerde olup, süreksizlikler boyunca gözlenen yüzeyleri genellikle kahverengi ve kırmızı-kahverengi tonlardadır. Yer yer mavimsi mor renklerde gözlenmektedir (Şekil 4a). Ayrışma derecesi arttıkça yüzeyler sarımsı, turuncu ve çeşitli tonlarda kahverengini almaktadır (Şekil 4b). Diyoritlerin süreksizlik aralığı, taze-az ayrılmış seviyelerde ortalama 101.6 cm, ileri derecede ayrılmış seviyelerde ise ortalama 14.2 cm olarak belirlenmiştir (Ündül, 2007).



Şekil 4. Diyoritlerin (a) az-orta ayrılmış seviyelerinin arazideki görünümü, (b) orta ayrılmış seviyesinde gelişen demir oksitleşmenin el örneğindeki görünümü.

Figure 4. Views of (a) slightly-moderately weathered diorites, (b) iron oxide formation on moderately weathered diorite.

Polarizan mikroskop altında incelenen diyoritler, taze plajiyoklaslar (An_{22-40}), amfiboller (genel olarak tremolit/aktinolit, daha az olarak da hornblend türünde), çok az miktarda da piroksen (diyopsit) ve kuvars içermekte olup, ince kesitlerin bazılarında diyorit/gabro bileşimi tespit edilmiştir. Diyoritler genel olarak tüm kristalli dokuya sahip olup, yer yer subofitik doku da göstermektedirler. Plajiyoklas kristalleri mikroskopta genellikle polisentetik ikizlenmeler, daha az olarak da zonlu doku göstermektedirler. Ayrıca birbirini kesen iki yönde çatlaklar gözlenmiş olup, dilinimlerin kılcal çatlaklara dönüşümü söz konusudur.

Amfibol minerallerinin tremolit/aktinolit'e dönüşümleri ile epidotlaşma, kloritleşme, albitleşme ve serisitleşmeler hidrotermal alterasyon ve ayrışmanın ilerlemesi ile gözlenmektedir.

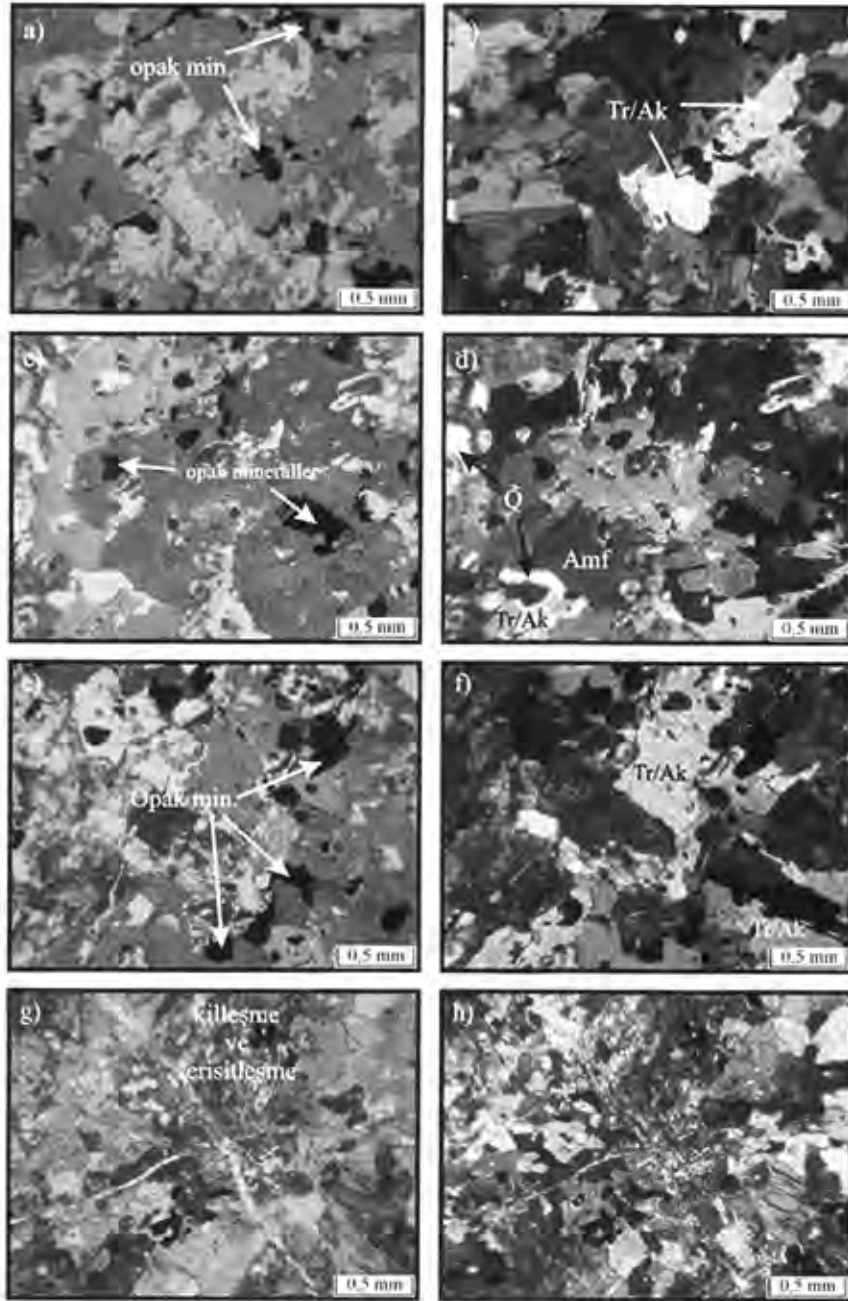
Plajiyoklaslarda ise; killeşme, serisitleşme, silisleşme ve kloritleşmenin birlikte gözlemlendiği sosuritleşme türü ayrışma ürünleri gelişmiştir. Yer yer de demir oksit oluşumları tanımlanmıştır. Opak minerallerden kromite sıkça rastlanmaktadır. Farklı ayrışma seviyelerindeki diyoritlerden elde edilen veriler Çizelge 3’de, mikroskop görüntüleri ise Şekil 5’te sunulmuştur.

Çizelge 3. Farklı derecelerde ayrılmış diyoritlere ait petrografik özellikler.

Table 3. Petrographical properties of diorites with different weathering grades.

	W I	W II	W III	W IV
Petrografik tanımlama	Diyorit	Az ayrılmış Diyorit	Ayrılmış Diyorit	Uralitleşmiş gabro
Bileşim	Plajiyoklas (An ₃₀₋₃₂) Çok az kuvars.	Plajiyoklas, amfibol, piroksen.	Plajiyoklas _{(34-40)*} kuvars ve amfibol.	Piroksen, taze plajiyoklas (An ₂₂₋₄₀) ve kalıntı olarak ayrılmış plajiyoklas ve hornblend.
Doku	Tüm kristalli taneseli doku, kısmen sub-ofitik dokulu.	Tüm kristalli taneseli doku.	Tüm kristalli taneseli doku, ayrıca sub-ofitik doku.	Tüm kristalli taneseli doku ve yer yer sub-ofitik doku
Ayrışma türleri	Tremolit / Aktinolitleşme ve epidotlaşma mevcut.	Tremolit / Aktinolitleşme, serisitleşme, killeşme. Piroksenler amfibol’e dönüşmüş. Plajiyoklaslarda killeşme, silisleşme ve kloritleşme.	Plajiyoklaslarda sosuritleşme (epidotlaşma, kloritleşme, albitleşme). Piroksenlerden itibaren tremolit ve aktinolit oluşumu.	Tremolit / Aktinolitleşme, plajiyoklaslar çok ayrılmış. Sosuritleşme (albitleşme, killeşme, epidotlaşma).
Opak mineraller	Kromit	Başta kromit olmak üzere, opak demiroksit mineralleri mevcut.	Opak mineral mevcut, bol miktarda demir-oksit oluşumları.	Tali mineral düzeyinde çok az opak mineraller
Mikroçatlak durumu	Çatlak yok denecek kadar az.	Kılcal çatlaklar ve birbirini kesen çatlaklar mevcut. Dilinimler kılcal çatlaklara dönüşmekte.	Tek yönde birbirine paralel çatlaklar demir oksit ile dolmuş.	Tek yönde birbirine paralel çatlaklar
Ortalama	4.43	4.34	3.96	2.43
I _p En küçük	2.86	3.00	3.20	1.86
En büyük	6.00	5.67	4.72	3.00

I_p: Mikropetrografik indeks; W: Ayrışma derecesi



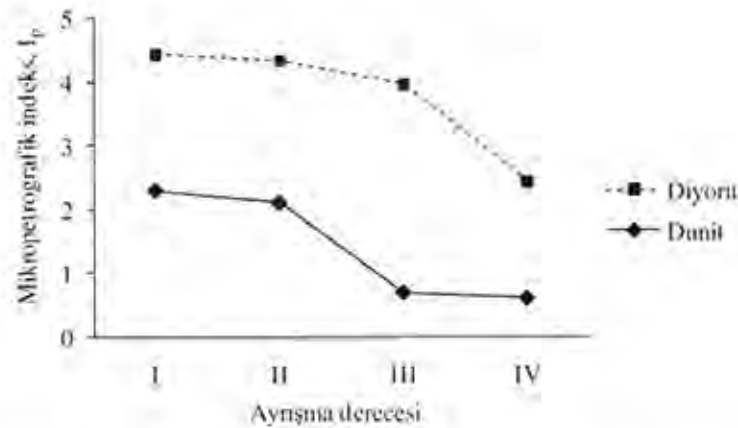
Şekil 5. İncelenen diyoritlerin polarizan mikroskop görüntüleri: (a) taze diyorit – tek nikol, (b) taze diyorit– çift nikol, (c) az ayrıışmış diyorit– tek nikol, (d) az ayrıışmış diyorit– çift nikol, (e) orta derecede ayrıışmış diyorit– tek nikol, (f) orta derecede ayrıışmış diyorit– çift nikol, (g) ileri derecede ayrıışmış diyorit– tek nikol, (h) ileri derecede ayrıışmış diyorit– çift nikol. (Tr/Ak: tremolit/aktinolit, Q: kuvars, Amf: amfibol).

Figure 5. Photomicrographs of diorite (a) unweathered diorite - parallel nicols, (b) unweathered diorite - crossed nicols, (c) slightly weathered diorite - parallel nicols, (d) slightly weathered diorite - crossed nicols, (e) moderately weathered diorite - parallel nicols, (f) moderately weathered diorite - crossed nicols, (g) highly weathered diorite - parallel nicols, (h) highly weathered diorite - crossed nicols. (Tr/Ak: tremolite/aktinolit, Q: quartz, Amf: amphibole).

3.3. Ayrışma Sonucu Petrografik Özelliklerde Meydana Gelen Değişimler

Petrografik incelemeler sırasında, minerallerin ayrışma durumları gözetilerek ayrışma derecesi sayısal olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Bu değerlendirmelerde; Mendes vd. (1966) ile İrfan ve Dearman (1978)'in granitlerin ayrışmasını tanımlama için önerdikleri mikropetrografik indeks (I_p) kavramı kullanılmıştır. Mikropetrografik indeks (I_p) hesaplanırken ayrışmamış minerallerin ayrışmış minerallere oranından yararlanılmışlardır. Elde edilen değerlerin mekanik özelliklerle karşılaştırılabilecek güvenilir değerler verdiği ifade edilmiştir (Mendes vd., 1966; İrfan ve Dearman, 1978). Bu bağlamda, incelenen kayaçlar için mikropetrografik indeks değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 2, 3 ve Şekil 6).

$$\text{Mikropetrografik indeks } (I_p) = \frac{\text{Ayrışmamış mineral yüzdesi}}{\text{Ayrışmış mineral yüzdesi}} \quad (1)$$



Şekil 6. İncelenen kayaçların mikropetrografik indeks değerlerinin ayrışma derecelerine bağlı değişimleri.

Figure 6. The variation of the micropetrographical index (I_p) with weathering grades of the rocks investigated.

Dunitlerin mikropetrografik indeks değerleri I. ve II. seviyelerde birbirlerine yakın olmakla birlikte II. seviyeden sonra ani bir azalma gözlenmektedir. Diyoritlere ait mikropetrografik indeks değerlerinde ise, keskin azalmalar III. seviyeden sonra gözlenmektedir (Çizelge 2, 3 ve Şekil 6). Dunitlerde az ayrışmış seviyeden sonra mikro ve makro çatlaklar artmakta olup, bu çatlaklar boyunca serpantinleşme ve diğer ayrışma ürünlerinin gelişimi hızlanmaktadır. Bu durum, III. seviyede daha düşük bir mikropetrografik indeks değerinin elde edilmesine neden olmaktadır. Diyoritlerde ise, mikropetrografik indeks değerlerindeki ani azalmaların III. seviyeden sonra gerçekleşmiş olması, ayrışma özellikleri birbirine benzer olan minerallerin birlikte bulunması ve bu minerallerin dunitleri oluşturan olivinlerden ayrışmaya karşı göreceli olarak daha dayanımlı olmalarından kaynaklanmaktadır.

Dunit ve diyoritlerin mikropetrografik indeks (I_p) değerleri; granit (İrfan ve Dearman 1978; Gourley, 1986), dolerit (Gourley, 1986) ve bazı magmatik kayaçlardan (Bell vd., 2001) dü-

şüktür. Bunun nedeni; dunitlerin %90'dan fazla miktarda ayrışmaya en yatkın minerallerden biri olan olivinleri içermesinden kaynaklanmaktadır. Diyoritlerde de piroksen, amfibol ve plajiyoklas minerallerinin yanında çok az oranda kuvars bulunması dunitlere göre yüksek I_p değerleri almasına neden olmaktadır.

Zayıflık zonları ve süreksizliklerin varlığı ayrışmanın gelişimini denetleyen önemli özelliklerdendir. Süreksizlikler boyunca ilerleyen ayrışma, ilk olarak minerallerin içinde ve aralarındaki boşluklarda kimyasal süreçlerle belirginleşmektedir. Ayrışmanın artmasıyla, mikroçatlaklarda artış meydana gelmektedir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar, mikroçatlakların sayısal olarak tanımlanabilmesi için görgül eşitlikler geliştirmişlerdir. Bunlar; İrfan ve Dearman (1978)'in ayrışmış granitler için önerdikleri Mikroçatlak İndeksi (I_p) ve Tuğrul (1995) tarafından ayrışmış bazaltlara uygulanan Mikroçatlak Yoğunluğu (r_{mc})'dur. Mikroçatlak indeksi, bir hat boyunca süreksizlik sayılarını göz önüne almaktadır. Bu durumda, alansal dağılımdaki değişimler gözden kaçabilmektedir. Mikroçatlak yoğunluğu ise; belirli alandaki çatlakların toplam boyu olup, ince kesit üzerinde uzunlukların belirlenmesinde güçlükler yaşanabilmektedir. Bu nedenle, 1 mm^2 'deki toplam çatlak sayısını göz önünde bulunduran mikroçatlak yayılımı (S_{mf}), Ündül (2007) tarafından önerilmiştir. Her üç yöntemle göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Farklı ayrışma derecelerine sahip kayaçların mikroçatlak değerlerinin değişimleri.

Table 4. Variations of microfracture values of the rocks with different weathering grades.

Kayaç adı	Ayrışma derecesi	I_p (kırık sayısı/ cm)	r_{mc} (mm/mm ²)	S_{mf} (kırık sayısı/mm ²)
Dunit	IV	49.00	4.00	17.00
	III	50.00	4.20	27.00
	II	92.30	9.30	102.22
	I	83.32	4.28	75.87
Diyorit	IV	29.33	2.05	20.24
	III	15.39	1.54	11.69
	II	14.23	1.35	11.18
	I	7.00	0.80	7.41

I_p : Mikroçatlak indeksi, r_{mc} : Mikroçatlak yoğunluğu, S_{mf} : Mikroçatlak yayılımı

Mikroçatlak indeksi (I_p): 1 cm uzunluğundaki hat boyunca kesilen mikroçatlakların sayısı:

$$I_p = N / L$$

(2)

N : Çatlak sayısı

L : Ölçüm yapılan mesafe (cm)

Mikroçatlak yoğunluğu (r_{mc}): 1 mm^2 'deki çatlakların toplam boyları:

$$r_{mc} = L / A$$

(3)

L : Çatlakların toplam boyu

A : Birim alan (mm^2)

Mikroçatlak yayılımı (S_{mf}); 1 mm²'deki toplam çatlak sayısı:

$$S_{mf} = N / A$$

(4)

N : Birim alandaki çatlak sayısı

A : Birim alan (mm²)

Ayrışmayla birlikte mikroçatlakların arttığı farklı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. (İrfan ve Dearman, 1978; Tuğrul, 1995; Gupta ve Rao, 2000; Sousa vd., 2005; Arıkan vd., 2007). Dunitlerde mikroçatlaklılığa göre gerçekleştirilen incelemelerde; Mikroçatlak indeksi, mikroçatlak yoğunluğu ve mikroçatlak yayılımı değerlerinin ayrışmamış seviyeden az ayrışmış seviyeye geçişlerde arttığı gözlenmektedir. Ancak az ayrışmış seviyeden sonra mikroçatlaklarda azalma saptanmıştır. Bu durum, pek çok araştırmacı tarafından ifade edilen ayrışma ile mikroçatlakların artması şeklindeki belirleme ile uyumlu değildir. Yapılan incelemelerde az ayrışmış seviyeden sonra çatlak ve mikroçatlakların arttığı, bunun yanı sıra, yoğun bir sepantinleşmeye bağlı olarak mikroçatlakların serpantin mineralleri ile dolduğu ve örtüldüğü gözlenmiştir. Böylece mikroçatlakların azaldığı izlenimi oluşmaktadır. Diyoritlerde ise, beklendiği gibi, çatlak ve mikroçatlaklar artmaktadır (Çizelge 4). Ancak dunitlerde olduğu gibi mikroçatlaklar ayrışma ürünü minerallerle örtülmemekte ve dolayısıyla mikroskop altında tanımlamaları yapılabilmektedir. Ayrıca mikroçatlak artışına bağlı olarak, tane boyutunda hızlı bir azalma gözlenmektedir.

4. AYRIŞMA İLE DUNIT VE DİYORİTLERİN FİZİKO-MEKANİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMLER

İncelenen kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin ayrışma ile değişimi; kayaç kimyası, kayaçları oluşturan mineraller ile kayaçların mikro ve makro ölçekteki yapısal unsurlarındaki farklılaşmalara bağlıdır. Bu nedenle, fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimler ve değişim oranları ayrışma derecelerinin ortaya konmasındaki önemli ölçütlerdir. Bu değişimlerin ortaya konması için laboratuvar da deneyler yapılmıştır.

Çalışma sahasında, yapılan örneklemeler ile örneklerin deneysel çalışmalara uygun hale getirilmesi ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Taze ve az ayrışmış seviyelerden en az (40x40x40) cm boyutlarında blok örnekler alınmıştır. Orta derecede ayrışma seviyesinden sonra taze ve az ayrışmış seviyelerdeki gibi blok örnek alınamamış olup, mümkün olan en büyük boyutta örnekler alınmıştır. Arazinin fazla eğimli olması nedeniyle kalıntı toprak zonu yamaç aşağı döküldüğünden, bu ayrışma seviyesi kesin ayırtılabilecek şekilde gözlenememiştir. Bu nedenle, kalıntı toprak zonuna ait örneklem yapılmamıştır.

İncelenen kayaçlara ait tanımlanan her ayrışma derecesi için özgül ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, su emme, etkin gözeneklilik değerleri tayin edilmiştir. Ultrasonik dalga hızları, tek eksenli sıkışma dayanımları ve suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi değerleri ise ISRM (2007) tarafından önerilmiş yöntemlere uygun örnek alınabilen seviyeler için belirlenebilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. İncelenen kayaçların fiziko-mekanik özellikleri.
Table 5. Physico-mechanical properties of the investigated rocks.

		DİYORİT				DUNİT			
		Ort.	En düşük	En Yüksek	SS	Ort.	En düşük	En Yüksek	SS
G_s	V	2.83	2.73	2.89	0.05	2.34	2.29	2.39	0.04
	IV	2.96	2.94	2.97	0.01	2.58	2.50	2.63	0.04
	III	2.98	2.96	3.01	0.02	2.73	2.66	2.86	0.05
	II	3.04	2.98	3.07	0.03	2.91	2.86	2.96	0.03
	I	3.08	3.03	3.12	0.03	3.14	3.09	3.20	0.03
γ_k (kN/m ³)	V	26.28	25.41	27.43	0.64	19.48	19.24	19.81	0.19
	IV	27.60	26.98	28.98	0.55	21.31	19.71	22.75	0.66
	III	28.58	27.35	29.16	0.47	25.96	24.61	26.84	0.56
	II	29.26	28.25	29.63	0.44	28.13	25.79	28.79	0.76
	I	29.87	29.62	30.12	0.20	30.63	30.02	31.28	0.41
γ_d (kN/m ³)	V	26.81	26.09	27.73	0.50	21.86	21.67	22.09	0.15
	IV	27.93	27.32	29.18	0.52	22.69	20.59	23.83	0.64
	III	28.81	27.76	29.61	0.46	26.28	23.54	27.34	0.64
	II	29.32	28.55	29.63	0.34	27.97	25.83	28.90	1.04
	I	29.90	29.72	30.15	0.17	30.64	29.72	31.37	0.43
w_s (%)	V	1.83	0.71	2.52	0.70	8.92	7.76	10.34	0.87
	IV	1.16	0.48	1.79	0.44	6.55	3.33	9.38	1.18
	III	0.83	0.54	1.52	0.30	1.26	0.54	2.39	0.48
	II	0.20	0.07	0.70	0.23	0.50	0.17	1.59	0.54
	I	0.17	0.07	0.66	0.20	0.13	0.07	0.28	0.06
n_e	V	4.52	1.92	6.70	1.86	18.39	16.02	20.86	1.74
	IV	3.27	1.37	5.07	1.22	13.89	7.24	19.79	2.61
	III	2.45	1.56	4.50	0.92	3.38	1.46	6.27	1.29
	II	0.62	0.21	2.02	0.68	1.47	0.48	4.11	1.48
	I	0.58	0.21	1.99	0.66	0.42	0.21	0.87	0.19
V_p (km/s)	V	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	IV	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	III	4.37	3.76	4.87	0.49	4.92	4.26	5.20	0.30
	II	6.04	4.48	6.62	0.82	5.50	4.91	6.54	0.45
	I	6.45	6.28	6.62	0.15	6.36	6.00	6.76	0.21
σ_c (MPa)	V	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	IV	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	III	NA	NA	NA	NA	105.54	91.70	122.90	11.81
	II	201.16	188.70	231.96	11.06	124.45	114.30	141.60	10.22
	I	235.69	199.03	243.32	10.41	242.05	236.00	249.97	5.67
I_{dt} (%)	V	35.27	33.39	37.87	2.32	NA	NA	NA	NA
	IV	86.25	84.61	87.11	1.42	75.64	73.77	78.03	2.18
	III	96.62	95.69	97.90	1.15	96.38	94.46	98.79	2.21
	II	98.34	98.04	98.79	0.40	97.48	96.77	97.90	0.62
	I	98.93	98.74	99.14	0.20	98.26	97.65	98.84	0.52

G_s : özgül ağırlık, γ_k : kuru birim hacim ağırlık, γ_d : doymuş birim hacim ağırlık, w_s : su emme, n_e : etkin gözeneklilik.

V_p : ultrasonik dalga hızı, σ_c : tek eksenli sıkışma dayanımı, I_{dt} : 7. çevrime ait suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi,

NA: Uygulanamaz

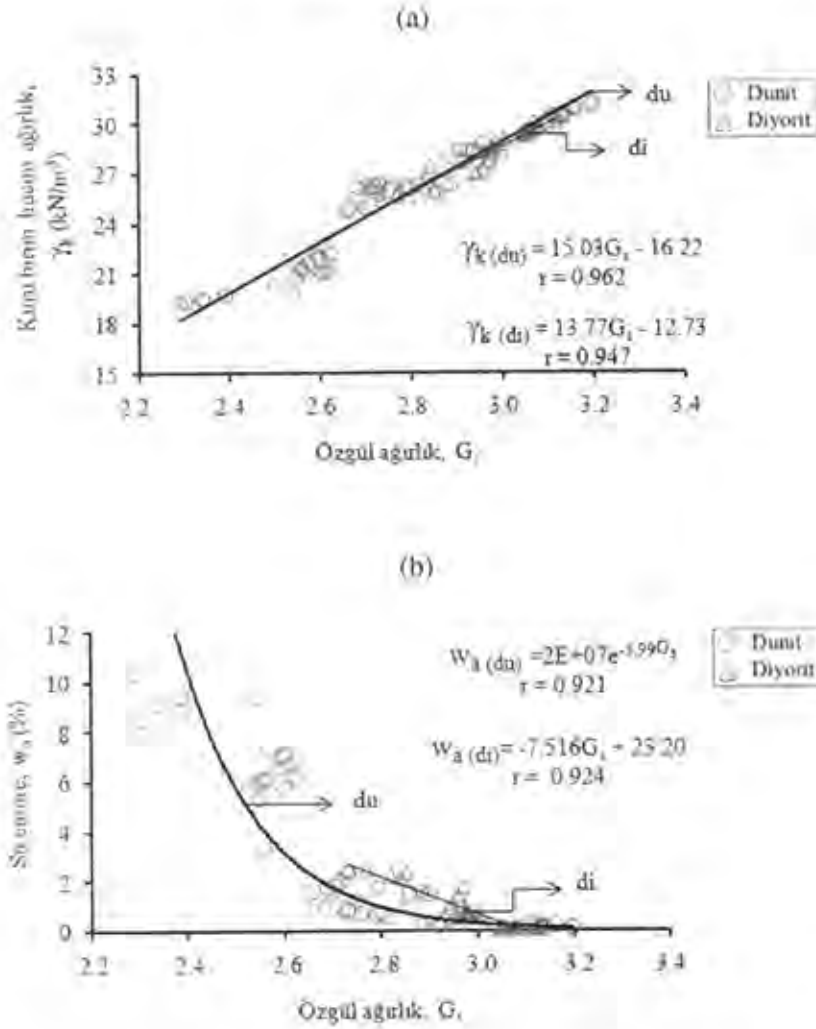
Ayrışmanın artmasıyla dunitlerde serpantin mineralleri ve kil mineralleri gelişmektedir. Böylece özgül ağırlık değerlerinde azalmalar olmaktadır. Bu nedenle, dunitlerin özgül ağırlıkları ayrışma derecelerinin belirlenmesinde güvenilir sonuçlar vermektedir. Diyoritlerde de ayrışma ile mikroçatlakların genişlemesi ve kil minerallerinin gelişimi, özgül ağırlığın ayrışma derecelerinin belirlenmesinde kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Her iki kaya grubu da taze ve az ayrışmış seviyelerde oldukça yüksek özgül ağırlık değerlerine sahiptir. Dunitlerin özgül ağırlıkları, kuru birim hacim ağırlıkları ve su emme değerleri diyoritlere göre daha geniş değer aralıkları sunmaktadır. Bu durum, yoğun serpantinleşmeden ve diyoritlere oranla daha fazla kil oluşumundan kaynaklanmaktadır. Diyoritler için elde edilen özgül ağırlık değerleri, Kazi ve Al-Mansour (1980), Fookes ve Poolet (1981), Telford vd. (1990) ve Carmichael (1990) tarafından belirlenen değerlerle benzerlikler göstermekte olup, ayrışma derecesi arttıkça özgül ağırlık değerleri azalmaktadır.

İncelenen kayalar üzerinde yapılan ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli sıkışma deneylerinin sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur. Bu çizelgede görüldüğü gibi, kayaların ayrışma dereceleri arttıkça ultrasonik dalga hızları ile tek eksenli sıkışma dayanımları azalmaktadır. Çatlakların artmasından dolayı diyoritlerde az ayrışmış seviyeden sonra ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri için ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere uygun örnek hazırlanamaması, bu özelliklere ait verilerin daha dar aralıkta kalmasına neden olmuştur (Çizelge 5, Şekil 7 ve 8). Fookes ve Poolet (1981), Carmichael (1990) ve AFTES (2003) tarafından diyoritler için tayin edilen ultrasonik dalga hızı değerleri ile bu çalışmada elde edilen değerler benzerlikler göstermekte olup, ayrışma derecesinin artmasıyla azalmalar görülmektedir. Fookes ve Poolet (1981) ile Jefferson (1993) tarafından diyoritler için belirlenmiş olan tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinde de ayrılmaya bağlı olarak azalmalar görülmektedir.

Suda dağılmaya karşı duraylılık deneyleri; ISRM (2007) tarafından önerilmiş deney düzeneği içerisinde iki çevrim olarak yapılmış, ancak ayrışma derecesinin artmasına bağlı olarak suda dağılmaya karşı duraylılık (I_d) değerlerinde ayırt edici azalmalar elde edilememiştir. Ayrıca Gökçeoğlu vd. (2000)'nin önermiş olduğu dört çevrim denenmiş ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle, deneye yedi çevrime kadar devam edilmiştir. Elde edilen sonuçlar (Çizelge 5) incelendiğinde, her iki kaya grubu için de orta derecede ayrışmış seviyeden sonra I_d değerlerinde belirgin azalmalar saptanmıştır. Tamamen ayrışmış dunitlerde ise, önerilen yöntemlere uygun örnek hazırlanamamıştır.

Farklı derecelerde ayrışmış kayalara ait fiziko-mekanik özellikler basit regresyon analizleri ile karşılaştırılmış ve korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Davis (1986) tarafından 0 ile 1 arasında değişen korelasyon katsayıları ne kadar yüksekse değişkenler arasındaki ilişkinin o derece temsil edici olduğu belirtilmiştir. Bu değerlendirme, pek çok çalışmada göz önünde bulundurulmuştur (Tuğrul ve Zarif, 1999; Tuğrul, 2004; Kolay ve Kayabalı, 2006; Diamantis vd., 2009).

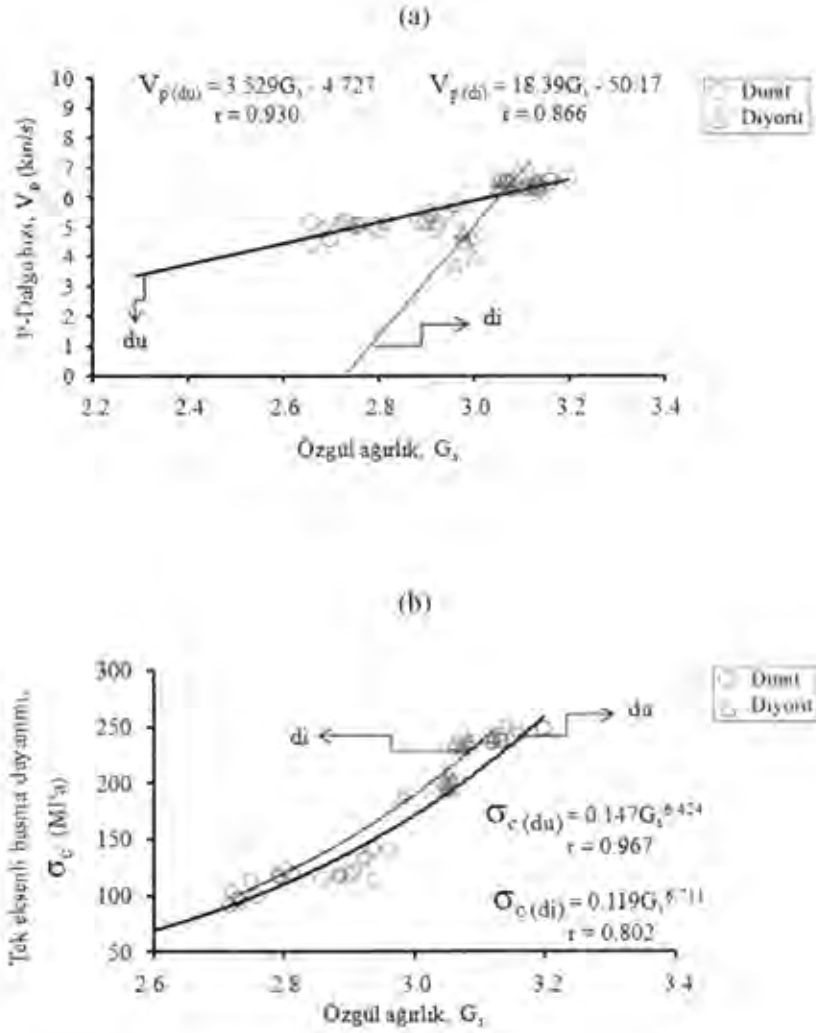
İncelenen kayaların ayrışma derecelerini ifade eden özgül ağırlık değerleri ile fiziko-mekanik özelliklerin korelasyon katsayıları Şekil 7 ve 8'de verilmiştir. Özgül ağırlık ile karşılaştırılan kuru birim hacim ağırlık, su emme, ultrasonik dalga hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımları arasındaki korelasyon katsayıları 0.8'den büyüktür.



Şekil 7. Özgül ağırlık ile (a) kuru birim hacim ağırlık ve (b) su emme arasındaki ilişki (du: dunit, di: diyorit).

Figure 7. The relationships between specific gravity and (a) dry unit weight and (b) water absorption (du: dunit, di: diorite).

Çalışma alanında incelenen dunitlerden ayrışmanın ilerlemesi nedeniyle tek eksenli sıkışma dayanımının tayini için karot örneklerinin hazırlanmasında güçlükler ile karşılaşmaktadır. Diamantis vd. (2009)'nin serpantinitletler üzerinde yaptıkları çalışmada, tek eksenli sıkışma deneyi için karot hazırlanmasındaki güçlükler nedeniyle pratik deneylerin (ultrasonik dalga hızı, nokta yükü dayanım indeksi vb.) tercih edilebileceğini ifade edilmiştir. Kılıç (1995a)'ın ofiyolitik kayaçlar, Kılıç (1995b)'ın diyabazlar, Kılıç vd. (1998)'nin serpantinitletler ve Kılıç (1999)'ın mafik kayaçlar üzerinde yaptığı çalışmalarda ayrışma derecesi arttıkça kayaçların fiziko-mekanik özelliklerinde azalmalar olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar ayrıca tek eksenli sıkışma dayanımı ve ultrasonik dalga hızlarını kullanarak Birleştirilmiş Ayrışma İndeksi (UAI)'ni belirlemişler ve ayrışma artışına bağlı olarak kayaçlarda bu indeksin arttığını saptamışlardır. Bu çalışmada incelenen kayaçlardan orta derecede ayrışma seviyesinden itibaren karşılaşılan örnek alma güçlüğünden dolayı bu indeks hesaplanamamıştır. Arıkan vd. (2007)'nde, asidik volkanik kayaçlar üzerinde yaptıkları inceleme sonucunda belirledikleri jeomekanik özelliklere ait değerlerin ayrışmanın artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir,



Şekil 8. Özgül ağırlık ile (a) ultrasonik dalgı hızı ve (b) tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (du: dunit, di: diyorit).

Figure 8. The relationships between specific gravity and (a) ultrasonic wave velocity and (b) uniaxial compressive strength (du: dunit, di: diorite).

SONUÇLAR

Arazi gözlemleri ve petrografik incelemelerden elde edilen verilere göre, incelenen dunit ve diyoritler fiziksel ve ağırlıklı olarak kimyasal ayrışma ile hidrotermal alterasyona uğramıştır. Bu nedenle, ayrışma sonucu dunitlerde ağırlıklı olarak serpantinleşme, diyoritlerde ise tremolit/aktinolitleşme ve sosuritleşme (albitleşme, killeşme, epidotlaşma) gelişmiştir.

İncelenen kayalar oluşum koşulları ve sonrasındaki tektonik etkilere bağlı olarak pek çok sayıda düzenli ve düzensiz çatlaklara sahiptirler. Bu yapı, özellikle dunitlerde ayrışma özelliklerinin değişkenlikler sunmasına neden olmuştur.

Mikropetrografik indeks değerleri; ayrışma derecelerinin belirlenmesinde dunitlerde az ayrışmış seviyeden sonra, diyoritlerde ise her seviyede kullanılabilir sonuçlar vermektedir. Düzenli ve düzensiz mikroçatlaklar petrografik incelemelerde sayısal olarak belirlenmiştir. Dunitlerde mikroçatlaklara göre yapılacak ayrışma değerlendirmelerinin hatalara yol açabileceği ortaya konmuştur. Diyoritlerde ise, mikroçatlak indeksi, mikroçatlak yoğunluğu ve mikroçatlak yayılımı yöntemleri ayrışma derecelerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Dunitlerin mekanik özellikleri az ayrışmış seviyeden sonra, fiziksel özellikleri ise az ayrışmış seviye ile birlikte değişimler göstermektedir. Diyoritlerin mekanik özellikleri az ayrışmış seviyeden, fiziksel özellikler ise orta derecede ayrışmadan sonra dikkat çekici değişimler sergilemektedir. Dunit bileşimli kayalar, malzeme ölçeğinde dayanımlı özellikler gösterebilir de, süreksizlikler boyunca gelişen ayrışma etkileri kaya kütlelerinin davranışını belirlemektedir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na (Proje numarası T-394/08032004) desteklenmiştir. Yazarlar, petrografik incelemelerdeki katkılarından dolayı İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümünden Doç. Dr. Sabah Yılmaz Şahin'e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- AFTES, 2003. Guidelines for Characterisation of Rock Masses Useful for the Design and the Construction of Underground Structures. AFTES-Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain.
- ANON, 1972. The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. Quaterly Journal of Engineering Geology, 45, 293-382.
- ANON, 1977. The description of rock masses for engineering purposes. Quaterly Journal of Engineering Geology, 10, 355-388.
- ANON, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Quaterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242.
- Arel, E., and Tuğrul, A., 2001. Weathering and its relation to geomechanical properties of Çavuşbaşı granitic rocks in northwestern Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 60 (2), 123– 133.
- Arıkan, F., Ulusay, R., and Aydın, N., 2007. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 415–430.

- Avigad, D., Sandler, A., Kolodner, K., Stern, R.J., McWilliams, M., Miller, N., and Beyth, M., 2005. Mass-production of Cambro-Ordovician quartz-rich sandstone as a consequence of chemical weathering of Pan-African terranes: Environmental implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 240, 818–826.
- Bell, F.G., Cripps, J.C., and Culshaw, M.G., 2001. A review of the engineering behaviour of soils and rocks with respect to groundwater. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications*, 17, pp. 299-306.
- Bingöl, E., 1974. Muratdağı merkezi kesiminin jeolojisi, magmatik ve metamorfik kayaların petrolojisi ve jeokronolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (yayımlanmamış).
- Brideau, M.A., Stead, D., Roots, C., and Orwin, J., 2007. Geomorphology and engineering geology of a landslide in ultramafic rocks, Dawson City. *Engineering Geology*, 89, 171–194.
- Carmichael, R.S., 1990. *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*. CRC Press, Boston.
- Ceryan, S., 2008. New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: A case study from the Kürtün Granodiorite, NE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 187-207.
- Chigira, M., and Oyama, T., 1999. Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 55, 3–14.
- Currey, D.T., 1977. Deeply weathered rock at Victorian Dam site. *Engineering Geology*, 11, 341-363.
- Das, A., Krishnaswami, S., Sarin, M.M., and Pande, K., 2005. Chemical weathering in the Krishna Basin and Western Ghats of the Deccan Traps, India: Rates of basalt weathering and their controls. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (8), 2067–2084.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley and Sons, New York.
- Diamantis, K., Gartzos, E., and Migiros, G., 2009. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology*, 108, 199–207.
- Deere, D.U., and Patton, F.D., 1971. Slope stability in the residual soils. *Proceedings of the 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Juan, Puerto Rico, Vol. 1, pp. 87-170.

- Emre, H., 1986, Orhaneli ofiyolitinin jeolojisi ve petrolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul (yayımlanmamış).
- Fookes P. G., and Poolet, A. B., 1981. Some preliminary considerations on the selection and durability of rock and concrete materials for breakwaters and coastal protection works. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 14, 97-128.
- Gourley, C. S., 1986. Rock weathering in engineering time. MSc Thesis, Queen Mary College, University of London (unpublished).
- Gökçeoğlu, C., Ulusay, R., and Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*, 57, 215-237.
- Gupta, A.S., and Rao, S.K., 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, 56, 257-274.
- 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 Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- İrfan, T.Y., and Dearmann, W.R., 1978. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 11, 233-244.
- Jefferson, D. P., 1993. Building stone: the geological dimension. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 26, 305-319.
- Kazi, A., and Al-Mansour, Z.R., 1980. Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 13, 45-52.
- Kılıç, R., 1995a. Geomechanical properties of the ophiolites (Çankırı/Turkey) and alteration degree of diabase. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 51, 63-69.
- Kılıç, R., 1995b. The degree of alteration and geomechanical properties of diabase in the Ankara ophiolitic melange, Turkey. *Environmental and Engineering Geosciences*, 1, 341-351.
- Kılıç, R., 1999. A unified alteration index (UAI) for mafic rocks. *Environmental and Engineering Geosciences*, 4, 475-483.

- Kılıç, R. ve Bilgehan, R., P., 1999. Volkanit arazilerde yer seçimine yeni bir yaklaşım. Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni, 17, 111-119.
- Kılıç, R., Koçbay A., and Sel T., 1998. The geomechanical properties and alteration degree of serpentinite in the Ankara Ophiolitic Melange, Turkey. Proceedings of the 8th International IAEG Congress, Vancouver, pp. 243-251.
- Kolay, E., and Kayabalı, K., 2006. Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach. Engineering Geology, 86, 271-284.
- Komoo, I., and Yaakub, J., 1990. Engineering properties of weathered metamorphic rocks in Peninsular Malaysia. Proceedings of the 6th International IAEG Congress, Rotterdam, pp. 665-672.
- Little, A.L., 1969. The engineering classification of residual tropical soils. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 1-10.
- Manav, H, Gültekin, H.A., and Uz, B., 2004. Geochemical evidence for the tectonic setting of the Harmancık ophiolites, NW Turkey. Journal of Asian Earth Sciences, 24, 1-9.
- Mendes, F.M., Aires-Barros, L., and Rodrigues, F.P., 1966. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. Proceedings of the 1st International Congress of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 1, pp. 217-223.
- Okay, A.I., Harris, N.B.W., and Kelley, S.P., 1998. Exhumation of blueschists along a Tethyan suture in northwest Turkey. Tectonophysics, 285, 275-299.
- Ollier, C.D., 1984. Weathering. 2nd edition, Longman, New York.
- Orhan, M., Işık, N.S., Topal, T., and Özer, M., 2006. Effect of weathering on the geomechanical properties of andesite, Ankara-Turkey. Environmental Geology, 50 (1), 85-100.
- Özkoçak, O., 1969. Etude géologique du massif ultrabasique d'Orhaneli et de sa proche bordure (Bursa - Turquie). These de Doctorat, Univ. de Paris.
- Price, J.R., and Velbel, M.A., 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. Chemical Geology, 202, 397-416.
- Selby, M.J., 1993. Hillslope Materials and Processes. 2nd edition, Oxford University Press, Oxford.

- Sowers, G.F., 1971. Landslides in weathered volcanics in Puerto Rico. Proceedings of the 4th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, San Juan-Puerto Rico, pp. 105-115.
- Sousa, L.M.O. del Rio, L. M. S., Calleja, L., de Argandona, V. G. R., and Rey, A. R., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77, 153-168.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tuğrul, A., 1995. Niksar yöresindeki bazaltların mühendislik özelliklerine ayrışmanın etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü (yayımlanmamış).
- Tuğrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, 75, 215-227.
- Tuğrul A., and Gürpınar, O., 1997. The effects of chemical weathering on the engineering properties of eocene basalts in northeastern Turkey. *Environmental and Engineering Geoscience*, 3, 225-234.
- Tuğrul, A., and Zarif, İ.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51, 303-317.
- Tuğrul, A., and Zarif, İ.H., 2000. Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (3), 191-206.
- Turkington, V. A., and Paradise, T. R., 2005. Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology*, 67 (1-2), 229-253.
- Ündül, Ö., 2007. Ayrışmanın Çınarcık barajı göl alanındaki (Bursa) ultramafik kayaların mühendislik özelliklerine etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ

AMAÇ, YAYINA KABUL İLKELERİ VE YAZIM KURALLARI

AMAÇ

Mühendislik Jeolojisi Bülteni,

1. Türkiye’de mühendislik jeolojisi konusunda gerek duyulan bilimsel teknik iletişimi saylamak.
2. Türkçe’nin bilimsel ve mesleki yayın dili olarak gelişmesi ve yabancı sözcüklerden arındırılması çabalarına katkıda bulunmak,
3. Mühendislik jeolojisi konusunda uluslararası düzeyde yapılan çalışmaların özellikle uygulamacılar tarafından kolayca izlenebilmesini ve yararlanılabilirliğini sağlamak amacıyla yayımlanmaktadır.

NİTELİK,

Mühendislik Jeolojisi Bülteni’nde yayımlanması istemiyle gönderilecek olan yazılar mühendislik jeolojisinin herhangi bir alanında bir konuyu içermesi koşuluyla, aşağıdaki niteliklerden en az birini taşımaktadır:

1. Bilimsel yöntemlerle yapılmış özgün sonuçları olan bir çalışma,
2. Mühendislik jeolojisi konusunda daha önce yapılmış çalışmaları eleştiren bir yaklaşımla derleyen ve o konuda katkı sağlayan eleştirel derleme veya uygulamaya dönük bir çalışma,
3. Mühendislik jeolojisi konusunda Türkiye’yi büyük ölçüde ilgilendiren ve yabancı bir dilde yayımlanmış bir yazının, yayımlandığı dergiden izin alınması koşuluyla, Türkçe versiyonu.

Yazıların Bülten’de yayımlanabilmesi için daha önce Türkçe yayımlanmamış olması gerekir.

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAYINA KABUL İLKELERİ

Mühendislik Jeolojisi Bülteni Editörlüğü’ne sunulan yazılar, öncelikle içerik, sunum, yayım kuralları vd. yönlerden Editörlük tarafından incelenir ve daha sonra değerlendirmek üzere en az iki Yayın Kurulu üyesine gönderilir. Yayın Kurulu üyelerinden gelecek görüşler doğrultusunda yazının doğru-
dan, az veya önemli ölçüde düzeltilmesi koşuluyla yayımlanmasına veya reddine Editörlükçe karar verilerek sonuç yazarlara bildirilir. Yazarlar, incelemecilerin ve Editörlüğün yaptığı eleştiri, öneri ve düzeltmelere ilişkin yanıtlarını ayrı sayfalarda gerçekleriyle birlikte açıklamalıdır.

YAZIM DİLİ

Mühendislik Jeolojisi Bülteni’nin yazım dili “Türkçe” dir. Bununla birlikte; yazıların başlıkları, öze-
leri, anahtar kelimeler ve tüm çizelgelerin başlıkları ile şekil altı açıklamaları Türkçe ve İngilizce olarak iki dilde birlikte verilmelidir.

YAZIM KURALLARI

İncelenmek üzere Editörlüğe gönderilecek makalelerin hazırlanmasında dikkat edilecek yazım ku-
ralları aşağıda verilmiştir. Yayına kabul edilen makalelerin derginin formatına göre dizilmesi işle-
mi, basımevi tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle, yayına kabul edilen makalelerin metni, çizelge-
leri, şekilleri ve şekiller dizini CD’ye kopyalanmış olarak ayrıca makalenin bir orijinal çıktısıyla birlikte Editörlüğe gönderilmelidir.

Metin Bölümü

1. Metin; A4 boyutunda (29.7x21 cm) kağıtların üzerine bilgisayarda, 1.5 satır aralıklı, 12 punto ve Times New Roman fontuyla yazılmalıdır. Sayfaların alt, üst ve yanlarında 2.5 cm boşluk bırakılmalı ve sayfalar kurşun kalemle numaralandırılmalıdır. Bilgisayar çıktılarının silik olmasına özen gösterilmelidir.
2. Başlık; konuyu en iyi şekilde belirtir ve 10 kelimeyi geçmeyecek şekilde kısa seçilmeli Türkçe başlığın (tamamı büyük harfle ve koyu yazılmış) yanı sıra, İngilizcesi (italik ve normal küçük harflerle) de yazılmalıdır.
3. Öz; yazının başlangıcında en fazla 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde hazırlanmış, Türkçe ve İngilizce öz (Abstract) bulunmalıdır. Bu bölüm, yayının diğer bölümlerinden ayrı olarak yayımlanabilecek düzende yazılmış, yazının tümünü en kısa, ancak öz biçimde yansıtır nitelikte (özellikle çalışmanın amacını ve başlıca sonuçlarını içermeli) olmalıdır. Öz içinde; yararlanılan kaynaklara, şekil, çizelge ve eşitlik numaralarına değinilmemelidir. Ayrıca Öz ve Abstract bölümlerinin altında bir satır boşluk bırakılarak Anahtar Kelimeler ve Key Words (en az 3, en çok 6 kelime) verilmelidir.
4. Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir.
 - a. Başlık (Türkçe ve İngilizce, Türkçesi büyük, İngilizcesi küçük harflerle ve italik)
 - b. Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i (yazar adları koyu karakterle ve soyadları tamamen büyük harfle, adresler italik olarak)
 - c. Öz (anahtar kelimeler eklenerek)
 - d. Abstract (keywords eklenerek)
 - e. Giriş (amaç, kapsam vd.)
 - f. Metin bölümü (yöntemler, çalışılan malzeme, saha tanımlamaları, bulgular vb.)
 - g. Sonuçlar ve tartışmalar (sonuçların tartışılması gerektiği durumlarda tartışmalar sonuçlarla birlikte verilmelidir. Bu durumda 'Sonuçlar' başlığı yerine 'Tartışma ve Sonuçlar' başlığı kullanılmalıdır).
 - h. Katkı belirtme (gerekliyorsa)
 - i. Kaynaklar
5. Yazılarda okuyucuya aktarılması istenen veri, görüşler, tartışmalar (metin kısmı), çizelgeler ve şekiller dahil en fazla 20 sayfayı aşmayacak şekilde düzenlenmelidir.
6. Metin içinde ana bölüm başlıkları dışında en fazla üç alt başlık oluşturulmalı ve başlıklara numara verilmelidir. Bunların yazım şekil yandaki gibi olmalıdır (1.,1.1,.....2.,2.1,..... gibi).
7. SI birimleri (kPa, kN/m³ vb.) kullanılmalıdır.
8. Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde rakamların ondalık bölümlerinin ayrılması için nokta konulmalıdır (3.1 gibi).

Kaynaklar

Kaynaklar, alfabetik sırayla ve türlerine göre aşağıda belirtilen formatlara uygun şekilde verilmelidir.

Makale:

Soyadı, A., Tarih. Makalelerin başlığı. Derginin Açık Adı, Sayı (No.), başlangıç ve bitiş sayfaları.

Bildiri:

Soyadı, A., Tarih. Bildirinin başlığı. Sempozyumun adı, Basıldığı yer, başlangıç ve bitiş sayfaları.

Kitap:

Soyadı, A., Tarih. Kitabın Adı. Basımevi, Basıldığı Kentin Adı.

Rapor ve Tezler:

Soyadı, A., Tarih. Rapor veya tezin başlığı. Kuruluş veya Üniversite ve Bölüm Adı, Sayfa sayısı (yayımlanıp yayımlanmadığı).

Not : Tüm kaynaklarda ilk satırdan sonraki satırlar 3 harf içerden başlanarak yazılmalıdır. Kaynaklara metin içerisinden yazarın soyadı ve yayın tarihi belirtilerek aşağıdaki örneklere benzer şekilde atıfta bulunmalıdır.

Ketin ve Canitez (1972).....

Bazı araştırmacılar (Bieniawski, 1989; Barton, 2002).....

Eşitlikler

- a. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir.
- b. Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir.

Çizelgeler

- a. Yazarlar, Bülten'in boyutlarını dikkate alarak, çizelge sayısını sınırlı tutmalı, gerekiyorsa metinde kullanılabilecek çizelgeleri daha küçük karakterlerle yazılmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunlu olan büyük çizelgelerin (çizelge açıklaması dahil) en fazla (15x20) cm boyutlarında olması gereklidir. Bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak türde çizelgeler kabul edilmez.
- b. Çizelgelerin başlıkları, kısa ve öz olarak seçilerek, hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle) hem de İngilizce (İtalik) ilgili çizelgenin üzerinde verilmelidir.
- c. Çizelgelerde kolonsal ayrımı gösteren düşey çizgiler yer almalı, sadece çizelgenin üst ve alt sınırları ve gerek görülen diğer bölümleri için yatay çizgiler kullanılmalıdır. Çizelgeler, metinden sonra ayrı sayfalarda verilmelidir.

Şekilde (Çizim ve fotoğraflar)

- a. Tüm çizimi ve fotoğraflar şekil olarak değerlendirilip numaralandırılmalıdır. Şekil alt yazıları "Şekiller Dizini" başlığı altında hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harflerle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalik harflerle) ayrı bir sayfada altalta sırayla verilmelidir.
- b. Her şekil, ayrı bir sayfada yer alacak biçimde sıraya dizilerek şekiller Dizin sayfasıyla birlikte çizelgelerden sonra sunulmalıdır. Şekil alt yazılarının ayrıca şekillerin altına yazılmasına gerek olmayıp, şekil numaralarının kurşun kalemle her şeklin sağ üst köşesinde belirtilmesi yeterlidir.
- c. Harita, kesit ve planlarda sayısal ölçek yerine çubuk ölçek kullanılmalıdır.