

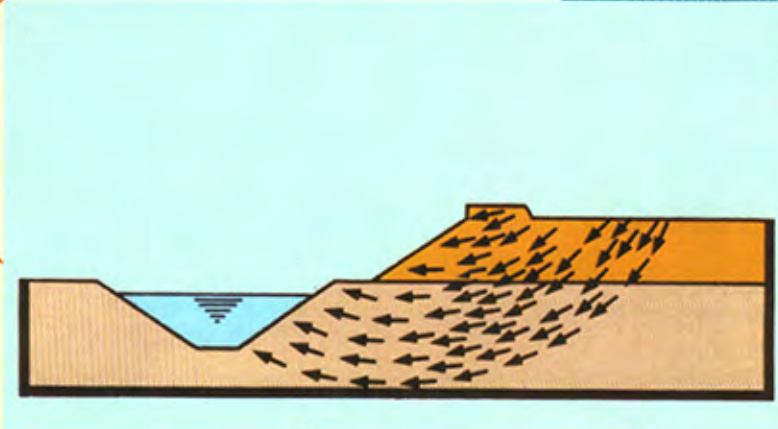
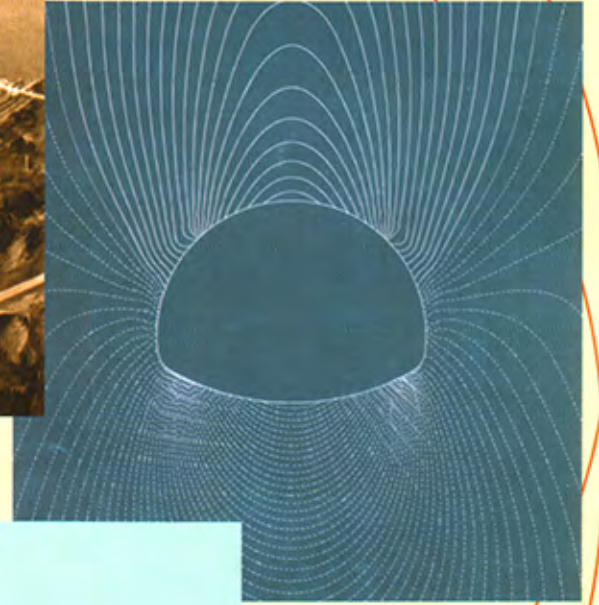
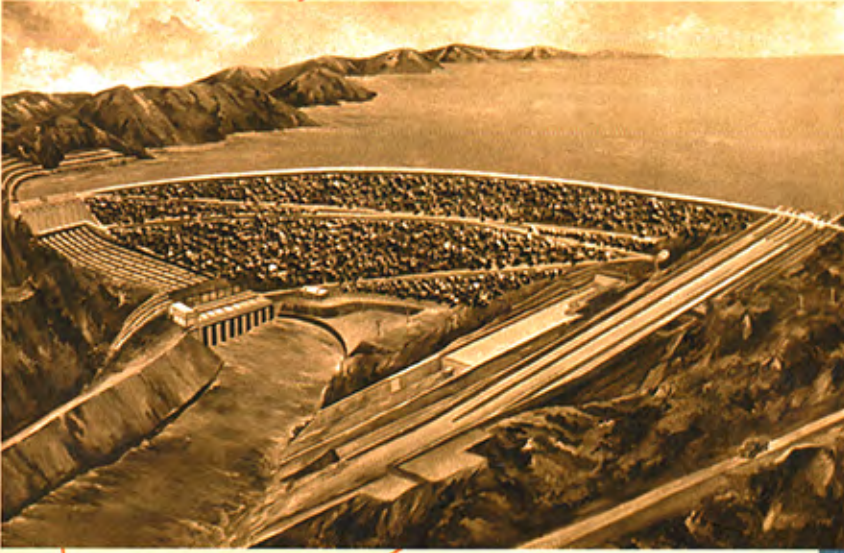


ISSN 1305-6859

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY

2007

SAYI:24-25



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

Editörler Kurulu / Editorial Board
Reşat ULUSAY
Recep KILIÇ
Tamer TOPAL

Yardımcı Editör / Assistant Editor
Murat ERCANOĞLU

Yayın Danışma Kurulu / Advisory Board

Ergin ARIÖĞLU	Okay GÜRPINAR
Çan AYDAY	Remzi KARAGÜZEL
Remzi DİLEK	K. Erçin KASAPOĞLU
Vedat DOYURAN	Şakir ŞİMŞEK
Mehmet EKMEKÇİ	Atiye TUĞRUL
Mustafa ERDOĞAN	Nezdet TÜRK
Okay EROSKAY	Mahir VARDAR
Aziz ERTUNÇ	Erdoğan YÜZER
Çandan GÖKÇEOĞLU	

Uluslararası Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Yönetim Kurulu

International Association of Engineering Geology and the Environment Turkish National 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 (SDÜ)

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 Gönderecekler İçin 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

Prof. Dr. Recep Kılıç
Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06100 Tandoğan, Ankara
e-mail: rkilic@eng.ankara.edu.tr
Tel: (312) 212 67 20/1343
Telefax: (312) 221 26 60

Prof. Dr. Tamer Topal
ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06531, Ankara
e-mail: topal@metu.edu.tr
Tel: (312) 210 26 90
Fax: (312) 210 12 63

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ BÜLTENİ

BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY

Sayı(No.): 24-25 Haziran-Aralık (June-December) 2007

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Aşıgediği (Niğde) Kuvarsitinin Agregası Olarak Değerlendirilmesi / Evaluation of the Aşıgediği (Niğde) Quartzite for Using as Aggregate Osman GÜNAYDIN, Mustafa FENER, Ali GÖKOĞLU	1
Tane Boyu Dağılımının Killerin Kompaksiyon ve Büzülme Özellikleri Üzerine Etkisi / The effect of grain size distribution on compaction and shrinkage properties of clays Hakan GÜNEYLİ, Osman GÜNAYDIN, Mustafa FENER, Özgür YÜKSEL.....	17
Bir Granadiyoritin Bozunma Derecesinin Kestirimi İçin Bazı Yaklaşımlar / Some Approaches for Prediction of Weathering Degree of a Granadiorite Kıvanç ZORLU, Candan GÖKÇEOĞLU, Şener CERYAN, Hakan A. NEFESLİOĞLU	29
Analitik Hiyerarşi Süreci Kullanılarak Akifer Kirlenebilirliğinin Değerlendirilmesi / Assessment of Aquifer Vulnerability Using Analytic Hierarchy Process Celalettin ŞİMŞEK, Nesrin BARIŞ.....	47

AŞIGEDİĞİ (NİĞDE) KUARSİTİNİN AGREGA OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Evaluation of the Aşıgediği (Niğde) Quartzite for Using as Aggregate

Osman GÜNAYDIN¹, Mustafa FENER¹, Ali GÖKOĞLU^{2*}

¹ Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Niğde

² Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Meslek Yüksekokulu, İnşaat Programı, Ceyhan, Adana

ÖZ

Bu makale; Niğde ili sınırları içerisinde geniş bir yayılım gösteren Aşıgediği Kuvarsiti üzerinde yapılmış bir çalışmayı kapsamaktadır. Kuvarsitin beton agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla bir seri analiz ve deneyler yapılmıştır. İnce kesitler üzerinde mineralojik-petrografik analizler yapılmış ve kimyasal analizle kuvarsitlerin bileşimleri, ayrıca kimyasal yöntemle alkali-silis reaksiyonu (ASR) belirlenmiştir. Özgül ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, görünür porozite (gözeneklilik) gibi indeks özellikler ve tek eksenli sıkışma dayanımı, Los Angeles aşınma değeri, agregada darbe dayanımı (AIV), sodyum sülfat çözeltisindeki don kaybı gibi mekanik özellikler saptanmıştır. Analiz ve deney sonuçlarının değerlendirilmesiyle Aşıgediği Kuvarsitinin agregada olarak kullanılmasında bir sakınca olmayacağı anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, agregada, Aşıgediği, kuvarsit, Niğde.

ABSTRACT

This paper comprises a study carried out on Aşıgediği Quartzite covering a large area in Niğde. Numerous analysis and tests were performed on the Aşıgediği Quartzite to investigate its possible use as a concrete aggregate. Mineralogical-petrographic analyses were conducted on thin sections and chemical contents were obtained by chemical analysis. Furthermore, alkali-silica reactivity (ASR) of the quartzite was determined by chemical method. Physical properties such as specific gravity, dry unit weight, effective porosity and mechanical properties such as uniaxial compressive strength, Los Angeles abrasion value, aggregate impact value (AIV), sodium sulphate soundness were determined. Based on the data obtained from the analyses and tests, it was concluded that the Aşıgediği Quartzite can be used as concrete aggregate.

Key Words: Concrete, aggregate, Aşıgediği, quartzite, Niğde.

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişmesi ve buna koşut olarak beraber nüfusun önemli ölçüde artması, dünyada ve ülkemizde yapı sektöründe önemli derecede değişikliğe sebep olmuştur. Önceleri tek katlı olarak inşa edilen konutların yerini çok katlı binalara bırakması, geçmiş yüzyıllarda çok az rastladığımız yollar (otobanlar), barajlar, tüneller, nükleer enerji santralleri gibi endüstriyel amaçlı inşa edilen yapıların sayısının hızla artması, bu gelişmelere koşut olarak yapıların çekirdeğini oluşturan beton agregasına olan talepte de artışa neden olmuştur. Önceleri yapı malzemesi olarak kullanılan dere kumlarının bu gereksinime cevap vermede yetersiz kalması ve kullanımından kaynaklanan bazı dezavantajların (alkali agregası reaksiyonu vb.) laboratuvar deneyleriyle belirlenmesi yapı sektörünü alternatif beton agregası arama yoluna itmiştir. Bu nedenle, doğada mevcut bulunan sert kaya birimlerinin değişik boyutlarda kırılması ile agregası üretimi sağlanmıştır.

Bu çalışmada; Aşığediği kuvarsitinin beton agregası olarak kullanılıp kullanılmayacağının ortaya konması amaçlanmıştır. Aşığediği kuvarsitinin mineralojik ve petrografik özelliklerini belirlemek için ince kesitleri hazırlanmış, jeokimyasal analizleri ile birlikte alkali-silis reaksiyonu (ASR) değerlendirilmiştir. Kuvarsitin fiziksel özelliklerinden; özgül ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, toplam porozite, efektif (görünür) porozite, hacimce-ağırlıkça su emme oranları ve don kaybı belirlenmiştir. Mühendislik özelliklerinden tek eksenli sıkışma dayanımı, nokta yükü dayanım indeksi, Los Angeles aşınma değeri, agregası darbe dayanımı ve Schmidt çekici geri sıçrama sertlik değeri tayin edilmiştir.

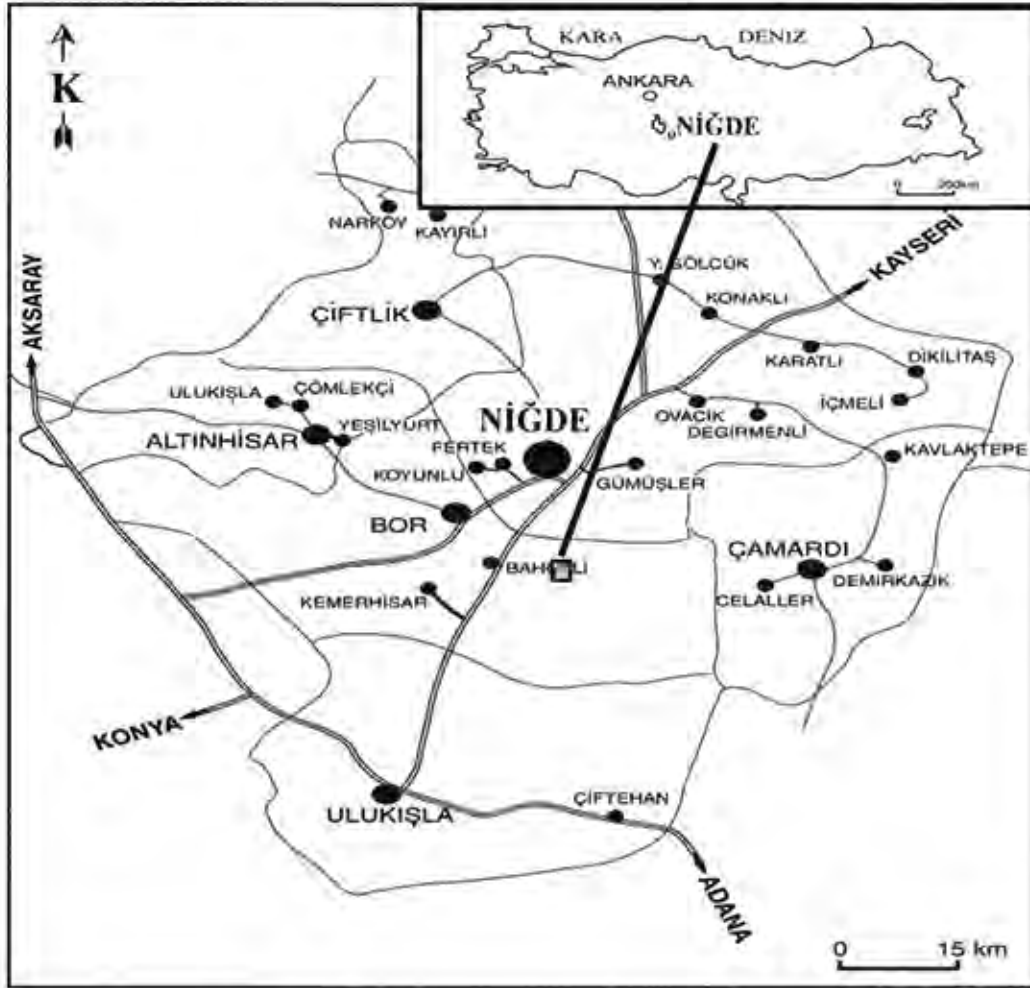
Laboratuvar deneylerinde kullanmak üzere yaklaşık 40x40x20 cm boyutlarında 6 adet blok numune alınmıştır. Ayrıca özgül ağırlık, Los Angeles aşınma, agregası darbe dayanımı (AIV), sodyum sülfat çözeltisinde don kaybı gibi deneylerin yapılabilmesi amacıyla araziden alınan bu numuneler, değişik çaplardaki eleklerden geçecek şekilde çeneli konkasör yardımıyla kırılmıştır.

Aşığediği kuvarsitinin mühendislik özelliklerini belirleyebilmek için yapılan laboratuvar çalışmalarında İSRM (1981) yöntemi, ASTM C289-94 (1997), ASTM D2938-95 (2003), ASTM D2845-00 (2003), ASTM D5731-95 (2000), TS 699 (1987), TS 707 (1980), TS EN 1097-2 (2000), TS EN 1097-6 (2002), TS EN 1367-1 (2001), TS 706 (1980) standartları kullanılmıştır.

2. AŞIGEDİĞİ KUVARŞİTİNİN KONUMU VE JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanı, Orta Anadolu'nun güneyinde Niğde il sınırı içerisinde yer almaktadır. Çalışmanın malzemesini oluşturan kuvarsit; Niğde'nin güneyinde, Çamardı'nın batısında yer almaktadır. Niğde metamorfik topluluğunun en üst birimini oluşturan ve Paleozoyik yaşı olan Aşığediği formasyonu metamorfitlerinin toplam kalınlığı yaklaşık 2000 m'dir. Birim adını, Niğde metamorfik topluluğunun en yüksek tepesini oluşturan Aşığediği Tepesi'nden almıştır. Aşığediği formasyonu metamorfitlerini oluşturan kaya türleri tabandan tavana doğ-

ru mermer, kuvarsit, gnays ve amfibolittir. Aşıldığı metamorfite ara katkı olarak katılan kuvarsitler 1-8 m kalınlığında bantlar halinde, bazen gnays bazen de amfibolitlere geçiş gösterirler. Bu durumda; amfibolit-kuvarsit, muskovit-gnays-kuvarsit gibi karışık yapılı kayalar tiplerini meydana getirirler (Göncüoğlu, 1981) (Şekil 1 ve 2).



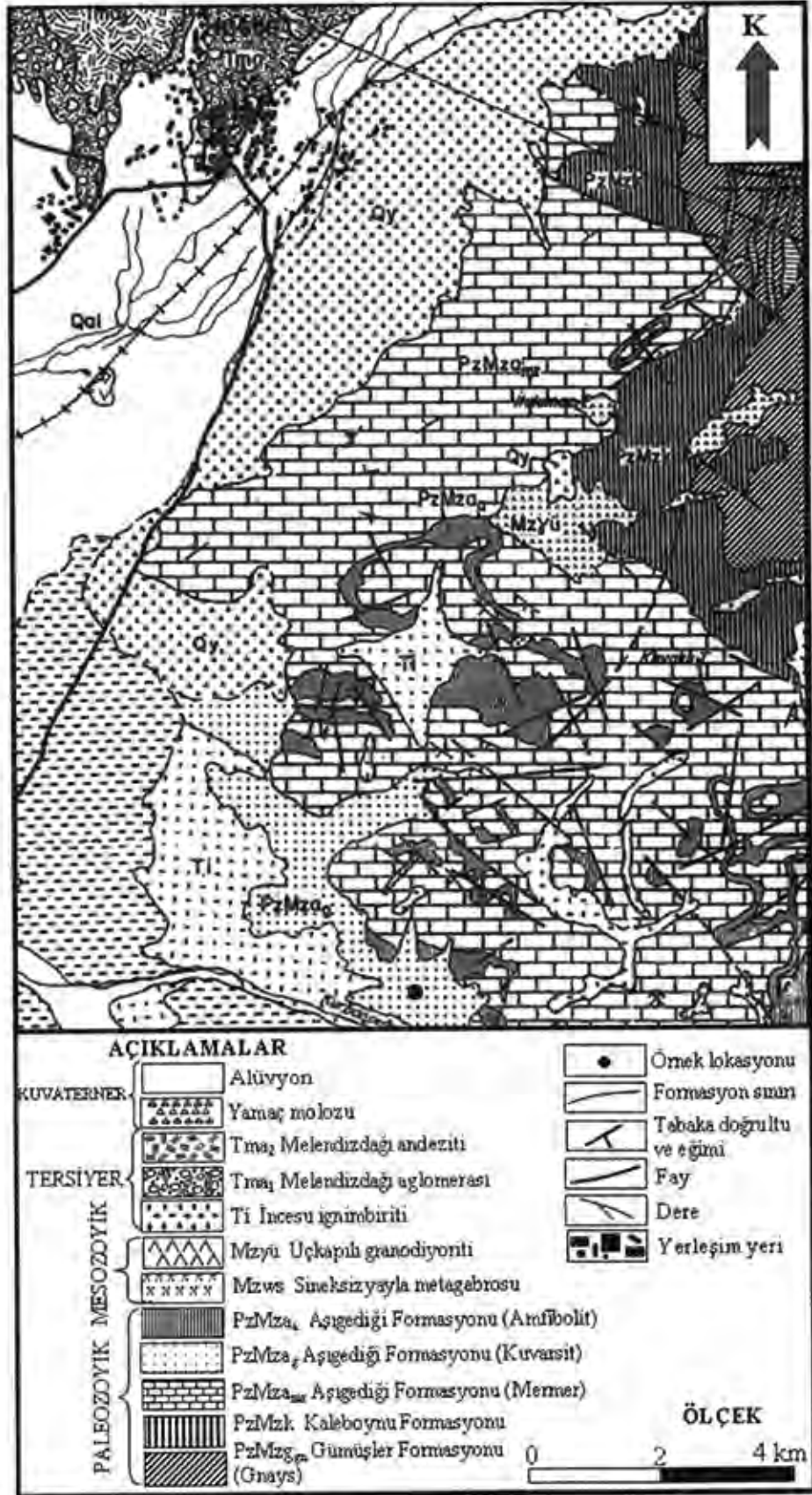
Şekil 1. Çalışma alanının yer buldurur haritası.

Figure 1. The location map of the study area.

3. MİNERALojİK-PETROGRAfİK VE JEOKİMYASAL ÖZELLİKLER

3.1. Mineralojik ve Petrografik Özellikler

Aşıldığı kuvarsitine ait örneklerin, mineralojik bileşim, doku ve ayrışma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla MTA'da ince kesitleri yaptırılmış ve petrografi laboratuvarında polarizan mikroskop altında incelenmiştir. Aşıldığı kuvarsiti açık ve koyu yeşil renk tonlarında, masif, 1 ile 20 m kalınlığında ara seviyeler halinde yüzeylenmiştir. Mikroskop altında yapılan incelemelerde kayacın kuvars, feldispat ve çok az miktarda biyotit, granat ve muskovit içerdiği gözlenmiştir (Çizelge 1).



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (MTA, 1990'dan alınmıştır).
Figure 2. Geological map of the study area (after MTA, 1990).

Çizelge 1. Aşıgediği kuvarsitinin makroskopik ve mikroskopik özellikleri.

Table 1. Macroscopical and microscopical properties of the Aşıgediği quartzite.

Makroskopik özellikler		Mikroskopik özellikler		
		Mineraller	Modal sınıflama	Gözlenen dokular
Renk	Açık ve koyu yeşil	Kuvars	% 74	Foliasyonsuz
Mineral dizilimi (Yönlenmesi)	Belli değil	K. Feldispat	% 8	
Yapısal özellikler	Masif	P. Feldispat	% 8	
Ayrışma	Yüzey kısımlarında killeşme	Biyotit	% 0-4	
Çatlaklılık	Yok	Granat	% 0-4	
Mineraller	Kuvars, feldispat	Muskovit	% 0-2	

3.2. Jeokimyasal Özellikler ve Alkali-Silis Reaksiyonu (ASR)

Bileşiminde volkan camları, mikro ve kriptokristalin kuvars, tridimit, kristobalit, opal ve kalsedon gibi belirli mineraller bulunan agregalar, betonda kullanılan çimentodan veya dış kaynaklardan gelen alkali hidroksitlerle reaksiyona girerek çatlamalara ve genleşmelere neden olurlar. Opal, bünyesinde değişen miktarda su bulunduran amorf bir silikadır ve aynı zamanda silikaların en reaktif olanıdır (Arslan, 2001). Volkan camları, mikro ve kriptokristalin kuvars, kalsedon, tridimit ve kristobalit orta derecede reaktif mineral olarak tanımlanmıştır (Binal, 2004). Agregayı oluşturan mineral bileşimlerinin yanı sıra; alkali-silis reaksiyonunun meydana gelmesinde nem, dış alkaliler, ıslanma ve kuruma, sıcaklık, beton alkalinitesi de etkili olmaktadır. Nem, alkali iyonların yayılmasına ve bu yayılmada reaksiyon zonlarında jel oluşumuna neden olur. Oluşan jel ise, su emerek şişip genişlemeye ve betonda içsel çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Araştırmalar, bağıl nem oranı %80'nin üzerinde olan betonlarda ASR'nin oluştuğunu göstermektedir (Arslan, 2001).

Kar mücadelesinde kullanılan NaCl, deniz suyu, endüstriyel atık suları gibi dış alkaliler ASR'den kaynaklanan genleşmeleri artırır. Sık ıslanma-kuruma tekrarı betonda alkali taşınmasını kolaylaştırmaktadır. Bu durumun alkalilerin kuruma bölgelerinde yoğunlaşmasına ve dolayısı ile bu bölgelerde tepkimenin hızlı gelişmesine neden olduğu bilinmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak alkali-silis reaksiyonunun (ASR) hızı artar. Bu nedenle agregaların büyük çoğunluğu yüksek sıcaklıklarda daha fazla reaktif özellik göstermektedirler. Yaygın olarak kullanılan beton agregalarının bünyesinde reaktif silis mineralleri bulunma olasılığının fazla olması nedeniyle alkali-silis reaksiyonu (ASR) ile karşılaşma olasılığı yüksektir. ASR'nin artması betonda sülfat etkileri, donma ve çözülmenin etkilerinin hızlanarak artmasına neden olur (Arslan, 2001).

Yapılan petrografik çalışmalar ışığında kuvarsitten alınan kaya numunelerinin kimyasal analizleri ve alkali-silis reaksiyonları belirlenmiştir. Kimyasal analizler Niğde Çimento Sanayinde; alkali-silis reaksiyonu Karayolları Genel Müdürlüğü'ne bağlı laboratuvarında belirlenmiştir. Kuvarsite ait kimyasal bileşimler ICP metodu ile belirlenmiş olup, sonuçların ortalaması Çizelge 2'de verilmiştir. Kimyasal analiz sonucunda kuvarsitin içerdiği SiO_2 bileşiminin % 78, Al_2O_3 bileşiminin % 6.38 ve Fe_2O_3 içeriği ise % 5.24 olduğu saptanmıştır. SiO_2 içeriğinin yüksek olması, kayacın kuvars minerali içeriğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. SiO_2 içeriğinin artışına bağlı olarak, kayaç içerisindeki Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bileşenleri az oranda bulunmaktadır.

Çizelge 2. Kimyasal analiz sonuçları.

Table 2. Chemical analysis results.

Oksit elementler		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Toplam
Yüzde dağılım (%)	Aşıldığı kuvarsiti	78,00	6,38	5,24	1,96	3,20	2,30	1,11	0,60	1,17	0,03	99,99

Kuvarsitin Na_2O bileşimi % 2.3, K_2O bileşimi ise % 3.2 olarak saptanmıştır. Kuvarsitteki bu bileşenlerin yüksek çıkmasının içerisindeki feldispat mineralinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. ASR riski olmamasına rağmen, agregadaki (kuvarsitteki) alkali bileşimlerinin yüksek çıkması nedeniyle betona olan zararlı etkisini yok etmek için portland çimentolarının curuf ve uçucu küller ile birlikte kullanılmasının daha yararlı olacağı anlaşılmıştır.

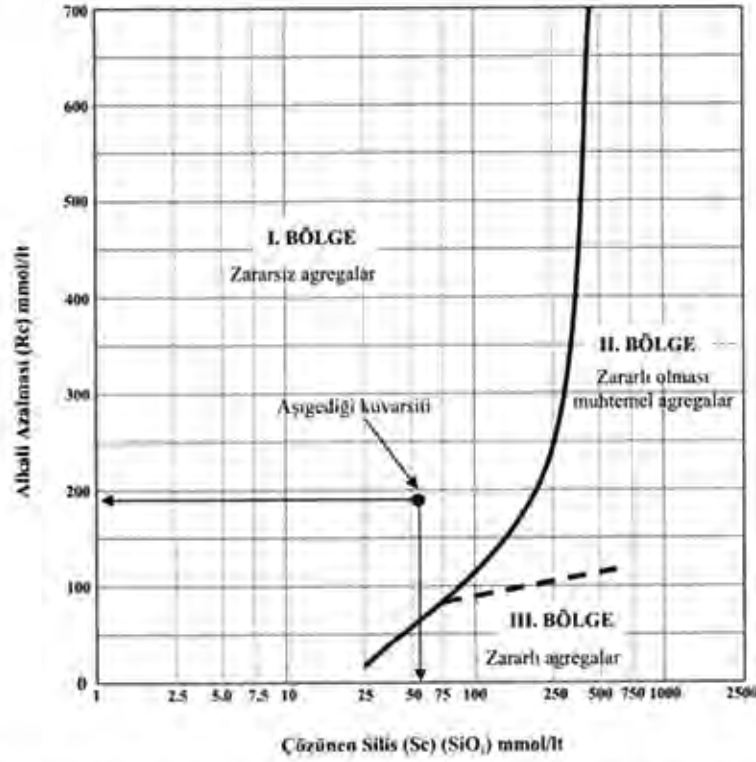
Ayrıca arazide çok nadir bir şekilde kuvarsitin yüzey kısımlarında killeşmenin olduğu, ancak derinlere inildikçe bu killeşmenin olmadığı gözlenmiştir. Killeşme, agreganın geçirimsizlik katsayısının azalmasına, gözenekliliğin ve buna bağlı olarak su emme kapasitesinin artmasına neden olduğundan, agreganın çimentoyla olan ilişkisini yok ederek su alınca şişmesine ve betonda genleşmelere yol açabilmektedir. Bu nedenle, killeşmenin olduğu yerlerin beton agregası olarak kullanılmamasına dikkat edilmelidir.

Kuvarsitin alkali-silis reaksiyonu ASTM C 289-94 (1997) standardı kullanılarak kimyasal analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Alkali-silis reaksiyonu deney sonuçlarına göre Aşıldığı kuvarsitin çözünmüş silis konsantrasyonu (Sc) 56.1 mmol/l, alkali azalması (Rc) ise 195 mmol/l olarak bulunmuştur. Bu değerler kontrol edildiğinde, söz konusu kuvarsitin alkali-silis reaksiyonu (ASR) yönünden zararsız agregalar sınıfına girdiği gözlenmektedir (Şekil 3). Bu veriler ışığında Aşıldığı kuvarsitin beton agregası olarak kullanılmasında ASR açısından bir sakınca olmayacağı anlaşılmıştır.

4. AŞIGEDİĞİ KUARSİTİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Aşıldığı kuvarsite ait fiziksel ve mekanik özellikler laboratuvarlarda ISRM (1981) yöntemi, ASTM C131-01 (2001), ASTM C289-94 (1997), ASTM D2938-95 (2003), ASTM D2845 (2003), ASTM D5731-95 (2000), TS 707 (1980), TS EN 1097-2 (2000), TS EN

1097-6 (2002), TS EN 1367-1 (2001), TS 706 (1980) standartlarına göre incelenmiştir. Kaya bloklarından alınan karotlar etüvde 105°C'de 24 saat kurutulup saf suda 48 saat bekletildikten sonra doygun ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen kuru ve doygun ağırlık değerleri kullanılarak kuvarsitin özgül ağırlık (G), kuru birim hacim ağırlık (γ_k), görünür porozite (n_g), ağırlıkça su emme (A_w), hacimce su emme (H_w) gibi özellikleri belirlenmiştir (Çizelge 3). Kayanın Schmidt çekici geri sıçrama değeri, tek eksenli sıkışma dayanımı, Los Angeles aşınma kaybı, agrega darbe dayanımı ve sodyum sülfata karşı duyarlılık derecesi ayrı ayrı başlıklar altında ele alınmıştır.



Şekil 3. Aşıldığı kuvarsitin alkali azalması (Rc) ve çözülmüş silis oranı (Sc) grafiği (Neville, 2003).

Figure 3. The graph of reduction in alkalinity (Rc) and ratio of silica dissolved (Sc) of the Aşıldığı quartzite (after Neville, 2003).

Çizelge 3. Aşıldığı kuvarsitin indeks özellikleri.

Table 3. Index properties of the Aşıldığı quartzite.

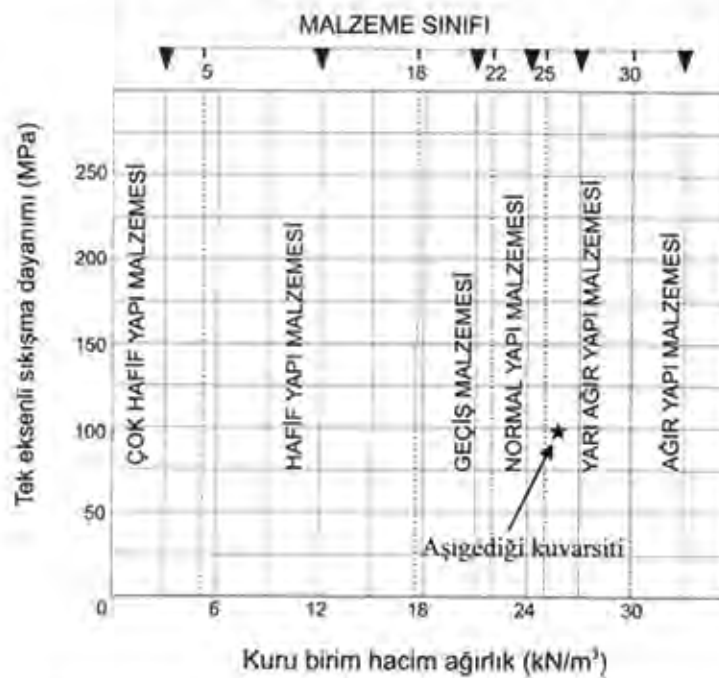
Özellikler	Deney sayısı	Değerler	Standart sapma
Özgül ağırlık (G)	12	2.72	± 0.020
Kuru birim hacim ağırlık (γ_k), (kN/m^3)	17	26.4	± 0.006
Görünür porozite (n_g), (%)	17	0.22	± 0.051
Toplam porozite (n), (%)	17	0.85	-
Hacimce su emme oranı (H_w), (%)	17	0.22	± 0.049
Ağırlıkça su emme oranı (A_w), (%)	17	0.08	± 0.017

Kuvarsitin Moos and Quervain (1948)'nin porozite sınıflandırma sistemine göre “Çok Kompakt Kaya; $n < 1$ ”, CIRIA / CUR (1991; Acır ve Topal, 2005'ten) ağırlıkça su emme sınıflandırma sistemine göre ise “Çok İyi Kaya; ≤ 0.5 ” sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Aşığediği kuvarsitin; Cormon (1973)'un kuru birim hacim ağırlığı esas alarak yapmış olduğu sınıflandırmaya göre “Yarı Ağır-Yapı Malzemeleri” sınıfına (Şekil 4), agrega olarak kullanılabilirliği açısından, Venuat (1983; Aral, 2004'ten)'in kuru birim hacim ağırlığı ve tek eksenli sıkışma dayanımı göz önünde bulundurarak yapmış olduğu sınıflandırmaya göre de “Yarı Ağır-Yapı Malzemesi” sınıfına girdiği belirlenmiştir (Şekil 5).

KURU BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (gr/cm ³)	MALZEME SINIFI	
3.00	AGIR YAPI MALZEMELERİ	→ Aşığediği Kuvarsiti
2.50	YARI AĞIR YAPI MALZEMELERİ	
2.20	NORMAL YAPI MALZEMELERİ	
2.00	GEÇİŞ MALZEMELERİ	
1.80	HAFİF YAPI MALZEMELERİ	
0.50	ÇOK HAFİF YAPI MALZEMELERİ	

Şekli 4. Aşığediği kuvarsitin yapı malzemeleri sınıflandırmasındaki (Cormon, 1973) yeri.
Figure 4. Building materials classification (Cormon, 1973) of the Aşığediği quartzite.



Şekil 5. Aşığediği kuvarsitin farklı alanlarda kullanılabilirliğinin sınıflaması (Venuat, 1983; Aral, 2004'ten).

Figure 5. The classification of the Aşığediği quartzite according to their use (Venuat, 1983; after Aral, 2004).

4.1. Schmidt Çekici Sertliği

Arazi çalışmaları sırasında kaya blokları yüzeyinde N tipi Schmidt çekici, yatay düzleme dik kullanılarak geri sıçrama sertlik değerleri ölçülmüştür. Geri sıçrama değerleri ISRM (1981) yöntemine göre belirlenmiştir. Deney sonucunda Aşıgediği kuvarsitinin Schmidt çekici geri sıçrama değeri 61 olarak belirlenmiş olup, De Beer (1967)'in sertlik değerini göz önünde bulundurarak yapmış olduğu sınıflandırmada “Çok Sert Kaya” sınıfında yer aldığı anlaşılmaktadır. Kuvarsitin geri sıçrama sertlik değerinin çok yüksek olması, günümüz teknolojisinde bu sertlikteki kayaçların agrega olarak değerlendirilmesinde harcanan maliyeti arttırmaktadır. Çalışma alanında daha önce açılmış olan taşocağı, kuvarsitin agrega olarak değerlendirilmesinde yapılan harcamanın çok fazla olması nedeniyle kapanmıştır. Ancak ileri teknolojik şartlar sağlandıktan sonra kuvarsitin agrega olarak değerlendirilmesinin daha kolay hale geleceği düşünülmektedir.

Agrega tanelerinin şekli beton üretiminde iri agregalar için söz konusu olup, daha çok betonun dayanımı üzerinde etkisi vardır. Beton içerisinde iri agregalar arasında önemli oranda boşluklar oluşabilmektedir. Küresel agregalardan oluşan betonda boşluklar daha azdır. Ayrıca betonun dayanımının yüksek olmasında, agrega tanelerinin yığın içerisindeki yerleşimi de etkin rol oynamaktadır. Yassılık ve şekil indeksi deneylerinden elde edilen verilere göre; kuvarsitlerin yüksek dayanımlı kaya grubunda olmalarına karşın, bu kayalardan üretilen agregaların yassı ve küresel olmayan taneler içermeleri, kuvarsitlerin gevrek ve kırılkan olmalarının yanı sıra, içerdikleri süreksizliklerden de kaynaklanmaktadır. Ayrıca kırıcı türünün de etkisi de önemlidir (Baradan, 1991; Erdoğan, 1993, 1999; Tuğrul vd., 2006'dan).

Çeşitli çaplardaki eleklerden geçecek şekilde çeneli konkasör yardımıyla kırılarak hazırlanan Aşıgediği kuvarsit agregalarının pürüzlü bir yüzeye ve köşeli-kübik bir tane şekline sahip olduğu saptanmıştır. Pürüzlü, köşeli-kübik agregaların; pürüzsüz, yuvarlak, yassı, uzun agregalara göre çimento harcı ile olan aderansı (bağı) çok güçlüdür (Arıoğlu vd., 1999). Bu durum betonun çekme gerilmesine mağruz kaldığı durumlarda agrega aderansının önemini ortaya koymaktadır.

4.2. Na₂SO₄ Çözeltisinde Don Kaybı

Aşıgediği kuvarsitinin sodyum sülfat çözeltisindeki don kaybı TS 699 (1987) standardına göre belirlenmiş olup, kuvarsitin sodyum sülfat çözeltisindeki don kaybının %2,12'lik değerle TS 706 (1980)'de belirtilen %18'lik sınır değerinin altında kaldığı gözlenmiştir. Kuvarsitin ağırlıkça su emme değerinin ve sodyum sülfat çözeltisindeki don kaybının düşük olması, kuvarsitin dona dayanıklılığının çok yüksek olduğunu göstermektedir.

4.3. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Kuvarsitin tek eksenli sıkışma deneyi ASTM D2938-95 (2003) standardına göre yapılmış ve tek eksenli sıkışma dayanımı 95.70±13.00 MPa olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4). Kuvar-

sitin özgül ağırlığı (2.72) ve kuru birim hacim ağırlığının ($26.4 \text{ kN/m}^3 = 2.69 \text{ g/cm}^3$) birbirine yakın olması porozitesinin düşük ve buna bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir. Deere ve Miller (1966)'ın tek eksenli sıkışma dayanımını esas alarak yapmış olduğu sınıflandırmaya göre kuvarsitin "Orta Dayanımlı Kaya" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4. Aşıldığı kuvarsitin mekanik özellikleri.

Table 4. Mechanical properties of the Aşıldığı quartzite.

Özellikler	Değer	Standart sapma	Deney sayısı
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	95.70	± 13.55	25
Nokta yükü dayanım indeksi (MPa)	10.00	± 2.167	18
Schmidt çekici geri tepme sayısı	61.00	± 3.535	18
Elastik dalga hızı (m/sn) (V_p)	5734.00	± 43.00	10
100 devirlik aşınma kaybı (%)	4.70	-	3
500 devirlik aşınma kaybı (%)	20.23	-	3
Darbe kaybı (%)	20.00	± 0.200	3
Na_2SO_4 çözeltisindeki don kaybı (%)	2.12	-	3

4.4. Nokta Yükü Dayanım İndeksi

Kuvarsitin nokta yükü dayanım indeksi ASTM D5731-95 (2000) standardına göre belirlenmiştir. Elde edilen nokta yük dayanım indeksi kullanılarak kuvarsitin Bieniawski (1975) sınıflamasına göre "Çok Yüksek Dayanımlı Kaya" sınıfında yer aldığı belirlenmiştir.

4.5. Los Angeles Aşınma Kaybı

Kuvarsitin Los Angeles aşınma kaybı TS EN 1097-2 (2000)'e göre belirlenmiştir. İnceleme sonunda kuvarsitin 100 devir ve 500 devir sonundaki aşınma kayıpları belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre 100 devir sonundaki aşınma kaybı (L_{100}) % 4.70; 500 devir sonundaki aşınma kaybı (L_{500}) ise %20.23 olarak bulunmuştur (Çizelge 4). Aşınma kayıpları ASTM C131-01 (2001) standardına göre değerlendirilmiştir.

Los Angeles aşınma kaybı değeri ne kadar az ise, agreganın aşınmaya karşı direnci o kadar yüksektir. Beton agregası olarak kullanılacak malzemede 100 devir sonundaki Los Angeles aşınma kaybı (L_{100}) sınır değeri $\leq \%10$; 500 devir sonundaki Los Angeles aşınma kaybı sınır değeri $\leq \% 50$ olmalıdır. Yol, havaalanı agregası olarak kullanılacak malzemede 500 devir sonundaki Los Angeles aşınma kaybı sınır değeri $\leq \% 30$ olmalıdır (Arıoğlu vd., 1999).

Kahraman ve Günaydın (2007), kayalar (magmatik, metamorfik ve sedimanter) üzerinde yapmış oldukları bir çalışmada Los Angeles aşınma kaybı değeri ile Schmidt çe-

kici geri sıçrama değeri ve nokta yükü dayanım indeksi arasında bir ilişki belirlemişlerdir. Bu ilişkiye göre inceledikleri kayaçların Los Angeles aşınma kaybı değerinin nokta yükü dayanım indeksi değeri ve Schmidt çekici geri sıçrama değerinin artması ile azaldığını belirtmişlerdir. Aşıldığı kuvarsitin Los Angeles aşınma kaybı değeri, deneysel çalışmanın haricinde Kahraman ve Günaydın (2007)'in Los Angeles aşınma kaybı ile nokta yükü dayanım indeksini ve Schmidt çekici geri sıçrama değerini korele ederek bulmuş olduğu Eşitlik 1 ve 2'deki ilişkilerden de belirlenmiştir. Los Angeles aşınma kaybı değeri (500 devirlik aşınma kaybı değeri), nokta yükü dayanım indeksi (I_s) göz önünde bulundurularak yapılan hesaplama sonucunda % 20.33, Schmidt çekici geri sıçrama değeri (SHV) göz önünde bulundurularak yapılan hesaplama sonucunda ise % 20.01 olarak bulunmuştur. Buradan da görüldüğü üzere, yapılan deneysel çalışmalar ve eşitliklerden elde edilen değerlerin birbirine yakınlığı yapılan deneyin ve elde edilen verilerin doğruluğunu desteklemektedir.

$$LA = 127.96 \times (I_s)^{-0.799} \quad (1)$$

$$LA = -1.9 \times SHV + 135.91 \quad (2)$$

Los Angeles aşınma deneyi sonucuna göre 500 devir sonundaki aşınma kaybının % 20.23 olduğu ve standartlarda (ASTM C131-01, 2001) belirtilen sınırın ($L_{500} \leq \% 50$) altında kaldığı, bunun sonucunda da Aşıldığı kuvarsitin aşınma dayanımı açısından agrega ve yapı malzemesi olarak kullanılmasında bir sakınca olmayacağı anlaşılmıştır.

4.6. Agrega Darbe Dayanımı

Kuvarsitin darbe dayanımı TS EN 1097-2 (2000)'e standardına göre incelenmiş olup, inceleme sonucunda kuvarsitin darbe kaybının % 20 olduğu ve standartlarda belirtilen sınırın ($\leq \% 45$) altında kaldığı saptanmıştır. Kuvarsitin darbe kaybı değerinin düşük çıkması, kuvars içeriğinin fazla ve buna bağlı olarak kuvarsın sertliğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Darbe kaybı değeri ve Los Angeles aşınma kaybı değerlerinin birbirine yakın çıkması ise sonuçların doğruluğunu desteklemesi açısından önemlidir (Çizelge 4).

4.7. Ultrasonik Ses Dalga Hızı

Kuvarsitin ultrasonik ses dalga hızı, ASTM D2845-00 (2003) standardına göre belirlenmiştir. Elastik boyuna ses dalgasının kuvarsit örneklerini geçiş süresi 18.3 μ s gibi bir sürede gerçekleşmiş ve hızı 5734 m/sn olarak belirlenmiştir. Su emme ve ultrasonik ses dalga hızı arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Aşıldığı kuvarsitin porozitesinin düşük olması ve buna koşut olarak su emme oranının düşük olması, ultrasonik ses dalga hızının yüksek çıkma nedenini ortaya koymaktadır. Kayaçlarda ultrasonik ses dalga hızı ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında pozitif bir ilişki vardır. Kayacın kuru birim hacim ağırlığının yüksek olması ve bunun sonucunda tek eksenli sıkışma dayanımının artmasıyla ultrasonik ses dalga hızı da artmaktadır. Bu durum Aşıldığı kuvarsitinde açık bir şekilde görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Aşıldığı kuvarsitin mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve mühendislik özellikleri incelenmiş ve elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- (a) Kuvarsitin özgül ağırlığı 2.72, kuru birim hacim ağırlığı 26.4 kN/m^3 olup, kuru birim hacim ağırlık değeri baz alınarak malzeme açısından yapılan sınıflandırmaya göre “Yarı-Ağır, Yapı Malzemeleri” sınıfına girdiği belirlenmiştir.
- (b) Alkali-silis reaksiyonu yönünden çözünmüş silis konsantrasyonu (S_c) (56.1 mmol/l) değeri ve alkali azalması (R_c) (195 mmol/l) değeri ile zararsız agregalar sınıfında yer aldığı, beton agregası olarak kullanılmasında bir sakınca olmayacağı anlaşılmıştır.
- (c) Kayanın ağırlıkça su emme oranı % 0.08, hacimce su emme oranı % 0.22, toplam porozitesi % 0.85 olup, “Çok Kompakt Kaya” sınıfındadır. Ayrıca su emme oranlarının düşük olması kayacın dayanıklılığı açısından çok önemlidir.
- (d) Schmidt çekici geri sıçrama değerine göre “Çok Sert Kaya” sınıfındadır. Bu durum, kayacın aşınma dayanımının çok yüksek olduğunun bir göstergesidir.
- (e) Na_2SO_4 çözeltisi içerisindeki % 2.1’lik donma-çözülme kaybının standartlarda belirtilen %18’lik sınırın altında kaldığı gözlenmiştir. Donma-çözülme değerinin bu derece düşük olması, kayacın porozitesinin ve su emme değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.
- (f) Kuvarsit, tek eksenli sıkışma dayanımına göre “Orta Dayanımlı Kaya”; nokta yükü dayanımına göre “Çok Yüksek Dayanımlı Kaya” sınıfındadır.
- (g) Los Angeles aşınma deneyi sonucuna göre 500 devir sonundaki aşınma kaybının % 20.23 olduğu ve standartlarda belirtilen sınırın ($L_{500} \leq \% 30$) altında kaldığı belirlenmiştir. Bu değer bu denli düşük çıkması sertliğinin çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- (h) Agregada darbe dayanımı deneyi sonucunda darbe kaybının % 20 olduğu belirlenmiştir.
- (i) Aşıldığı kuvarsit agregalarının pürüzlü bir yüzeye ve köşeli-kübik tane şekline sahip olması, agreganın çimento harcı ile olan aderansını (bağını) artırmaktadır.
- (j) Ultrasonik ses dalga hızı 5734 m/sn olarak belirlenmiş olup, bu denli yüksek hız kayacın yüksek kuru birim hacim ağırlığa ve düşük poroziteye sahip olduğunu göstermektedir.

Kuvarsitin bu özellikleri ISRM (1981) yöntemi ve ilgili TS standartlarında belirtilen özelliklere uygun olduğundan beton agregası olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, “Niğde Bölgesindeki Kaya Birimlerinin Jeolojik ve Mekanik Özellikleri ile bu Birimlerin Alternatif Beton Agregası Olarak Kullanıma Uygunluğunun Araştırılması” adlı projeye sağladığı maddi destekten dolayı Niğde Üniversitesi Rektörlüğüne ve Araştırma Fonu’na teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Acır, Ö. ve Topal, T., 2005. Helaldı (Sinop) dalgakıranında dolgu malzemesi olarak kullanılacak kayaların kalitelerinin belirlenmesi. Mühendislik Jeolojisi Bülteni, 21, 1-17.
- Aral, İ. F., 2004. Karatepe bazaltlarının (Çorlu-Tekirdağ) yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 17 (2), 69-76.
- Arioğlu, E., Arioğlu, N. ve Yılmaz, A., O., 1999. Çözümlü Beton Agregaları. Evrim Yayınevi, İstanbul, 178 s.
- Arslan, M., 2001. Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları, Dayanıklılığı). Atlas Yayın, İstanbul, 237 s.
- ASTM C131-01, 2001. Standard test method for resistance to degradation of small size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, West Conshohocken, PA., 2 p.
- ASTM C289-94, 1997. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method). In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, West Conshohocken, PA., pp. 157-163.
- ASTM D5731-95, 2000. Standard test method for determination of the point load strength index of rock. In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08. West Conshohocken, PA, 1442-1448.
- ASTM D2845-00, 2003. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, West Conshohocken, PA., 292-297.
- ASTM D2938-95, 2003. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens. In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, West Conshohocken, PA., 323-325.
- Baradan, B., 1991. Yapı Malzemesi II (Bağlayıcı Maddeler, Agregalar Beton). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, No. 207, 204 s.
- Bieniawski, Z. T., 1975. The point load test in geotechnical practice. Engineering Geology, 9, 1-11.

- Binal, A., 2004. Pesimum reaktif agrega içeriğinin alkali-silika reaksiyonuna etkisinin deneysel yöntemlerle araştırılması. İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 17 (2), İstanbul, 119-128.
- CIRIA/CUR, 1991. Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering. CIRIA Special Publication 83, Report:154, London, 607p.
- Cormon, P., 1973. Beton de Granulats Legers, Edition Eyrolles, Paris, 391 p.
- De Beer, J. H., 1967. Subjective classification of the hardness of rocks and the associated shear strength. 4th. Regional African Congress. Soil Mechanics, Foundation Engineering. Cape Town, pp. 396-398.
- Deere, D. U., and Miller R. P., 1966. Engineering classification and index properties of intact rock. Technical Report No:AFNL-TR-65-116, Kirtland Air Force Base Weapons Laboratory, New Mexico, 308 p.
- Erdoğan, M., 1993. İstanbul ve dolayının yapay agrega potansiyeli. Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni, 14, 29-41.
- Erdoğan, M., 1999. Safaalanı (Tekirdağ) yöresi amfibolitizistinin agrega özellikleri ve kırıcı türünün malzeme geometrisine etkisi. 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu-1999 Bildiriler Kitabı, s. 81-87.
- Göncüoğlu, M. C., 1981. Niğde masifinin jeolojisi. İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu, Türkiye Jeoloji Kurultayı Yayınları, 16-23.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Sugested Methods. E.T. Brown (ed.), Pergamon Pres, Oxford, 211 p.
- Kahraman, S., and Günaydın, O., 2007. Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates. Bulletin of Engineering Geology and the Environment (baskıda).
- Moos, A. V., and Quervain, F. De., 1948. Technische Gesteinkunde, Verlag Birkhauser, Basel.
- MTA, 1990. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Türkiye Jeolojisi Haritaları Serisi, Kozan J19 Paftası. MTA Matbaası, Ankara.
- Neville., A. M., 2003. Properties of Concrete. Pearson-Prentice Hall, Fourth Edition, pp.144-147.
- TS 706, 1980. Beton agregaları. TSE, Ankara, 46 s.
- TS 707, 1980. Beton agregalarından numune alma ve deney numunesi hazırlama yöntemi. TSE, Ankara, 9 s.

- TS 699, 1987. Tabi yapıtaşları muayene ve deney metotları. TSE, Ankara, 84 s.
- TS EN 1097-2, 2000. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar. TSE, Ankara, 29 s.
- TS EN 1367-1, 2001. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 1: donma ve çözünmeye karşı direncin tayini. TSE, Ankara, 11 s.
- TS EN 1097-6, 2002. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. TSE, Ankara, 29 s.
- Tuğrul, A., Gülendan, K., Ündül, Ö. ve Ertuğrul, C., 2006. İstanbul Çatalca bölgesindeki kuvarsitlerin alternatif beton agregası olarak değerlendirilmesi. 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 179-193.
- Venuat, M., 1983. Du Beton Mouse au Beton de Polymeres. Cahiers Techniques du Bâtiment, No:52, Mai, Paris.

TANE BOYU DAĞILIMININ KİLLERİN KOMPAKSİYON VE BÜZÜLME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

The effect of grain size distribution on compaction and shrinkage properties of clays

Hakan GÜNEYLİ¹, Osman GÜNAYDIN^{2*}, Mustafa FENER², Özgür YÜKSEL¹

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

² Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Niğde

ÖZ

Bu çalışmada, killi zeminlerde tane boyu dağılımının kompaksiyon üzerindeki etkisi ve sıkıştırılmış killi zeminlerin büzülmesi araştırılmıştır. Bu amaçla indeks özellikleri birbirine yakın, farklı mühendislik davranışlarına sahip Handere kil (smektit) ile Almanpınarı kili (illit) içerisine farklı oranlarda tek biçimli silis kumu karıştırılarak, yapay zemin örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan zemin örnekleri ile standart Proktor kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su içeriği ve en büyük kuru birim hacim ağırlık değerleri arasında ilişkiler araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan her iki kil örneğinde kum oranındaki artışa bağlı olarak, standart kompaksiyon deneylerinde en büyük kuru birim hacmin arttığı, optimum su içeriklerinin azaldığı ve buna bağlı olarak büzölmelerin azaldığı grafikler çizilerek gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen kompaksiyon parametreleri ve büzölme değerleri kullanılarak regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğri uydurma teknikleri kullanılarak ilişkiler elde edilmiş, regresyon doğruları çizilmiş ve görgül denklemler türetilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompaksiyon, tane boyu dağılımı, Handere kili, Almanpınarı kili

ABSTRACT

In this study, the influence of grain size distribution on the compaction and the shrinkage of compacted clayey soils were investigated. For this aim, artificial soil samples were prepared by way of adding uniform silica sand into Handere clay (smectite) and Almanpınarı clay (illite) with similar index properties, but different engineering behaviors. Mutual correlations of each optimum moisture content and maximum dry density of the soil samples were investigated by employing standard proctor tests on soil samples prepared. It was put forwarded with the assistance of graphical analyses that maximum dry densities were increased and optimum moisture contents were decreased when sand proportions were increased on standard compaction tests, and thus shrinkage were decreased. Regression analyses were carried out using the compaction parameters and shrinkage values obtained from the experimental studies. Correlations were obtained using curve fitting techniques, regression curves were drawn, and empirical regression equations were derived.

Key words: Compaction, grain size distribution, Handere clay, Almanpınarı clay

1. GİRİŞ

Kompaksiyon, mekanik enerji uygulamak suretiyle zemin yoğunluğunun artırılması işlemi olup (Holtz ve Kovacs, 1981), yol, havaalanı, toprak baraj, toprak dolgu inşaatı vb. gibi mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompaksiyon ile zeminlerin; sabit ve dinamik yükler altında sergileyecekleri oturmalar azaltılmakta, taşıma gücü arttırılmakta, aşınabilirliği azalmakta veya gecikmekte, sıvılaşma özelliği değişmekte, geçirimsizliği azaltılarak don etkisi, şişme, büzülme gibi etkilerden kaynaklanacak hacimsel değişimler kontrol edilebilmekte ve zeminler daha kararlı bir yapı kazanabilmektedirler.

Laboratuvarlarda standart kompaksiyon deneyi ile iki önemli kompaksiyon parametresi olan en büyük kuru birim hacim ağırlık (γ_{maks}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) elde edilir. Kompaksiyon parametrelerinin tahmin edilebilmesi amacıyla çok farklı çalışmalar yapılmıştır. Kompaksiyon parametrelerinin tahmin ile belirlenmesine yönelik ilk çalışma Johnson ve Salberg (1962) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar, Atterberg limitlerini (plastik limit ve likit limit) içeren bir abak yardımıyla standart kompaksiyon deneyi için yaklaşık optimum su içeriğini belirlemeye çalışmışlardır. Daha sonraki yıllarda çeşitli araştırmacılar (Foreman ve Daniel, 1986; Sridharan vd., 1990; Benson ve Trast, 1995; Sridharan ve Nagaraj, 2005) da Atterberg limitleri ile optimum su içeriğinin tahmin edilebilirliği konusunda çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Al-Khafaji (1987); ince taneli zeminlerde Atterberg limitleri ile kil içeriğinin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hausmann (1990) ise, zemin kompaksiyon parametreleri ve zemin sınıflandırma deneyleri arasında görgül ilişkiyi değerlendirmiştir.

Bu araştırmada, ince taneli kohezyonlu zeminlerin mekanik sıkışma özellikleri (kompaksiyon ve büzülme) üzerinde tane boyu dağılımının etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan kompaksiyon yönteminde zeminlerin içerisine karıştırılan tek biçimli silis kumunun, zeminin mühendislik davranışında nasıl bir etki yaptığı araştırılmıştır. Zemin iyileştirme çalışmalarında; özellikle tane boyu dağılımı üzerinde değişiklikler yapılarak, arazide deneme-yanılma yönteminin yaratacağı zaman, ekonomi ve emek israfının önüne geçilebilmesi amaçlanmıştır. Önerilen grafikler ve eşitlikler yardımıyla önceden tahmin ile bu sorunlara daha pratik çözümler getirme olanağı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada silis kumunun tercih edilmesinin nedenlerinden biri; silis kumunun su ile ayrışma, çözünme ve kimyasal tepkimeye girmesinin pratikte olanaksız olmasıdır. Başka bir neden ise, silis kumu tanelerinin diğer kum türlerinden daha dayanımlı olmasından dolayı, kompaksiyon sırasında uygulanacak enerji karşısında tanelerin kırılma ve parçalanmaya karşı daha fazla direnç göstermesidir. Silisin yüksek dayanımı sayesinde silis kumu taneleri kırılmayarak, karışımlardaki ince tane ve kum oranının korunması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarda iyileştirme yöntemi olarak kullanılan kompaksiyon yöntemi ile birlikte, özellikle ince taneli, kohezyonlu birimlerin tek biçimli silis kumu ile belirli oranlarda karıştırılmasının, zeminin mühendislik davranışında olumlu etkiler gösterebileceği üzerine deneysel bir yaklaşımda bulunulmaya çalışılmıştır. Tane boyundaki kontrollü değişimin ince taneli

zeminlerin mühendislik davranışı üzerindeki etkisini geniş anlamda yansıtmaları açısından, birbirlerinden çok farklı zemin özellikleri gösteren smektit ağırlıklı Handere kili (Gürbüz ve Gökçen, 1985) ile illit karakterli Almanpınarı kili (Mirdallı vd., 2006) kullanılarak söz konusu araştırma yapılmıştır. Çalışmada iki farklı kil kullanılmasının amacı kil türü değişiminin sonuçlarda farklılık ortaya çıkarıp çıkarmayacağını belirleyerek, çalışmanın farklı zeminlere uygulanabilirliğinin kontrol edilmesidir. Handere ve Almanpınarı killerinin zemin sınıflandırma deneyleri yapılmış ve her iki kil grubunda saf kil ve saf kile ağırlıkça % 10, 20, 30, ..., 90 tek biçimli kum karışımları ile 20 farklı zemin örneği hazırlanmıştır. Bu 20 farklı zemin örneklerinin özgül ağırlıkları belirlenerek standart Proktor deneyi yapılmış ve her zemin için en büyük kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri bulunmuştur. Kompaksiyon deneyinde hazırlanan örnekler örselenmeden kalıptan çıkartılıp kurutulduktan sonra kum oranına bağlı olarak hacimsel değişimleri belirlenmiştir.

Sonuçta çizilen grafikler yardımıyla, karşılaştırmalar yapılarak grafikler arasındaki ilişkiler bulunmuş, korelasyon katsayısı (r) hesaplanmış ve görgül denklemler elde edilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Örneklerin Hazırlanması ve İndeks Özelliklerin Belirlenmesi

Laboratuvar deneylerinde kullanılan örselenmiş kil örnekleri, Çukurova Üniversitesi Balcalı yerleşkesi çevresinde yüzeylenen Handere Formasyonu içerisindeki killi seviyelerden ve Osmaniye ilinin doğusunda yer alan Almanpınarı kil yataklarından, silis kumları ise Mersin ili yakın doğusunda bulunan Hebilli kum ocağından temin edilmiştir.

Araziden alınan örneklerden yapay örnekler hazırlanıp deneye hazır hale getirilmek için, smektikçe zengin Handere kili ve illitçe zengin Almanpınarı kil örnekleri oda koşullarında 60 gün kurutulduktan sonra, çeneli kırıcıda öğütülmüş ve 0.42 mm açıklıklı elekten elenerek belirli bir homojenlik kazanması sağlanmıştır. Deneyde kullanılan diğer bir malzeme olan silis kumları yine oda koşullarında 60 gün kurutularak 1 cm ve 0.5 mm açıklıklı eleklerden elenmiş ve söz konusu tane boyu aralıklarındaki örnekler deneylerde kullanılmıştır.

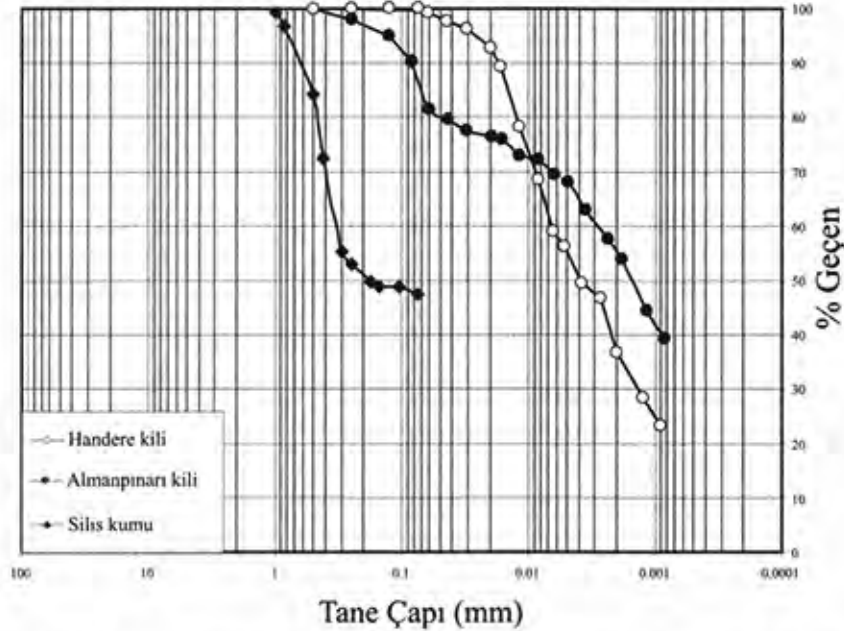
Laboratuvarda öncelikle Handere ve Almanpınarı killerinin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla elek analizi, özgül ağırlık ve Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Elek analizi için ASTM D 422-63 (2003) standardına göre zeminlerin tane boyu dağılımı (Şekil 1), ASTM 5550-00 (2003) standardında belirtilen yöntem kullanılarak da özgül ağırlık değerleri bulunmuştur. Özgül ağırlık belirlenirken 3 adet deney yapılmış ve bu deneylerin ortalaması alınmıştır. Atterberg limitlerinden, likit limit ve plastik limit için, ASTM D 4318-00 (2003) standardı kullanılmış, likit limiti belirlemek için 5 adet deney yapılmış, plastik limiti belirlemek için ise 4 adet deney yapılarak ortalaması alınmıştır. Rötire limitini belirlemek için de ASTM D 427-98 (2003) standardı kullanılarak 3 adet deney sonucunun ortalaması alınmış ve sonuçlar Çizelge 1’de toplu olarak verilmiştir.

Karışımlar hazırlanırken Handere ve Almanpınarı killeri ağırlıkça % 10, 20, 30, ..., 90 oranında tane boyu 0.5-1 mm arasında değişen tek biçimli silis kumu kullanılmıştır.

Çizelge 1. Zemin örneklerinin indeks özellikleri.

Table 1. Index properties of the soil samples.

İndeks özellikleri	Handere kili	Almanpınarı kili	Silis kumu
Likit limit, W_L (%)	42.85	45.25	-
Plastik limit, P_L (%)	23.22	22.62	-
Plastisite indisi, I_p (%)	19.63	22.63	-
Büzülme limiti, W_R (%)	13.36	8.46	-
Büzülme oranı S_R	1.93	1.99	-
Doğrusal büzülme	65.11	52.42	-
Özgül ağırlık (G_s)	2.74	2.74	2.63
Çakıl (%)	0.00	0.00	-
Kum (%)	0.20	13.00	100
Silt (%)	44.30	18.50	-
Kil (%)	55.50	68.50	-
Zemin sınıfı	CL	CL	SP

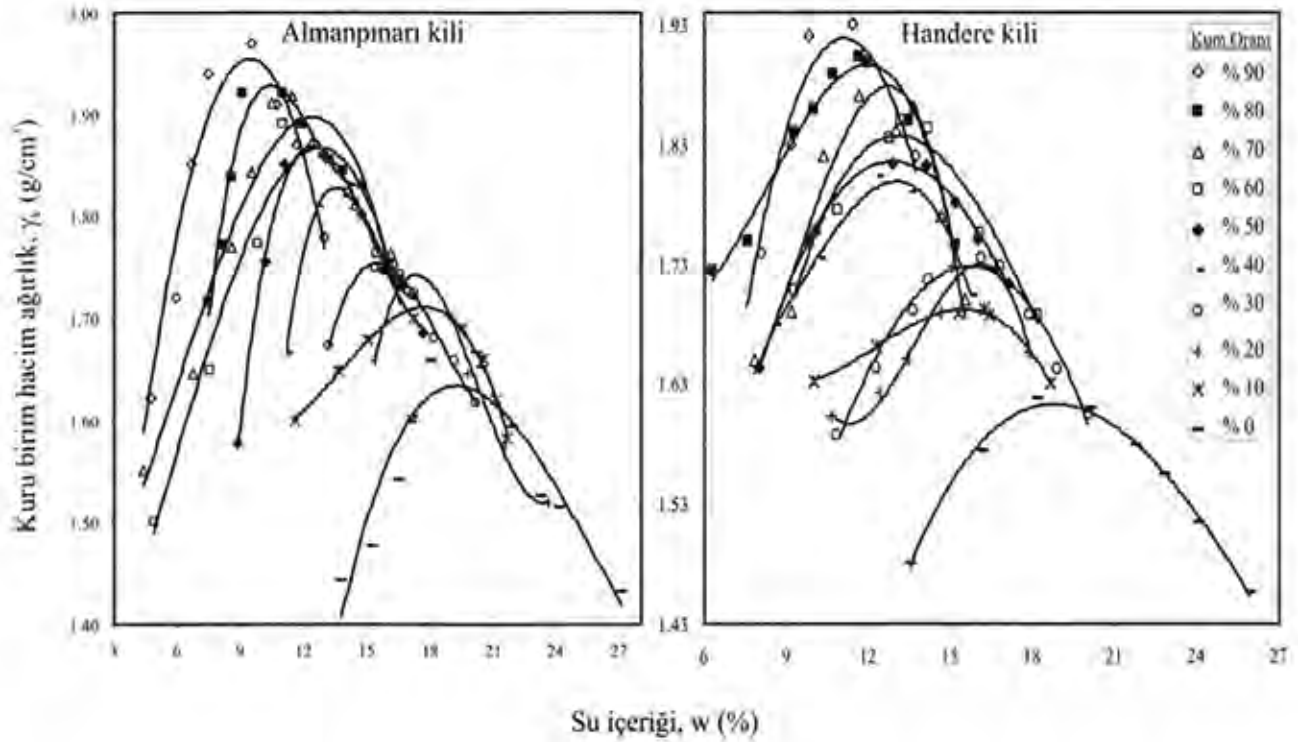


Şekil 1. Handere kili, Almanpınarı kili ve silis kumunun tane boyu dağılım eğrileri.

Figure 1. Particle size distribution curves of the Handere clay, Almanpınarı clay and silica sand.

2.2. Kompaksiyon Deneyleri

Standart Proktor kompaksiyon deneyi, ASTM D 698-00a (2003) standardı kullanılarak, öncelikle kil örneklerinin sonra da, bu örneklerle belirli oranlarda silis kumu karışımı ile hazırlanmış faklı tane boyutuna sahip zemin örneklerinin en büyük kuru birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Zemin örneklerinin kompaksiyon eğrileri.

Figure 2. Compaction curves of the soil samples.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. İndeks Özellikler

Handere ve Almanpınarı killерinin indeks özellikleri Çizelge 1’de topluca verilmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre; Handere kilinin CL sınıfı ve % 55.5 kil, % 44.3 silt ve % 0.2 kum içeren siltli kil, Almanpınarı kilinin ise yine CL sınıfı % 68.5 kil, % 18.5 silt ve % 13 kum içeren siltli kil olduğu belirlenmiştir.

Handere ve Almanpınarı killeri ile karışımlarda kullanılan silis kumunun özgül ağırlıkları ise, sırasıyla 2.74, 2.74 ve 2.63 olarak belirlenmiştir. Her iki tür kile silis kumunun orantılı olarak eklenmesi ile elde edilen yapay zeminlere ait özgül ağırlık değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Saf killerden ve kum karışımlarından elde edilen tüm zeminler için % kum oranı-özgül ağırlık değerleri arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir (Şekil 3). Bu zeminler için söz konusu parametreler arasındaki korelasyon katsayıları (r) 0.99 bulunmuştur. Tüm bu zeminler için Şekil 3’deki eğriden 1 nolu regresyon eşitliği elde edilmiştir.

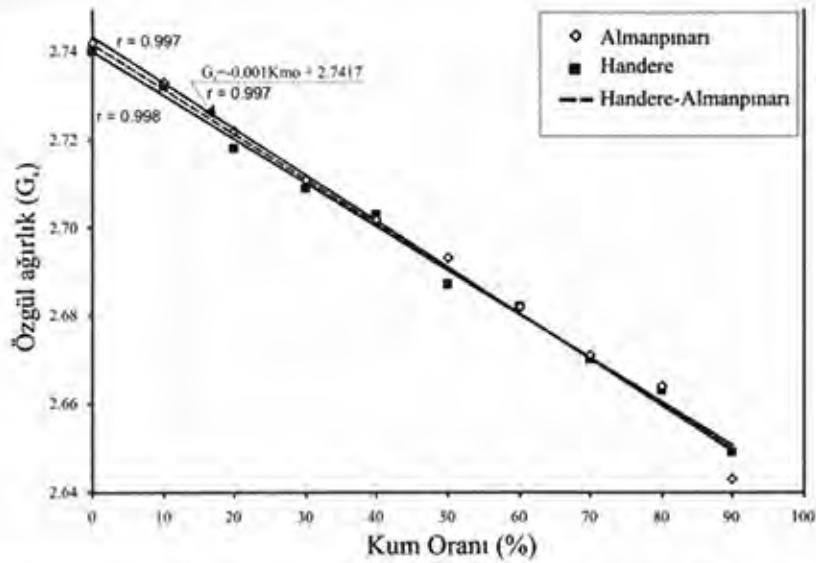
$$G_s = -0.001(Kmo) + 2.7417 \quad (1)$$

Burada, G_s özgül ağırlık ve Kmo kum oranı (%) dır.

Çizelge 2. Zemin örneklerinin özgül ağırlıkları.

Table 2. Specific gravity of the soil samples.

Kum Oranı (%)	Kum + kil karışımına göre özgül ağırlık	
	Handere kili	Almanpınarı kili
0	2.74	2.74
10	2.73	2.73
20	2.72	2.72
30	2.71	2.71
40	2.70	2.70
50	2.69	2.69
60	2.68	2.68
70	2.67	2.67
80	2.66	2.66
90	2.65	2.64
100	2.63	



Şekil 3. Zemin örneklerinin kum oranı ve özgül ağırlıkları arasındaki ilişkiler.

Figure 3. Relationships between the sand percent and specific gravity of the soil samples.

3.2. Kompaksiyon Özellikleri

Handere ve Almanpınarı killeri ve bu killere farklı oranlarda eklenen silis kumu ile elde edilen 20 farklı zemin örneği üzerinde standart Proktor deneyi yapılmış ve bu zeminlere ait kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir (bkz. Şekil 2). Handere kilinde yapılan standart kompaksiyon deneyi ile elde edilen en büyük kuru birim hacim ağırlık 1.62 g/cm^3 ve optimum su içeriği % 19.1, Almanpınarı kili için en büyük kuru birim hacim ağırlık 1.67 g/cm^3 ve optimum su içeriği % 18.4 olarak belirlenmiştir. Tüm zeminler için elde edilen kompaksiyon parametreleri Çizelge 3'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, kum oranlarındaki artışa bağlı olarak, en büyük kuru birim hacim ağırlıklarda da artma, buna karşın optimum su içeriklerinde ise azalma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, zeminlerin tane boyutu artıkça daha düşük su içeriklerinde en fazla sıkılık sağlanmaktadır.

Çizelge 3. Yapay zemin örneklerinin en büyük kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri.
 Table 3. Maximum dry density and optimum moisture content values of the artificial soil specimens.

Kum Oranı (%)	Kum + kil karışımına göre en büyük kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği			
	Handere kili		Almanpınarı kili	
	En büyük kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)	Optimum su içeriği (%)	En büyük kuru birim hacim ağırlık (g/cm ³)	Optimum su içeriği (%)
0	1.62	19.10	1.67	18.40
10	1.69	16.22	1.71	18.40
20	1.73	16.00	1.75	17.20
30	1.74	15.80	1.76	16.00
40	1.78	14.90	1.84	13.50
50	1.82	12.90	1.88	12.20
60	1.84	13.21	1.90	11.50
70	1.90	12.40	1.92	11.43
80	1.91	11.65	1.96	10.15
90	1.94	10.74	1.99	9.10

20 farklı zemin örneğinden elde edilen en büyük kuru birim hacim ağırlık - optimum su içeriği arasındaki doğrusal ters ilişki Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu zeminler için Şekil 4'te elde edilen korelasyon katsayıları (r); Handere kili ve Handere kili - % kum karışımı için $r = 0.987$ Almanpınarı kili ve Almanpınarı kili - % kum karışımı için $r = 0.992$ ve tüm zemin örnekleri için ise, $r = 0.975$ olarak bulunmuştur. Tüm bu zeminler için Şekil 4'te ki eğriden 2 nolu eşitlik elde edilmiştir.

$$\gamma_{kmaks} = -0.032 (w_{opt}) + 2.277 \quad (2)$$

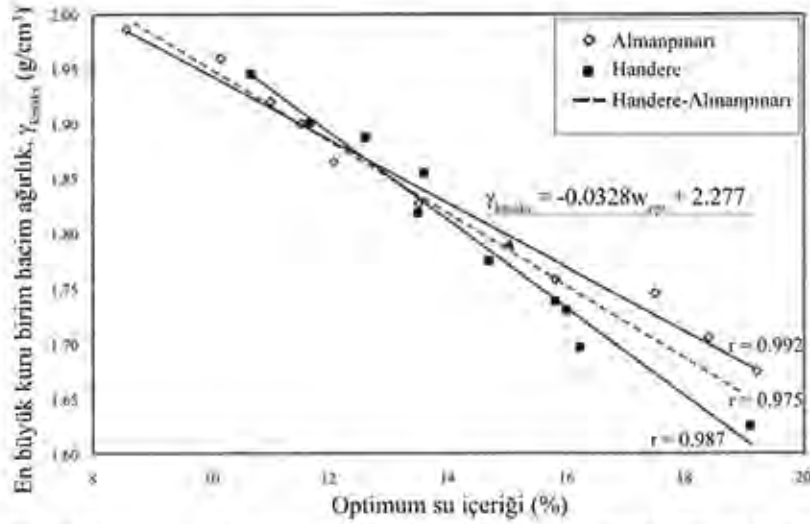
Burada, γ_{kmaks} en büyük kuru birim hacim ağırlık (g/cm³) ve w_{opt} optimum su içeriği (%) dir.

20 farklı zemin örneğinin en büyük kuru birim hacim ağırlık - % kum oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür (Şekil 5). Bu örneklerin korelasyon katsayıları; Handere kili ve Handere kili - % kum karışımı için $r = 0.993$, Almanpınarı kili ve Almanpınarı kili - % kum karışımı için $r = 0.995$ ve tüm zemin numuneleri için ise, $r = 0.976$ olarak bulunmuştur. Tüm bu zeminler için Şekil 5'de ki eğriden 3 nolu eşitlik elde edilmiştir. Aynı şekilde, tüm örnekler için optimum su içeriği - % kum oranı arasında ters yönde bir doğrusal ilişki belirlenmiştir. Bu örneklerin korelasyon katsayıları; Handere kili ve Handere kili - % kum karışımı için $R^2 = 0.974$, Almanpınarı kili ve Almanpınarı kili - % kum karışımı için $R^2 = 0.986$ ve tüm zemin örnekleri için ise, $R^2 = 0.958$ olarak bulunmuştur. Tüm bu zeminler için Şekil 5'teki eğriden 4 no.lu eşitlik elde edilmiştir.

$$\gamma_{kmaks} = 0.0035 (Kmo) + 1.6599 \quad (3)$$

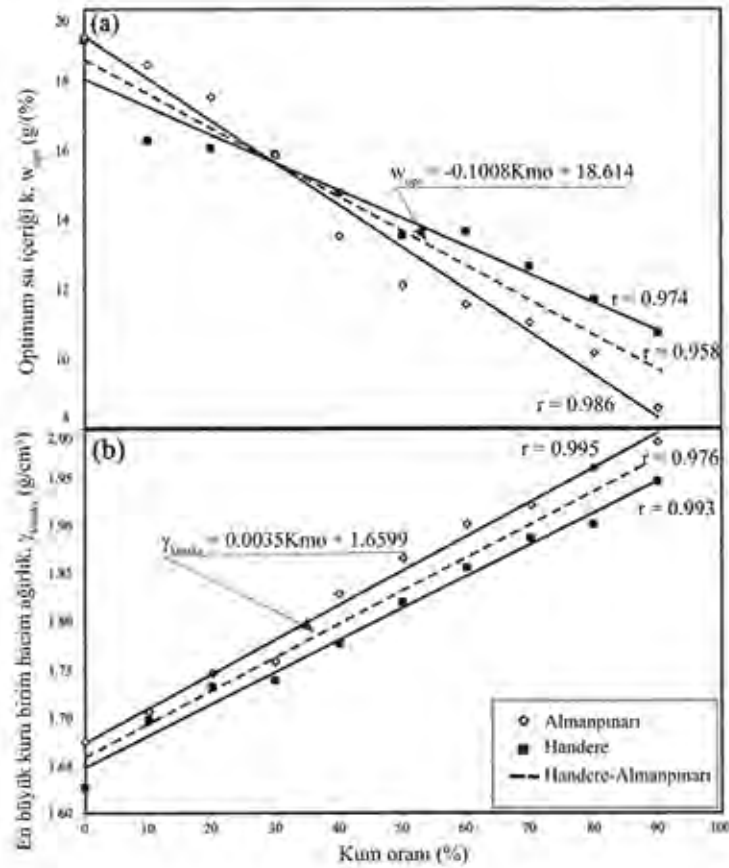
$$w_{opt} = -0.1008 (Kmo) + 18.614 \quad (4)$$

Burada, γ_{kmaks} en büyük kuru birim hacim ağırlık (g/cm³), w_{opt} optimum su içeriği (%) ve Kmo kum oranı (%) dir.



Şekil 4. Zemin örneklerinin optimum su içerikleri ve en büyük kuru birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkiler.

Figure 4. Relationships between the optimum moisture contents and maximum dry density of the soil samples.



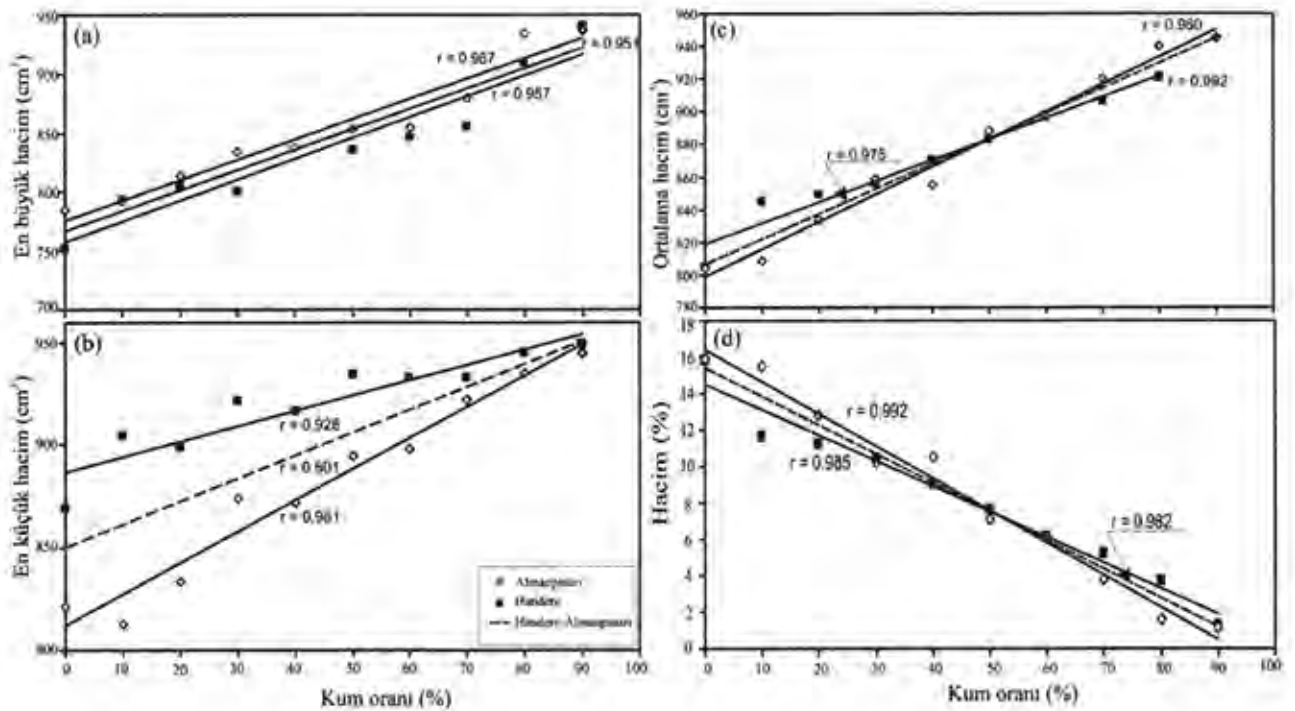
Şekil 5. Zemin örneklerinin kum oranları ile (a) optimum su içerikleri ve (b) en büyük kuru birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkiler.

Figure 5. Relationships between sand percent and (a) optimum moisture content and (b) maximum dry density of the soil samples.

3.2.1. Sıkıştırılmış Handere ve Almanpınarı Killeri Tane Boyu Dağılımı Değişiminin Büzülme Üzerindeki Etkisi

Handere ve Almanpınarı killeri içerisine ağırlıkça % 10'ar artışla 1 ile 0.5 mm arasında değişen tane boyu ağırlığına sahip kuvars kumu karıştırılarak elde edilen, 10'ar farklı tane boyundaki yapay örnekler standart kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmıştır. Standart Proktor deneyinde kullanılan kalıbın hacmi 955.55 cm^3 olup, her bir tane boyuna ait örnek grubundan farklı su içeriklerinde 5 ile 8 arasında sıkıştırma deneyi yapılmıştır. Kalıptan çıkarılan silindirik örnekler, kuruma sırasında çatlamaların meydana gelmemesi amacıyla önce oda sıcaklığında beş gün, daha sonra $50 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kurutulan her sete ait kompaksiyon deney örneği 5 ile 8 arasında değişen kompaksiyon deneyinden oluşmaktadır. Her örnek seti için yapılan kompaksiyon deneyinde sıkıştırılan zemin örneklerinin su içerikleri farklıdır. Başka bir deyişle, bir deney setini temsil eden kompaksiyon eğrisi üzerindeki her bir noktaya karşılık gelen örnekler farklı su içeriklerine sahiptir. Bu nedenle, ilksel hacimleri aynı (955.55 cm^3) olan kompaksiyon örnekleri kuruma sonunda farklı hacimsel değişimler göstermektedirler.

Kompaksiyon deneyine tabi tutulan ve çatlamaya izin verilmeden kurutulan silindirik zemin örneklerinin boyutları 0.01 cm hassasiyetindeki kumpasla ölçülerek son hacimleri belirlenmiş ve her bir örneğin kurumasıyla meydana gelen hacimsel değişimler hesaplanmıştır. Her deney setinde yer alan 5 ile 8 arasındaki örneğin hacimsel değişimi farklı olduğundan, en büyük, en küçük, ortalama ve yüzde hacimsel değişim miktarları ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Kompaksiyon örneklerinin kum oranları-büzülme ilişkileri.

Figure 6. Sand percent-shrinkage relationships of the compacted samples.

Saptanan hacim değişim değerleri içerisinde her bir kum oranındaki veri setinden en küçük hacimler belirlenerek en fazla büzülmenin olduğu deneylerden en düşük büzülme değerleri saptanmış ve % kum oranlarına karşılık en büyük hacim değişimi aynı grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6a). Saptanan hacim değerleri içerisinde aynı şekilde her bir kum oranındaki veri setinden en büyük hacimler alınarak en az büzülmenin olduğu deneylerden en küçük hacim değerleri belirlenmiş ve % kum oranlarına karşılık en küçük hacim değerleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6b). Hacimsel değişimlerin incelenmesinde diğer bir karşılaştırma ortalama hacimler hesaplanarak yapılmıştır. Her bir kum oranındaki tüm örneklerin hacimleri toplamının örnek sayısına bölünmesi ile bulunan ortalama hacim ile % kum oranları karşılaştırıldığında, bu iki değişken arasında da doğrusal bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 6c). Saf kilden elde edilen ortalama hacim 804.84 cm^3 iken, % 90 oranında kum karıştırılmış numunelerden elde edilen ortalama hacim 949.54 cm^3 olmuştur. Kum oranı artışı hacimsel büzülmede orantılı azalmaya neden olmuştur. 10 set deneye ait veriler toplu halde değerlendirildiğinde, ağırlıkça % 10'luk kum artışının, hacimsel büzülmede ortalama % 1.51 (14.47 cm^3)'lik bir azalma sağladığı görülmüştür. Hacimsel değişimlerin incelenmesinde diğer bir karşılaştırma da hacim değişimlerinin yüzdeleri dikkate alınarak yapılmıştır (Şekil 6d). Deney başlangıcındaki hacim ile örnek kurutulduktan sonraki hacim arasındaki fark yüzde olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre 10 set deneye ait verinin yüzde hacim değerleri arasında ters bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Beklenildiği gibi, % kum oranlarındaki artışa bağlı olarak yüzde hacim değerlerinde azalmalar görülmüştür. Saf killerde % 15'lerdeki büzülme değerleri % 90 kum oranında % 1 düzeyine düştüğü görülmüştür.

4. SONUÇLAR ÖNERİLER

Farklı tane boyuna sahip killi zeminlerin kompaksiyon parametreleri ve hacim değişimlerini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- (a) Killi zeminler ve kum karışımları ile elde edilen zeminlerin özgül ağırlıkları saf killerde 2.74 iken, artan kum oranlarına bağlı olarak (% 90 kumda) 2,64'lere kadar düşmüştür.
- (b) Zemin örneklerinde kum oranındaki artışa bağlı olarak, daha düşük su içeriklerinde daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklarda sıkışma elde edilmiştir. Handere ve Almanpınarı killlerinde kompaksiyon parametreleri 1.62 g/cm^3 , % 19.10 ve 1.67 g/cm^3 , % 18.40 iken, % 90 kum karışımı ile elde edilen zemin örneklerinde bu değerlerin 1.94 g/cm^3 , % 10.74 ve 1.99 g/cm^3 , % 9.10 olduğu belirlenmiştir. Tüm kil-kum karışımı oranlarındaki zemin örnekleri topluca değerlendirildiğinde kum oranı artışının kuru yoğunluklarda anlamlı bir artışa; optimum su içeriklerinde ise benzer şekilde azalmaya neden olduğu saptanmıştır. Sözü edilen ilişkilerin korelasyon katsayıları da $r = 0.976$ gibi yüksek değerler bulunmuştur.
- (c) Sıkıştırılmış killi zemin örneklerinde kum oranı artışının büzülme miktarını azalttığı saptanmıştır. Saf killerde kurumayla gerçekleşen büzülme % 16 gibi değerlerdeyken % 90 oranında silis karıştırılmış örneklerde % 1'e doğru azalmıştır. En büyük, en küçük, orta-

lama ve yüzde büzölmeler ile tane boyu değışimi arasındaki korelasyon katsayıları ($r = 0.951, 0.801, 0.975, 0.982$) oldukça yüksektir.

- (d) Killi zeminlerin kompaksiyon yöntemiyle iyileştirmesi çalışmalarında; tane boyu dağılımının, iyileştirilen zeminin mühendislik özelliklerine etkisinin bilinmesi üstünlük sağlayacaktır. İnce taneli bir zemin üzerinde tane boyu dağılımındaki değışikliklerin yaratacağı etki önceden bilindiğinde sahada ya da laboratuvarıda yapılacak birçok deneye gerek kalmadan uygulama aşamasına geçilebilecektir. Böylece, zaman ve maliyet açısından ekonomi sağlanabilir. Bu çalışmada elde edilen grafikler ve eşitlikler yardımıyla, mühendislik projelerinde zeminlerin dikkate alınan davranışları hakkında, önceden tahmin yürütölerek uygulamada daha kısa zaman alan ve pratik çözümler üretilebilir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, deneylerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen jeoloji mühendisi Rukiye Karadeniz'e (Karadeniz Mühendislik Sondaj ve Zemin Etüt Bürosu-Bursa) teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Al-Khafaji, A. N., 1987. A simple approach to the estimation of soil compaction parameters. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 20, 15-30.
- ASTM D 422 - 63, 2003. Standard test tethod for partical - size analysis. *Annual Book of ASTM Standards*; 04.08, West Conshohocken, pp. 10-17.
- ASTM D 427 - 98, 2003. Standard test method for shrinkage factors of soils by the mercury method. *Annual Book of ASTM Standards*; 04.08, West Conshohocken, pp. 22-25.
- ASTM D 4318, 2003. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. *Annual Book of ASTM Standards*; 04.08, West Conshohocken, pp. 582-595.
- ASTM 5550 - 00, 2003. Standard test method for specific gravity of soil solids by gas pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards*; 04.08, West Conshohocken, pp. 1381-1384.
- ASTM D 698-00a, 2003. Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. *Annual Book of ASTM Standards*; 04.08, West Conshohocken, pp. 78-87.
- Benson, C. H., and Trast, J. M., 1995. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and Clay Minerals*, 43 (6), 669-681.

- Foreman E. D., and Daniel, D. E., 1986. Permeation of compacted clay with organic chemicals. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 112, 7, 669-681.
- Gürbüz, K. ve Gökçen, S. L., 1985. Karaömerli-Akkuyu-Balcalı bölgesi (Kuzey Adana) Neojen istifinin sedimanter jeolojik incelenmesi. *Yerbilimleri*, 12, 69-79.
- Hausmann, M. R., 1990. *Engineering principals of ground modification*. McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- Holtz, R.D., and Kovacs, W. D., 1981. *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs.
- Johnson A. W., and Salberg J. R., 1962. Factors influencing compaction results. *Highway Research Board Bulletin*, 319, 125.
- Mirdallı, N., Halefoğlu, Y. Z., ve Sakarya, N., 2006. Almanpınarı kırmızı kilinin seramikte boya olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 15 (1), 229-234.
- Sridharan, A., and Nagaraj, H. B., 2005. Plastic limit and compaction characteristics of finegrained soils. *Ground Improvement*, 9 (1), 17-22.
- Sridharan A., Rao, S. M., and Joshi, S., 1990. Classification of expansive soils by sediment volume method. *Geotechnical Testing Journal*, 13 (4), 375-380.

BİR GRANADİYORİTİN BOZUNMA DERECESESİNİN KESTİRİMİ İÇİN BAZI YAKLAŞIMLAR

Some Approaches for Prediction of Weathering Degree of a Granadiorite

¹Kıvanç ZORLU, ²Candan GÖKÇEOĞLU, ³Şener CERYAN,

⁴Hakan A. NEFESLİOĞLU

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 33342 Çiftlikköy, Mersin

²Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06800 Beytepe, Ankara

³KTÜ, Gümüşhane Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane

⁴MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Uzaktan Algılama Merkezi, Balgat, Ankara

ÖZ

Bozunma kayaların fiziksel, mekanik ve deformasyon özellikleri üzerinde birçok olumsuz etkiye sahiptir. Ancak, kayaların bozunma dereceleri belirlenirken çeşitli güçlüklerle karşılaşmaktadır. İdeal olan, bozunma derecesinin basit deney sonuçları ve güvenilir kestirim modelleriyle belirlenebilmesidir. Bu durum dikkate alınarak, bu çalışmada bozunma derecesinin basit ve düşük maliyetli kestirim modellerinin çok değişkenli regresyon, yapay sinir ağları ve bulanık anlamlandırma yöntemleri kullanılarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. Modeller geliştirilirken, Harşit granitoidinden (Gümüşhane) toplanan örnekler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca, geliştirilen modeller literatürden derlenen verilerle de test edilmiştir. Geliştirilen modellerin girdi parametreleri gözeneklilik ve tek eksenli sıkışma dayanımı olup, bunlar hem model geliştirme verileri hem de kontrol verileri için yüksek kestirim performansı sergilemiştir. Bu sonuç, geliştirilen modellerin bozunma derecesinin dolaylı yoldan kestirilmesinde kullanılabilecek nitelikte olduğunu göstermektedir. Ancak, çok değişkenli regresyon ve yapay sinir ağı modellerinin kullanımı sayısal veri gerektirmekte iken, bulanık anlamlandırma sistemi hem sayısal veri hem de uzamn görüşü ile kullanılabilecek özelliktedir. Bu nedenle, geliştirilen modellerin çeşitli amaçlarla bozunma derecesinin tayin edilmesi açısından önemli bir kullanım potansiyeline sahip olabileceği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bozunma, bulanık anlamlandırma sistemi, çok değişkenli regresyon, granit, yapay sinir ağı

ABSTRACT

Weathering has several adverse effects on physical, mechanical and deformation characteristics of the rocks. However, some difficulties are encountered during the determination of weathering degree of rocks. Ideally, weathering degree should be determined by simple test results and reliable prediction models. By considering this, the present study aims to develop simple and low-cost prediction models for weathering degree by various prediction tools such as multiple regression,

artificial neural networks and fuzzy inference system. When the models were developing, the test results of the specimens collected from the Harşit granitoid (Gümüşhane) were used and the models were tested by the data published in literature. The inputs of the models are porosity and uniaxial compressive strength, and the models exhibited high prediction performances when checking both for train and test data sets. This result shows that the models developed can be used for indirect determinations of weathering degree. However, the multiple regression and artificial neural network models request numerical input data while the fuzzy inference system can be used by both numerical input data and expert opinion. Due to this, it is considered that the models may have a high potential when determining weathering degree of a rock for various purposes.

Keywords: *Weathering, fuzzy inference system, multiple regression, granite, artificial neural network*

1. GİRİŞ

Bozunma, kayaların dayanım ve deformabilite özellikleri üzerinde önemli değişimlere neden olmasından ve kayaların yapıtaşı olarak kullanımını da büyük ölçüde etkilemesinden dolayı, mühendislik jeolojisinin en ilgi çekici alanlarından birisidir. Bu nedenle, kayaların bozunma derecelerinin mümkün olduğu kadar sağlıklı şekilde belirlenmesi kaya davranışı hakkında önemli bilgiler vermekte ve mühendislik jeolojisi projelerinde ekonomik yararlar sağlamaktadır. Ancak kayaların bozunma derecelerinin belirlenmesi, birçok mineralojik ve jeokimyasal analizi gerektirmektedir. Bu nedenle, özellikle mühendislik jeolojisi uygulamalarında kullanılabilecek, bazı mekanik ve fiziksel parametrelerin girdi olarak dikkate alındığı, güvenilir kestirim yöntemlerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bozunma derecesinin belirlenmesi nicel ve nitel olarak yapılabilir. Nitel yöntemler genel olarak gözlemsel tanımlamaları ve basit indeks özellikleri temel almaktadır. Bunlar; renk değişimi (Lee, 1987), feldispat ve/veya biyotitlerin kimyasal bozunma derecesi (Malomo, 1980; Hencher ve Martin, 1982; Raj, 1985; İrfan ve Powell, 1985) ile bozunma derecesinin gözlemsel olarak değerlendirilmesidir (ISRM, 1981; Hencher ve Martin, 1982; İrfan ve Dearman, 1978; Anon, 1995). Bu tür nitel sınıflamalar arazide uygulanabilen basit yöntemlerdir. Ancak bu tür yöntemlerin doğru uygulanabilmesi konu ile ilgili uzman gerektirmektedir. Bozunma derecesinin belirlenmesinde kullanılan diğer yöntemler ise niteldir. Bu tür yöntemler uygulanırken, mineralojik ve indeks özellikler ile zaman zaman da mekanik parametrelere gereksinim duyulmaktadır. Özellikle bu amaç için önerilmiş çeşitli mineralojik indeksler mevcuttur. Bunlar; dağılma derecesi (Lump, 1962), mikropetrografik kalite indeksi (Mendes vd., 1967), ikincil mineral oranı (Weinert, 1968; Cole ve Sandy, 1980), mikroçatlak yoğunluğu (Onodera vd., 1974; Tuğrul, 1995), mikropetrografik indeks (İrfan ve Dearman, 1978), mikroçatlak indeksi (İrfan ve Dearman, 1978), petrografik bozunma indeksi (Tuğrul, 1995) ve çizgisel çatlak yoğunluğudur (Sousa vd., 2005). Bunlar dışındaki nicel bozunma derecesini belirleme yöntemlerinde de (Iliev, 1967; Gupta ve Rao, 2001; Guolin ve Yushan, 1990; Kılıç, 1995; Gökçeoğlu ve Aksoy, 2000; Lan vd., 2003; Arıkan vd., 2007) çeşitli indeks ve dayanım parametreleri kullanılmaktadır. Gupta ve Rao (2001)'ya

göre bozunma, kayaların fiziko-kimyasal ve mekanik özelliklerinde dereceli bir değişikliğe neden olmaktadır ve ideal olan bozunma derecesinin nicel olarak belirlenmesidir. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi, nicel değerlendirmeler için önemli miktarda petrografik, jeokimyasal ve/veya mekanik parametreye gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle, bozunma derecesinin bir mühendislik jeolojisi projesinde gereksinim duyulan temel parametreler kullanılarak kestirilebileceği uygulanabilir modellerin geliştirilmesi bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Bu amaçla Harşit granitoyidinden (Kuzeydoğu Türkiye) alınan çeşitli bozunma derecesine sahip örnekler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Buradan elde edilen sonuçlar kullanılarak, çok değişkenli regresyon, bulanık anlamlandırma sistemi ve yapay sinir ağları yardımıyla bozunma derecesinin tayinine yönelik modeller geliştirilmiştir.

2. SAHA VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Harşit granitoyidi, Doğan kent (Giresun) ve Kürtün (Gümüşhane) arasında yüzlekler vermektedir (Şekil 1). Yerinde bozunma derecelerinin ayırtlanması, örnekleme profillerinin belirlenmesi ve örnekleme işlemleri bu sahada gerçekleştirilmiştir. Sahadaki genç litolojik birimler Harşit granitoyidi tarafından kesilmiştir. Batolitin çeşitli zonlarında kuvars diyorit, kuvars monzonit, kuvars monzodiyorit ve lökogradit bulunurken, Harşit plutonunun merkezi kısımları ise granodiyoritten oluşmaktadır. Tüm bu granitik kayalar Üst Kretase'den Eosen'e kadar olan periyotta doğu Pontid volkanik yayı içine sokulmuştur (Güven, 1993; Boztuğ vd., 1997). Saha çalışmalarının ilk aşamasında tüm bozunma derecelerini içeren profiller tespit edilmiştir. Seçilen profiller düşey kesitte dereceli olarak farklı bozunma derecelerine geçiş göstermektedir. Bu nedenle, örnekleme işlemleri her bozunma derecesini temsil edecek şekilde mümkün olduğunca homojen kesimlerden gerçekleştirilmiştir. Yerinde bozunma dereceleri ISRM (1981) tarafından önerilen görsel tanımlamaya dayalı sınıflama temel alınarak belirlenmiştir. Kalıntı topraklar orijinal dokusunu koruyamaması nedeniyle hacim değişikliğine uğramaktadır. Bu nedenle kalıntı toprak kesimlerinden örnekleme yapılamamıştır. Yaklaşık 30x30x30 cm boyutlarında ve farklı bozunma derecelerine sahip toplam 32 adet blok örnek alınmıştır. Blok örneklerden NX çapında karot hazırlanması işlemi ise laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Ancak, tamamen bozunmuş örneklerden (V. Sınıf) standart NX karot alınamamıştır. Bu sınıfı temsil edebilmek için 5x5x5 cm boyutlarında küp örnekler hazırlanarak, deneylerde bu örnekler kullanılmıştır. Her bozunma derecesini temsil eden bloklardan hazırlanan örneklerin sayıları Çizelge 1'de verilmiştir. Hazırlanan tüm örnekler üzerinde fiziksel ve indeks özellikler ile P-dalga hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ISRM (1981) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. Schmidt çekici ve nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri tamamen bozunmuş örneklerde yapılamamıştır. Buna karşın; ortalama gözeneklilik değerlerinde bozunma derecesindeki artışa bağlı olarak önemli oranda bir artış, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı ve P-dalga hızı değerlerinde ise önemli oranda azalma tespit edilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Harşit granitoidinden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylere ait sonuçların istatistiksel değerlendirmesi.

Table 1. Statistical assessment of the test results from the samples collected from the Harsit granitoid.

(a) Taze (Bozunmamış) (T)

Parametre	Veri sayısı	En küçük	En büyük	Ortalama	St. Sapma
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	6	26.00	26.49	26.31	0.19
Gözeneklilik (%)	6	1.40	2.60	1.85	0.41
Schmidt geri sıçrama değeri	6	44.50	48.40	46.25	1.41
P-dalga hızı (m/s)	6	4006.00	4285.00	4139.00	105.41
Nokta yükleme dayanım indeksi (MPa)	6	6.01	8.00	6.86	0.66
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	6	138.80	167.90	146.82	15.10

(b) Az bozunmuş (AB)

Parametre	Veri sayısı	En küçük	En büyük	Ortalama	St. Sapma
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	5	25.70	26.39	25.98	0.29
Gözeneklilik (%)	5	1.70	3.70	2.50	0.83
Schmidt geri sıçrama değeri	5	31.50	46.30	40.20	5.52
P-dalga hızı (m/s)	5	2744.00	3833.00	3275.20	449.96
Nokta yükleme dayanım indeksi (MPa)	5	1.58	4.44	3.56	1.14
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	5	46.00	144.20	96.78	32.08

(c) Orta derecede bozunmuş (ODB)

Parametre	Veri sayısı	En küçük	En büyük	Ortalama	St. Sapma
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	7	24.62	25.51	25.31	0.32
Gözeneklilik (%)	7	3.80	5.90	4.36	0.70
Schmidt geri sıçrama değeri	6	26.00	34.90	29.55	3.42
P-dalga hızı (m/s)	7	3014.00	3105.00	2598.43	40731
Nokta yükleme dayanım indeksi (MPa)	7	0.35	3.20	1.65	0.99
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	7	16.80	110.30	66.50	37.57

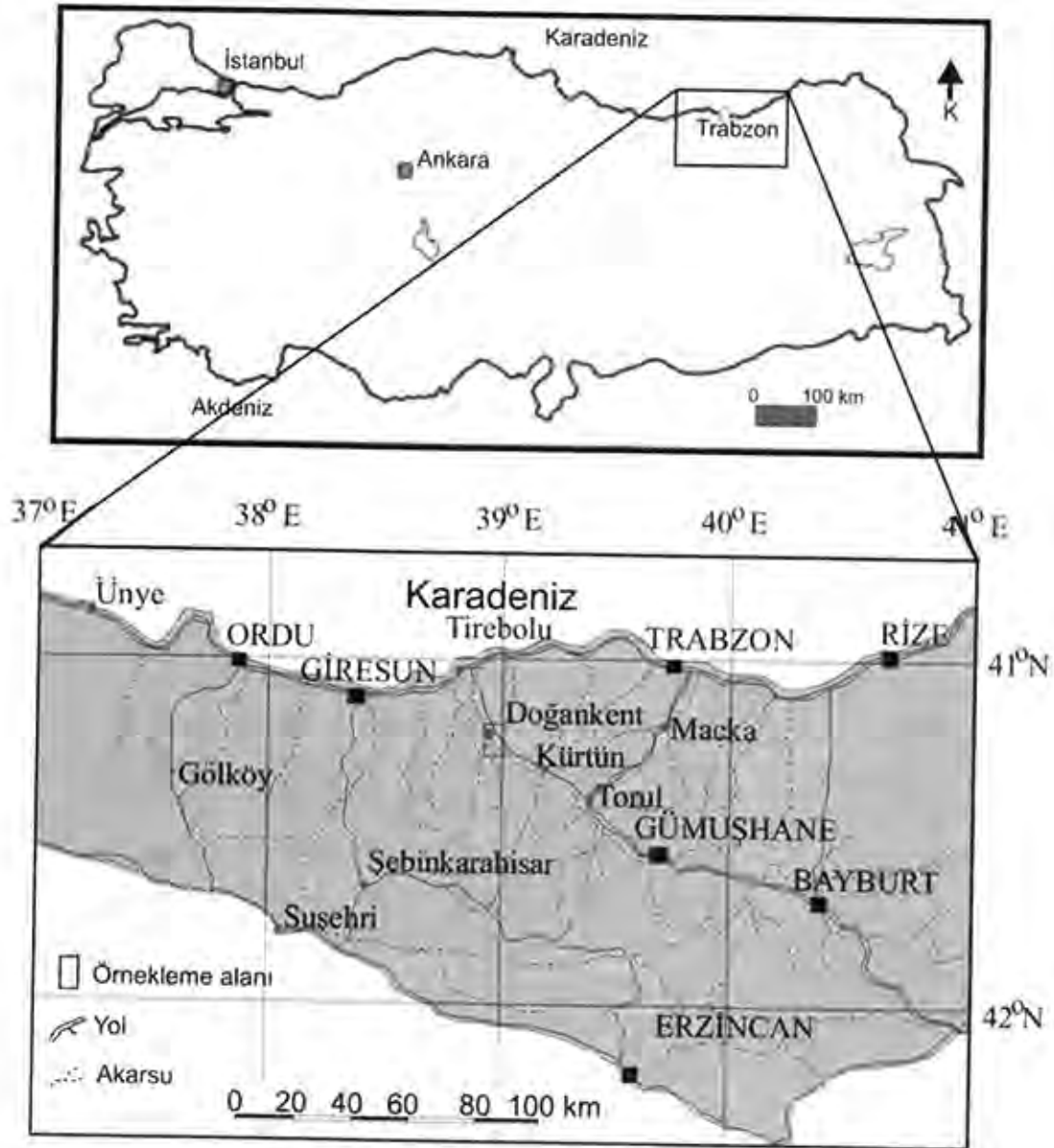
(d) İleri derecede bozunmuş (İDB)

Parametre	Veri sayısı	En küçük	En büyük	Ortalama	St. Sapma
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	7	21.78	25.21	23.63	1.40
Gözeneklilik (%)	7	4.30	17.00	10.50	5.07
Schmidt geri sıçrama değeri	5	13.20	25.30	18.40	5.14
P-dalga hızı (m/s)	7	731.00	2627.00	1339.14	683.29
Nokta yükleme dayanım indeksi (MPa)	2	0.30	1.09	0.70	0.56
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	7	1.40	54.10	12.89	18.85

(e) Tamamen bozunmuş (TB)

Parametre	Veri sayısı	En küçük	En büyük	Ortalama	St. Sapma
Birim hacim ağırlık (kN/m^3)*	7	20.70	22.76	21.81	0.81
Gözeneklilik (%)*	7	11.20	21.40	16.63	3.30
Schmidt geri sıçrama değeri	Ölçülemedi				
P-dalga hızı (m/s)*	7	464.00	920.00	686.29	171.40
Nokta yükleme dayanım indeksi (MPa)	Ölçülemedi				
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)*	7	1.10	3.30	2.19	0.71

*5x5x5 cm boyutlarında küp örnekler kullanılmıştır.



Şekil 1. Örnekleme alanı yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the sampling area.

3. MODEL GİRDİ PARAMETRELERİNİN SEÇİMİ

Temel olarak, bir kestirim modeli kullanıcıya mümkün olduğunca kolaylık sağlamalı ve girdi parametreleri kestirilmek istenen parametre ile fiziksel açıdan ilişkili olmalıdır. Bu temel ilke dikkate alınarak, kestirim modelinde kullanılacak olası parametreler değerlendirilmiştir. Özellikle ortalama gözeneklilik, birim hacim ağırlık, P-dalga hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri bozunma derecesine bağlı olarak belirgin bir değişim göstermiştir. Birim hacim ağırlık değerleri bozunmamış (taze) örneklerde ortalama 26.3 kN/m^3 iken, tamamen bozunmuş örneklerde bu değer 22.8 kN/m^3 'e kadar düşmektedir (Çizelge 1). Taze örneklerin ortalama gözeneklilik değerleri %1.85 iken, bu değer tamamen bozunmuş örnekler için %16.63'e yükselmektedir. Bu iki parametre ile çok yakından ilişkili olan diğer bir parametre ise P-dalga hızıdır. P-dalga hızı değerleri

ise tamamen bozunmuş örneklerde ortalama 686.29 m/sn'den, taze örneklerde 4139.00 m/sn'ye yükselmektedir. Bu nedenle, yukarıda anılan üç parametre içerisinde bozunmayı en tipik yansıtan değerleri sunan gözeneklilik ve P-dalga hızından birisinin, girdi parametrelerinden biri olarak dikkate alınması düşünülmüştür. Yukarıda belirtilen üç parametre arasında yapılan basit regresyonlar sonucunda, aralarında yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler bulunmuştur. Bu sonuç son derece normal olup, bu üç parametre birbirleriyle fiziksel olarak da yakından ilişkilidir. Bu nedenle, bu grup içerisindeki parametrelerden sadece bir tanesinin girdi parametresi olarak seçilmesine karar verilmiştir. Schmidt çekici jeomühendislik çalışmalarında kullanılan en pratik deneylerden biridir. Ancak bu deney, çoğu kez ileri derecede bozunmuş örneklerde uygulanamamış ve özellikle tamamen bozunmuş örneklerde de sonuç vermemiştir. Benzer sorunla nokta yükleme dayanım indeksi deneyinde de karşılaşmıştır. Bu nedenle pratik özelliklerine rağmen, bu iki deneye ait sonuçların model girdileri olarak kullanılması olanaksız hale gelmiştir. Bu iki parametre yerine, bozunmanın dayanım üzerindeki etkisinin de dikkate alınabilmesi için tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri de diğer bir girdi parametresi olarak seçilmiştir. Taze örneklerde tek eksenli sıkışma dayanımı ortalama 146.82 MPa iken, tamamen bozunmuş örneklerde ise 2.19 MPa olarak belirlenmiştir (Çizelge 1). Bu sonuçlara göre, fiziksel parametrelerden biri ile tek eksenli sıkışma dayanımı bozunmayı karakterize edebilecek girdi parametreleri olarak belirlenmiştir. Oluşturulacak modellerin başka granitlerde de uygulanabilir olması için, analizler öncesinde girdi ve çıktı parametreleri üzerinde aşağıda verilen bir normalleştirme uygulanmıştır.

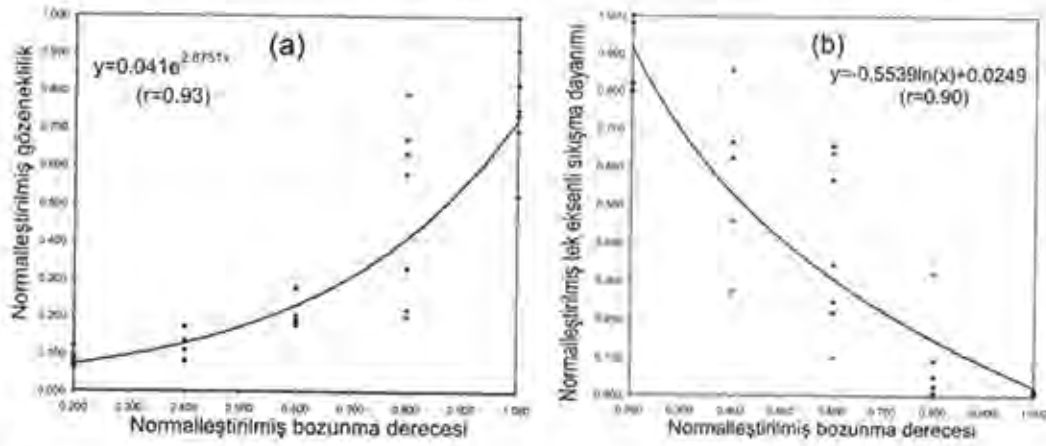
$$X_n = X_i / X_{\max} \quad (1)$$

Burada; X_n normalleştirilmiş değer, X_i ilgili parametrenin ölçülen değeri ve $X_{\max}$ ise ilgili parametre için ölçülmüş en yüksek değerdir. Bu işlemde her bir parametre için kullanılan en yüksek değerler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1'den görüleceği gibi, ortalama girdi parametreleri bozunma derecesine bağlı olarak belirgin değişiklikler göstermektedir. Ancak, değişim aralıkları dikkate alındığında, sınıflar arasındaki geçişlerde önemli çakışmalar oluşmaktadır. Bu nedenle, tek girdili kestirim modelleri oluşturmak, Gupta ve Rao (2001) tarafından da belirtildiği gibi, önemli ölçüde hatalı sonuçlar doğurabilecektir. İndeks özelliklerin bozunma çalışmalarında kullanılabilirliği üzerine olan tartışmalar (örneğin; İrfan ve Dearman, 1978; Hencher ve Martin, 1982; Gupta ve Rao, 2001), tek eksenli sıkışma dayanımının bozunma tanımlamalarında yaygın biçimde kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, tek eksenli sıkışma dayanımının bozunma tanımlamasında tek başına kullanımı, sınıflar arasındaki geçişlerde önemli ölçüde çakışmalar nedeniyle başarısız olabilmektedir (Gupta ve Rao, 2001).

Değerlendirmelerin ilk aşamasında, bozunma derecesi ile girdi olarak seçilen tek eksenli sıkışma dayanımı ve fiziksel parametrelerin girdi olarak kullanıldığı çok değişkenli regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin amacı, hangi fiziksel parametrenin kullanılacağına karar vermektir. Yapılan çok değişkenli regresyon analizlerinde, P-dalga hızı ile birim hacim ağırlık model parametresi olarak anlamlı sonuçlar vermemiştir. Bu nedenle, fiziksel parametreleri temsil etmek üzere gözeneklilik modellerde kullanılacak parametreler olarak dikkate alınmıştır. Bu aşamadan sonra, seçilen bu iki parametrenin bağımsız, bozunma derecesinin de bağımlı değişken olarak kullanıldığı basit regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile bozunma derecesi ara-

sında yüksek korelasyon katsayısına sahip ters-logaritmik bir ilişki elde edilirken, gözeneklilik ile bozunma derecesi arasında ise eksponensiyel bir ilişki bulunmuştur (Şekil 2). Şekil 2’de verilen grafiklerden de görüleceği gibi, ilişkiler güçlü olmasına rağmen, sınıflar arasındaki değerlerde önemli çakışmalar mevcuttur. Bu nedenle, tek bir parametre ile bozunma derecesinin kestirilmesi olanaksız olup, birden fazla girdiyi içeren modellerin oluşturulması gerekmektedir. Bu gerekçe dikkate alınarak, biri dayanımı diğeri de fiziksel özelliği yansıtan, tek eksenli sıkışma dayanımı ile gözenekliliğin bir arada kullanıldığı modeller geliştirilmiştir. Çalışmada Harşit granitoyidinden alınmış 32 adet örnekten elde edilen veriler tüm modellerin geliştirme aşamasında kullanılmıştır. Kontrol verileri ise literatürden (Arel ve Tuğrul, 2001; Gupta ve Rao, 2001) elde edilmiştir (Çizelge 2).



Şekil 2. Basit regresyon analizlerine ilişkin sonuçlar: (a) gözeneklilik-bozunma derecesi, (b) tek eksenli sıkışma dayanımı-bozunma derecesi.

Figure 2. Results of the simple regression analyses: (a) porosity-weathering degree, (b) uniaxial compressive strength-weathering degree.

Çizelge 2. Kontrol için literatürden derlenen veriler.

Table 2. Data collected from literature for checking.

(a) Arel ve Tuğrul (2001)

Parametre	Bozunma derecesi				
	T	AB	ODB	İDB	TB
Gözeneklilik (%)	5.36-5.78 (5.57)	5.60-7.36 (6.48)	6.20-11.56 (8.88)	6.30-14.68 (10.49)	12.14-16.57 (14.36)
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	101.20-151.30 (126.25)	66.60-129.50 (98.05)	14.60-79.40 (47.00)	11.10-21.30 (16.20)	1.20-3.50 (2.35)

(b) Gupta ve Rao (2001)

Parametre	Bozunma derecesi				
	T	AB	ODB	İDB	TB
Gözeneklilik (%)	0.61	2.09	7.89	Yok	24.41
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	132.80	102.70	53.01	Yok	2.54

(T: taze; AB: az bozunmuş; ODB: orta derecede bozunmuş; İDB : ileri derecede bozunmuş; TB: tamamen bozunmuş)

4. ÇOK DEĞİŞKENLİ REGRESYON MODELİ

Çok değişkenli regresyon modellerinin genel amacı bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri tanımlayan bir eşitlik geliştirmektedir. Çok değişkenli regresyon modeli genel olarak aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2)$$

Burada; Y kestirilecek parametre, X bağımsız değişken, β_k ise X_k bağımsız değişkeninin katsayısıdır (Mertler ve Vannatta, 2002).

Eşitlik 2 dikkate alınarak, bozunma derecesinin kestirilmesine yönelik tek eksenli sıkışma dayanımı ile fiziksel parametreleri temsil eden gözenekliliğin girdi olarak kullanıldığı aşağıdaki regresyon eşitliği geliştirilmiştir.

$$WD-n = 0.671 + (0.367 \times \text{Gözeneklilik-n}) - (0.491 \times UCS-n) \quad (3)$$

Burada; WD-n normalleştirilmiş bozunma derecesi, Gözeneklilik-n normalize edilmiş gözeneklilik ve UCS-n ise normalleştirilmiş tek eksenli sıkışma dayanımıdır.

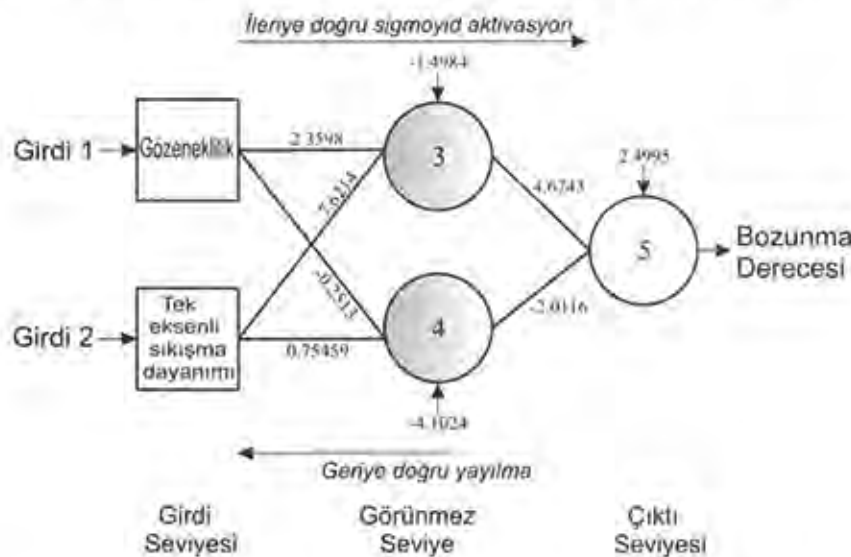
Geliştirilen modelin belirleme katsayısı (R^2) 0.87, düzeltilmiş belirleme katsayısı ise 0.861 olarak tespit edilmiştir. Mendenhall ve Sincich (1995)'e göre, belirleme katsayısı esas alınarak geliştirilen modelin anlamlılığı değerlendirilirken dikkatli davranılması gerekmektedir. Çünkü, belirleme katsayısı model girdilerinin artışına bağlı olarak artış gösterir. Bu nedenle belirleme katsayısı yerine düzeltilmiş belirleme katsayısının kullanılması gerekmektedir (Mendenhall ve Sincich, 1995). Düzeltilmiş determinasyon katsayısı dikkate alınarak yapılan varyans analizi sonucuna göre geliştirilen çok değişkenli regresyon modeli anlamlıdır. Bunun yanı sıra, t-testi sonuçlarına göre, modelde kullanılan her iki bağımsız değişkenin de anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

5. YAPAY SİNİR AĞI MODELİ

Son yıllarda yapay sinir ağı modelleri kaya mekaniği ve mühendislik jeolojisi literatürüne girmeye başlamıştır (örneğin; Meulenkamp ve Alvarez Grima 1999; Zorlu vd., 2006). Bir yapay sinir ağı insan beynine benzer biçimde anlamlandırma temelli bir modeldir (Negnevitsky, 2002). İnsan beyni son derece karmaşık bir yapıya sahip olup, doğrusal olmayan ve paralel bilgi işleme kapasitesine sahiptir. Bir yapay sinir ağı modeli de, insan beyninin daha basit şeklidir. Güncel literatürde çok sayıda yapay sinir ağı modeli veya onların uzantıları şeklinde geliştirilen modelleri bulmak mümkündür (Negnevitsky, 2002; Simpson, 1990; Maren, 1991; Pham, 1994). Ancak bunlar arasında geri beslemeli yapay sinir ağı en yaygın kullanım alanı bulan modeldir (Negnevitsky, 2002). Çünkü bu model çok farklı uygulama alanı için kullanılabilecek niteliktedir (Basheer and Hajmeer 2000). Geri beslemeli yapay sinir ağı modeli dört aşamada geliştirilmekte olup, bunlara ilişkin ayrıntılar Negnevitsky (2002) tarafından verilmektedir.

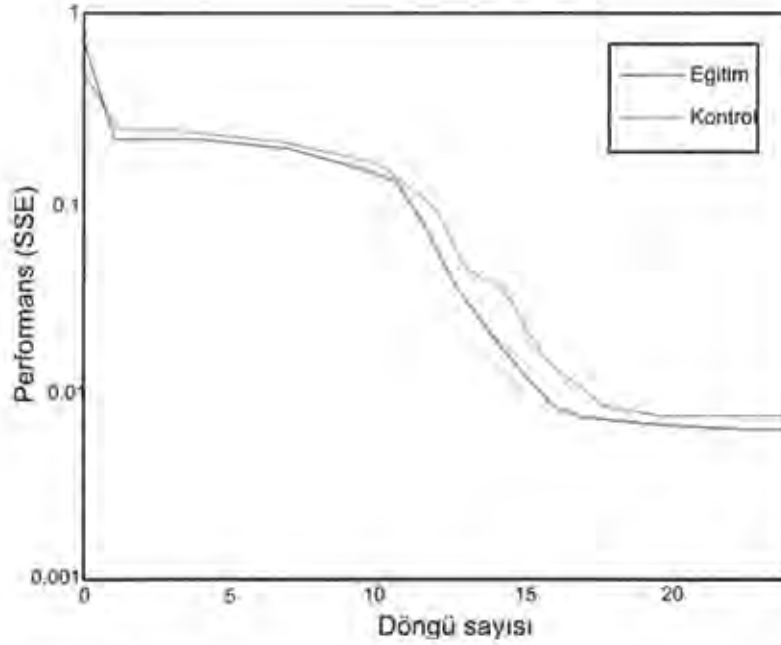
Bir yapay sinir ağı modeli geliştirilirken, tüm veri seti rastgele iki ayrı gruba ayrılır. Bunlardan bir grubu model geliştirmede (model eğitim aşaması), diğer grubu ise geliştirilen modelin kontrolü amacıyla kullanılır. Kontrol verilerinin kullanımının genel amacı, model geliştirme aşamasında kullanılmayan bu veri grubu ile modelin performansını denetlemektir. Model geliştirme ve kontrol

veri gruplarının sayısının ne olacağına ilişkin kesin sınırlar bulunmamasına karşın, bu konuda literatürde önerilmiş bazı yaklaşımlara rastlamak mümkündür (Basheer ve Hajmeer, 2000). Bu öneriler dikkate alındığında, tüm veri grubunun yaklaşık %80'inin model geliştirme aşamasında kullanılmasının yeterli olacağı sonucuna varılmaktadır (Looney, 1996; Nelson ve Illingworth, 1990). Bu çalışmada, gözeneklilik ve tek eksenli sıkışma dayanımının girdi olarak kullanıldığı bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Model geliştirme aşamasında Harşit granitoyidinden elde edilen toplam 32 bloktan elde edilen veriler kullanılmıştır. Diğer taraftan, modelin kontrol aşamasında ise literatürden elde edilen veriler dikkate alınmıştır (Gupta ve Rao, 2001; Arel ve Tuğrul, 2001). Yapay sinir ağı modellerindeki önemli bir aşama da veri normalleştirilmesidir. Normalleştirme terimi, ham verilerin standart bir aralıkta [0,1] yeniden ölçeklendirilmesidir. Bu işlemin yapay sinir ağlarındaki temel amacı, önceliği olan girdilerin aşırı büyük katsayılar almasını engellemek ve böylece modelin olması gerektiğinden önce olgunluğa erişmesini önlemektir (Basheer ve Hajmeer, 2000). Bu nedenle, veriler çok değişkenli istatistiksel modelin geliştirilmesinden önce normalleştirilmiştir. Görünmez seviye sayısı ve düğüm sayısı gibi parametreleri içeren probleme uygun model oluşturulması, yapay sinir ağlarının önemli aşamalarından biridir. Bu amaçla literatürde önerilmiş çeşitli yaklaşımlar mevcuttur (örneğin; Hecht-Nielsen, 1987; Hush, 1989; Ripley, 1993; Paola, 1994; Wang, 1994; Aldrich vd., 1994; Kaastra ve Boyd, 1996; Kanellopoulas ve Wilkinson, 1997). Bu çalışmada, girdi ve çıktı parametreler ile veri sayısı dikkate alınarak model yapısı 2x2x1 olarak seçilmiştir (Şekil 3). Çok seviyeli yapay sinir ağı modellerinde ağırlıklar serbest parametre olarak tanımlanmaktadır (Yeşilnacar ve Topal, 2005). Klimasauskas (1993) ile Messer ve Kittler (1998)'e göre, model geliştirme aşamasında kullanılacak yeterli parametre sayısı, serbest parametre sayısının 5 ila 10 katı kadar olmalıdır. Buna göre modelin yapısı dikkate alındığında, bu çalışmada kullanılan veri sayısının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Yukarıda özetlenen modelin toplam hata değeri (SSE) 0.01 ve toplam tekrarlama sayısı da 100 olarak belirlenmiş ve çalıştırılmıştır. Eğitim aşaması süresince, 20. döngüde SSE değeri 0.008'e kadar düşmüştür. Bunun yanı sıra, kontrol veri seti için de SSE değeri 0.009 olarak elde edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. Çalışmada geliştirilen yapay sinir ağı modelinin yapısı.

Figure 3. Artificial neural network structure developed in the study.



Şekil 4. Yapay sinir ağı modeli için çevrim sayısı-performans grafiği.

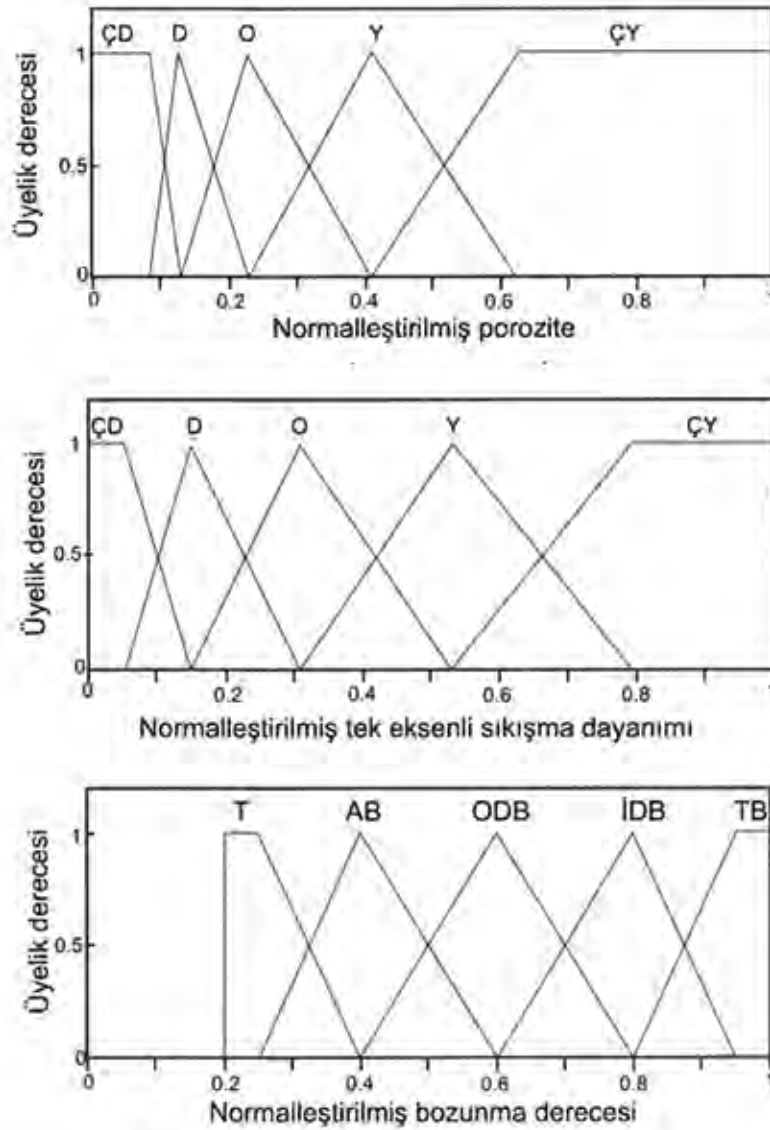
Figure 4. Number of epochs (training cycles) vs. performance for the ANN model.

6. BULANIK ANLAMLANDIRMA MODELİ

Bu çalışmada, bozunma derecesinin kestirimi için geliştirilen son model ise bulanık anlamlandırma modelidir. Bulanık anlamlandırma modeli genel olarak girdi ve çıktılar ile üyelik fonksiyonları ve anlamlandırmayı sağlayan kurallardan oluşmaktadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan Mamdani ve Takagi-Sugeno-Kang bulanık algoritmaları mevcuttur. Bunlardan özellikle Mamdani bulanık algoritması mühendislik jeolojisi çalışmalarında tercih edilmektedir (Alvarez Grima, 2000). Bu algoritma ilk kez Mamdani ve Assilian (1975) tarafından bir buhar makinesinin kontrol edilmesi için geliştirilmiştir. Klasik matematiksel yöntemlerde uzman görüşünün sisteme dahil edilmesi mümkün değildir. Ancak bu tür bulanık algoritmalarda konu ile ilgili uzman görüşü üzerine model geliştirilebildiği gibi, geliştirilen modelin uzman görüşü yardımıyla kullanılabilmesi de olasıdır. Mamdani bulanık algoritmasının mühendislik jeolojisi çalışmalarında yaygın biçimde tercih edilmesinin temel gerekçesi, mühendislik jeolojisindeki malzemenin doğal olması ve yüksek derecede belirsizlik içermesidir. Örneğin, bozunma derecesi tanımlaması yaparken kullanılan “ileri derecede bozunmuş” gibi tanımsal bir kavramı, klasik matematiksel hesaplamalarda kullanmak olanaksızdır. Bu ve buna benzer birçok örnek dikkate alınarak, Mamdani bulanık algoritması çeşitli mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği probleminde kullanılmıştır (Örneğin; Den Hartog vd., 1997; Sönmez vd., 2003; Gökçeoğlu ve Zorlu, 2004; Nefeslioğlu vd., 2006; Tütmez ve Hatipoğlu, 2007).

Mamdani bulanık algoritmasının model oluşturma ve model çalıştırılma ilkelerine ilişkin ayrıntılar Alvarez Grima (2000) tarafından verilmektedir. Bu çalışmada, Mamdani bulanık algoritmasının girdi ve çıktı üyelik fonksiyonları basit regresyonlar dikkate alınarak veri temelli üretilmiştir. Diğer modellerde olduğu gibi, bu modelde de gözeneklilik ve tek eksenli sıkışma dayanımı girdi,

bozunma derecesi ise çıktı parametresi olarak dikkate alınmıştır. Çıktı parametresi olan bozunma “taze (T)”, “az bozunmuş (AB)”, “orta derecede bozunmuş (ODB)”, “ileri derecede bozunmuş (İDB)” ve “tamamen bozunmuş (TB)” olmak üzere beş farklı bulanık küme ile tanımlanmış ve üçgen ile trapezoid üyelik fonksiyonları üretilmiştir. Üyelik fonksiyonları %50 bindirmeli olacak şekilde seçilmiş ve sınır geçişlerindeki belirsizlik en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Bu bozunma derecelerine karşılık gelen gözeneklilik ve tek eksenli sıkışma dayanımı için ayrı ayrı “çok düşük (ÇD)”, “düşük (D)”, “orta (O)”, “yüksek (Y)” ve “çok yüksek (ÇY)” olmak üzere beşer adet bulanık kümeden oluşan üçgen ve trapezoid üyelik fonksiyonları veri temelli oluşturulmuştur. Sonuç olarak, modelde 10 adet girdi ve 5 adet çıktı olmak üzere toplam 15 adet bulanık kümeden oluşan üyelik fonksiyonu elde edilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi Şekil 5’te, matematiksel gösterimi ise aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5. Bulanık anlamlandırma sisteminde kullanılan girdi ve çıktı bulanık kümeleri (ÇD: çok düşük; D: düşük; O: orta; Y: yüksek; ÇY: çok yüksek).

Figure 5. Input and output fuzzy sets used in the fuzzy inference system (ÇD: very low; D: low; O: moderate; Y: high; ÇY: very high).

“Gözeneklilik” girdi değişkeninin bulanık kümeleri:

$$\text{ÇD} = \{0/0, 1/0, 1/0.084, 0/0.129\}$$

$$\text{D} = \{0/0.084, 1/0.129, 0/0.229\}$$

$$\text{O} = \{0/0.129, 1/0.229, 0/0.41\}$$

$$\text{Y} = \{0/0.229, 1/0.41, 0/0.624\}$$

$$\text{ÇY} = \{0/0.41, 1/0.624, 1/1, 0/1\}$$

“Tek eksenli sıkışma dayanımı” girdi değişkeninin bulanık kümeleri:

$$\text{ÇD} = \{0/0, 1/0, 1/0.053, 0/0.148\}$$

$$\text{D} = \{0/0.053, 1/0.148, 0/0.308\}$$

$$\text{O} = \{0/0.148, 1/0.308, 0/0.532\}$$

$$\text{Y} = \{0/0.308, 1/0.532, 0/0.793\}$$

$$\text{ÇY} = \{0/0.532, 1/0.793, 1/1, 0/1\}$$

“Bozunma derecesi” çıktı değişkeninin bulanık kümeleri:

$$\text{T} = \{0/0.2, 1/0.2, 1/0.25, 0/0.4\}$$

$$\text{AB} = \{0/0.25, 1/0.4, 0/0.6\}$$

$$\text{ODB} = \{0/0.4, 1/0.6, 0/0.8\}$$

$$\text{IDB} = \{0/0.6, 1/0.8, 0/0.95\}$$

$$\text{TB} = \{0/0.8, 1/0.95, 1/1, 0/1\}$$

Yukarıda verilen üyelik fonksiyonlarının çeşitli kombinasyonları ve Harşit granitoidinden elde edilen veriler dikkate alınarak toplam 16 adet “eğer-ise” sözel kurallar oluşturulmuştur (Çizelge 3). Bozunma derecesi için sonuç bulanık kümesinin elde edilebilmesi için bulanık işlemcilerden “max” kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, durulaştırma işlemi içinde ağırlık merkezi yöntemi dikkate alınmıştır. Hazırlanan bu algoritma hem model oluşturma aşamasında, hem de kontrol aşamasında kullanılan veriler için ayrı ayrı çalıştırılmıştır.

Çizelge 3. Bulanık model için üretilen bulanık “eğer-ise” kuralları.

Table 3. Fuzzy “if-then” rules for the fuzzy model.

Kural No.	Önütıl		Sonuç
1	Eğer Gözeneklilik ÇD ve UCS ÇY	ise	BD T
2	Eğer Gözeneklilik ÇD ve UCS H	ise	BD AB
3	Eğer Gözeneklilik D ve UCS ÇY	ise	BD T
4	Eğer Gözeneklilik D ve UCS Y	ise	BD AB
5	Eğer Gözeneklilik D ve UCS O	ise	BD ODB
6	Eğer Gözeneklilik O ve UCS ÇY	ise	BD AB
7	Eğer Gözeneklilik O ve UCS Y	ise	BD AB
8	Eğer Gözeneklilik O ve UCS O	ise	BD ODB
9	Eğer Gözeneklilik O ve UCS D	ise	BD ODB
10	Eğer Gözeneklilik O ve UCS ÇD	ise	BD İDB
11	Eğer Gözeneklilik Y ve UCS O	ise	BD ODB
12	Eğer Gözeneklilik Y ve UCS D	ise	BD ODB
13	Eğer Gözeneklilik Y ve UCS ÇD	ise	BD İDB
14	Eğer Gözeneklilik ÇY ve UCS O	ise	BD İDB
15	Eğer Gözeneklilik ÇY ve UCS D	ise	BD TB
16	Eğer Gözeneklilik ÇY ve UCS ÇD	ise	BD TB

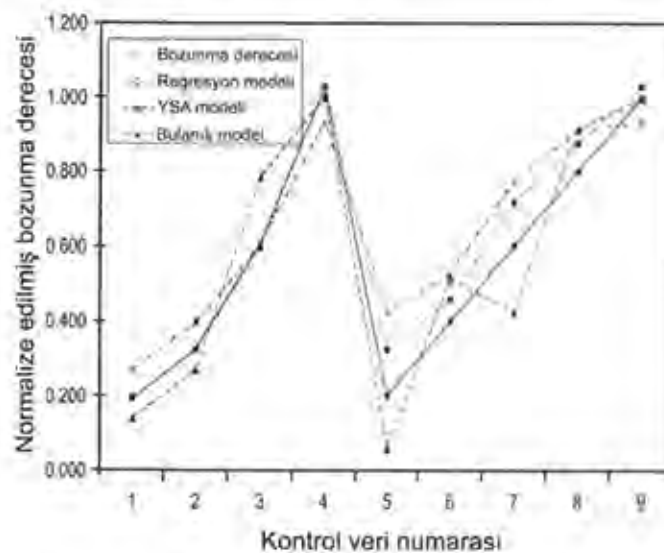
7. MODELLERİN KESTİRİM PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bir kestirim modelinin performans değerlendirmesi bu tür çalışmalar için önemli aşamalardan biridir. Bu amaçla, çapraz kontrollerin korelasyon katsayısı (r), variance account for (VAF) ve karekök ortalama hata (RMSE) gibi üç ayrı performans indeksi hem model geliştirme hem de kontrol verileri için ayrı ayrı dikkate alınmıştır (Çizelge 4). Model geliştirme verilerinden elde edilecek yüksek performans modelin öğrenme kapasitesini ortaya koyarken, kontrol verilerinden yüksek performans elde edilmesi modelin genelleme yapabilme yeteneğine işaret etmektedir. Buna göre; geliştirilen modeller arasında model geliştirme verileri dikkate alındığında bulanık algoritma en iyi sonucu verirken, kontrol verileri dikkate alındığında ise çok değişkenli regresyon modeli en iyi performansı seğılemiştir (Çizelge 4). Kontrol verilerinin literatürden sağlanmış olması, geliştirilen kestirim modellerinin granitik kayalar için kullanılabilecek nitelikte olduğuna işaret etmektedir (Şekil 6). Ancak, modellerin en önemli sınırlaması uygulamada kullanılırken, “taze”den tamamen “bozunmuş”a kadar tüm sınıflardan oluşan veri setine gereksinim duyulmasıdır. Bu durumda ise, uzman görüşünü temel alabilecek nitelikte olan bulanık algoritma kullanılabilir. Ayrıca tüm sınıflardan sayısal veri olması durumunda, her üç model de kullanılarak çapraz karşılaştırma yapılabilir.

Çizelge 4. Kestirim modellerinin model geliştirme ve kontrol veri setleri için hesaplanmış kestirim performans indeksleri (r , VAF, RMSE).

Table 4. Prediction performance indices (r , VAF, RMSE) of prediction models calculated for both training and checking data sets.

Kestirim yöntemi	Model geliştirme veri seti			Kontrol veri seti		
	r	RMSE	VAF	r	RMSE	VAF
Çok değişkenli regresyon	0.93	0.10	87.00	0.98	0.07	95.70
Yapay sinir ağı	0.96	0.08	92.10	0.95	0.12	82.60
Bulanık algoritma	0.96	0.08	92.20	0.95	0.11	88.60



Şekil 6. Kontrol verileri için belirlenen ve tahmin edilen bozunma dereceleri.

Figure 6. Determined and predicted weathering degrees for checking data.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, veri kaynağı olarak Doğankent (Giresun) ve Kürtün (Gümüşhane) arasında yüzlekler veren Harşit granitoyidi seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, bozunma derecesine bağlı olarak, ortalama birim hacim ağırlık, gözeneklilik, P-dalga hızı ile tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinde önemli değişiklikler tespit edilmiştir. Bozunma derecesinin tayininde kullanılabilecek nitelikte uygulanabilir ve güvenilir kestirim modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yapılan basit regresyonlar sonucunda, bağımsız değişkenlerin değişim aralıklarının önemli ölçüde çıkışma yapması nedeniyle, tek bir parametreden yola çıkılarak bozunma derecesinin kestirilmesinin hatalı olacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, birden fazla parametrenin girdi olarak kullanıldığı modeller geliştirilmiştir. Girdi parametrelerinin seçiminde, parametrelerin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri temsil edebilecek nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. Bu amaçla fiziksel özellikleri temsil edebilmek için gözeneklilikteki değişim, mekanik özellikleri temsil edebilmek için de tek eksenli sıkışma dayanımı girdi parametreleri olarak seçilmiştir. Seçilen bu girdi parametreleri kullanılarak, bozunma derecesinin tayini için çok değişkenli regresyon, yapay sinir ağı ve bulanık algoritma modelleri geliştirilmiştir.

Geliştirilen modellerin kestirim performansları yüksek, ancak birbirlerine son derece yakındır. Bunun temel gerekçesi, girdi değişkenleri arasında tek eksenli sıkışma dayanımının bulunmasıdır. Çünkü tek eksenli sıkışma dayanımı, kayada bozunmaya bağlı değişimi son derece duyarlı biçimde yansıtabilmektedir. Geliştirilen modeller arasında, model geliştirme verileri dikkate alındığında, bulanık algoritma en iyi sonucu verirken, kontrol verileri dikkate alındığında ise çok değişkenli regresyon modeli en iyi performansı göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan kontrol verileri literatürden sağlanmıştır. Bu husus dikkate alındığında, çalışma kapsamında Harşit granitoyidinden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan kestirim modellerinin granitik kayalar için kullanılabilecek nitelikte olduğu yorumu yapılabilir.

Çalışmada geliştirilen modellerin uygulama açısından en önemli sınırlaması, "taze"den "tamamen bozunmuş"a kadar tüm sınıflardan oluşan veri setini gerektirmesidir. Bu sınırlama ancak, uzman görüşünü temel alabilecek nitelikte olan bulanık algoritma kullanılmasıyla giderilebilir. Buna karşın, tüm bozunma sınıflarına ait sayısal veri olması durumunda ise, her üç model de kullanılarak çapraz karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Aldrich, C., Reuter, M.A., and Deventer, J.S.J., 1994. The application of neural nets in the metallurgical industry. *Minerals Engineering*, 7, 793-809.
- Alvarez Grima, M., 2000. *Neuro-Fuzzy Modeling in Engineering Geology*. A.A. Balkema, Rotterdam, 244 p.
- Anon, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes: Geological Society Engineering Group Working Party Report. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 207-242.

- Arel, E., and Tuğrul, A., 2001. Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in Northwestern Turkey. *Bulletin of International Association of Engineering Geology and the Environment*, 60, 123-133.
- Arıkan, F., Ulusay, R., and Aydın, N., 2007. Characterization of weathering acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. *Bulletin of International Association of Engineering Geology and the Environment*, 66, 415-430.
- Basheer, I. A., and Hajmeer, M., 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43, 3-31.
- Boztuğ, D., Debon, F., İnan, S., Tutkun, S.Z., Avcı, N. and Kesgin, O., 1997. Comparative geochemistry of four plutons from the Cretaceous-Palaogene Central Eastern Anatolian alkaline province. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 6, 95-115.
- Cole, W.F., and Sandy, M.J., 1980. A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability. *Australian Road Research*, 10 (3), 27-3.
- Den Hartog, M.H., Babuska, R., Deketh, H.J.R., Alvarez Grima, M., Verhoef, P.N.W., and Verbruggen, H.B., 1997. Knowledge-based fuzzy model for performance prediction of a rock-cutting trencher. *International Journal of Approximate Reasoning*, 16, 43-66.
- Gökçeoğlu, C., and Aksoy, H., 2000. New approaches for the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. *Engineering Geology*, 58 (1), 1-23.
- Gökçeoğlu, C., and Zorlu, K., 2004. A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of a problematic rock. *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 17, 61-72.
- Guolin, R., and Yushan, L., 1990. Engineering geological zonation of Xiamen granitic weathered crust and bearing capacity of residual soil. *Proceedings of the 6th International IAEG Congress, Balkema Rotterdam*, 1989-1996.
- Gupta, A.S., and Rao, K.S., 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 201-221.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Karadeniz Bölgesinin 1/250000 ölçekli jeolojik ve metallojenik haritası. MTA Raporu (yayımlanmamış).
- Hecht-Nielsen, R., 1987. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *Proceedings of the first IEEE international conference on neural networks*, San Diego CA, USA, 11-4.
- Hencher, S.R., and Martin, R.P., 1982. The description and and classification of weathered rocks in Hong Kong for engineering purposes. *Proceedings of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conference*, 125-142.
- Hush, D.R., 1989. Classification with neural networks: a performance analysis. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Engineering*, Dayton, Ohio, USA, 277-280.

- Iliev, I.G., 1967. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. Proceedings of the 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, 109-114.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring. E T Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 p.
- İrfan, T.Y., and Dearman, W. R., 1978. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. Quarterly Journal of Engineering Geology, 11, 233-244.
- İrfan, T.Y., and Powell, G. E., 1985. Engineering geological investigations for foundations on a deeply weathered granitic rock in Hong Kong. Bulletin of International Association of Engineering Geology, 32, 67-80.
- Kaastra, I., and Boyd, M., 1996. Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. Neurocomputing, 10(3), 215-236.
- Kanellopoulas, I., and Wilkinson, G.G., 1997. Strategies and best practice for neural network image classification. International Journal of Remote Sensing, 18, 711-725.
- Kılıç, R., 1995. Geomechanical properties of the ophiolites (Cankiri, Turkey) and alteration degree of diabase. Bulletin of International Association of Engineering Geology, 51, 63-69.
- Klimasauskas, C.C., 1993. Applying neural networks. In: R.R. Trippi, E. Turban (eds.), Neural Networks in Finance and Investigating, Cambridge, Probus, 313-319.
- Lan, H.X., Hu, R.L., Yue, Z.Q., Lee, C.F., and Wang, S.J., 2003. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China. Journal of Asian Earth Science, 21, 353-364.
- Lee, S. G., 1987. Weathering and geotechnical characterization of Korean granites. PhD Thesis, Imperial College, University of London.
- Looney, C. G., 1996. Advances in feed-forward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes. IEEE Trans Knowledge Data Eng. 8(2), 211-226.
- Lump, P., 1962. The properties of decomposed granite. Geotechnique, 12, 226-243.
- Malomo, S., 1980. Abrasive pH of Feldspars as an Engineering Index for Weathered Granite. Bulletin of International Association of Engineering Geology and the Environment, 22, 207-211.
- Mamdani, E.H., and Assilian, S., 1975. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1-13.
- Maren, A.J., 1991. A logical topology of neural networks. In: Proceedings of the Second Workshop on Neural Networks, WNN-AIND, 91.
- Mendenhall, W., and Sincich, T., 1995. Statistics for Engineering and the Sciences. 4th Edition, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 586 p.

- Mendes, F. M., Aires-Barros, L., and Rodrigues, F. P., 1967. The use of modal analysis in the mechanical characterization of Rock Masses. *Proceedings of the 1st International Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, Vol.1, 217-233.
- Mertler, C.A., and Vannatta, R.A., 2002. *Advanced and Multivariate Statistical Methods: Practical Application and Interpretation*. Second Edition, Pyrczak Publishing, Los Angeles, 347 p.
- Messer, K., and Kittler, J., 1998. Choosing an optimal neural network size to aid search through a large image database. *Proceedings of the 9th British Machine Vision Conference (BMVC98)*, University of Southampton, UK, pp. 235-244.
- Meulenkamp, F., and Alvarez Grima, M., 1999. Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (1), 29-39.
- Nefeslioğlu, H.A., Gökçeoğlu, C., and Sönmez, H., 2006. Indirect determination of weighted joint density (wJd) by empirical and fuzzy models: Süpren (Eskişehir, Turkey) marbles. *Engineering Geology*, 85, 251-269.
- Negnevitsky, M., 2002. *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Addison-Wesley, UK, 394 p.
- Nelson, M., and Illingworth, W.T., 1990. *A Practical Guide to Neural Nets*. Reading MA. Addison-Wesley, UK, 352 p.
- Onodera, T.F.N., Yoshinaka, R., and Oda, M., 1974. Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Proceedings of the 3rd Congress of International Society of Rock Mechanics*, Denver, Vol. 2, 71-78.
- Paola, J.D., 1994. *Neural network classification of multispectral imagery*. MSc Thesis, The University of Arizona, USA.
- Pham, D.T., 1994. Neural networks in engineering. In: G.P. Rzevski, R.A. Adey, D.W. Russell (eds.), *Applications of Artificial Intelligence in Engineering IX, AIENG/ 94*, *Proceedings of the 9th International Conference*, Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 3-36.
- Raj, J.K., 1985. Characterization of weathering profile developed over a porphyritic biotite granite in Peninsula Malaysia. *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, 23, 121-130.
- Ripley, B.D., 1993. Statistical aspects of neural networks. In: O.E. Barndorff-Neilsen, J.L. Jensen, W.S. Kendall (eds.), *Networks and Chaos-statistical and Probabilistic Aspects*, Chapman & Hall, London, pp. 40-123.
- Simpson, P.K., 1990. *Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, Applications, and Implementations*. Pergamon Press, New York.
- Sousa, L.M.O., Suarez del Rio, L.M., Lope Calleja, L., Vicente, G., Ruiz e Argandofia, 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.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., and Ulusay, R., 2003. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(3), 251-269.
- Tuğrul, A., 1995. Niksar yöresindeki bazaltların mühendislik özelliklerine ayrışmanın etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi (yayımlanmamış).
- Tütmez, B., and Hatipoğlu, Z., 2007. Spatial estimation model of porosity. *Computers and Geosciences*, 33, 465-474.
- Wang, C., 1994. A theory of generalization in learning machines with neural application. PhD Thesis, the University of Pennsylvania, USA.
- Weinert, H.H., 1968. Engineering petrology for roads in South Africa. *Engineering Geology*, 2, 363-395.
- Yeşilnacar, E., and Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: an comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79, 251-266.
- Zorlu, K., Gökçeoğlu, C., Ocakoğlu, F., Nefeslioğlu, H.A., and Açıkalın, S., 2008. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology* (baskıda).

ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ KULLANILARAK AKİFER KIRLENEBİLİRLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Assessment of Aquifer Vulnerability Using Analytic Hierarchy Process

¹Celalettin ŞİMŞEK, ²Nesrin BARIŞ

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksek Okulu, Sondajcılık Bölümü, Torbalı, İZMİR

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İZMİR

ÖZ

Akifer kirlenebilirliği, genel anlamda, yüzeysel kirleticilerden kolay etkilenen alanlar olarak bilinmektedir. Akiferin tipi, litolojisi ve bulundurduğu yeraltısuyu derinliği kirlenebilirliği etkileyen en önemli parametreleri oluşturur. Kirlenebilirlik indeks teknikleri arasında en uygulanabilir kirlenebilirlik yöntemi olan GOD modeli; akifer tipi (G), litoloji (O), yeraltısuyu derinliği (D) olmak üzere, üç hidrojeolojik parametreden oluşur. 0.1 den 1,0'e kadar değişik katsayıların çarpılması ile elde edilen indeks değerine göre beş kirlenebilirlik sınıflaması yapılabilmektedir. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), karar verme sürecindeki nitel ve nicel faktörleri birleştirme olanağını sağlayan güçlü ve kolay anlaşılır bir yöntem-bilimdir. Bu çalışmada, AHS kullanılarak, GOD kirlenebilirlik indeksi parametreleri için ağırlık katsayıları geliştirilmiş ve üç hidrojeolojik parametre için alternatif aralıklar oluşturulmuştur. Bu amaçla, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)'nde GOD-AHS kirlenebilirlik modeli kullanılarak Türkiye'nin batısında yer alan Küçük Menderes Havzası akifer sisteminin kirlenebilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), GOD kirlenebilirlik indeksi

ABSTRACT

It is generally known that the aquifer vulnerability is sensible to contamination from surface contaminant. The aquifer type, aquifer lithology and depth to groundwater table are very important hydrogeological parameters to effects the aquifer vulnerability to pollution. The GOD model is very useful vulnerability technique among the other technique, which include mode of three following hydrogeological parameters: Groundwater Occurrence, Overlying Lithology and Depth to Groundwater table. Each hydrogeological parameter weight range from 0.1 to 1.0 and total GOD index value is calculated, multiplying by the weight of three hydrogeological parameters. According to vulnerability index value, the aquifer vulnerability can be divided into five vulnerability classes. Analytic Hierarchy Process (AHP) is a methodology that presents a flexible, easily understood way to assist the decision-maker in quantities and quantitative formulating problem. In this study, AHP is used to get the weight and the ranks of the GOD vulnerability criteria and alternatives. The GIS integrated GOD-AHP model is used to determine the surfacial aquifer vulnerability of Küçük Menderes Hydrogeological basin which is located western Turkey.

Key Words: Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographical Information System (GIS), GOD vulnerability index

1. GİRİŞ

Yerleşim ve sanayi alanlarının akifer sistemleri üzerine plansız konuşlandırılması, tarım alanlarını hızla yok etmesinin yanı sıra, su havzalarını ve su kaynaklarını da tehdit etmektedir. Akifer havzalarındaki bilinçsiz tarımsal faaliyetler, aşırı yeraltısuyu çekimi, evsel ve sanayi atıklarının depolanmasından kaynaklanan kirleticiler başlıca tehdit unsurlarını oluşturur. Bu nedenle sorunun çözümü, başta kirliliğin önlenmesinde görülmektedir. Kirlenebilirlik haritaları bu açıdan arazi kullanımının planlanmasında büyük fayda sağlamaktadır. Günümüzde yeraltısularının kirliliğe karşı duyarlılık alanları değişik yöntem ve tekniklerle değerlendirilmektedir. Bunların başında; DRASTIC (Allert vd., 1987), SINTACS (Civita, 1994), DUPIT (Şimşek vd., 2006) ve GOD (Foster, 1987) indeks teknikleri gelmektedir. Bu tekniklerin ortak özellikleri, ele alınan değişik hidrojeolojik parametrelere önem sırasına göre ağırlık katsayıları atanarak, doğrusal bir bağıntıdan elde edilen indeks aralığına göre, akiferin veya yeraltısuyunun kirlenebilirliğinin sınıflandırılabilmesidir. Yukarıda belirtilen kirlenebilirlik tekniklerine göre daha kolay olan GOD ise, sadece üç önemli hidrojeolojik parametreyi içerir. Bunlar, G: yeraltısuyu akiferi, O: üst tabaka litolojisi ve D: yeraltısuyu derinliğidir. Son yıllarda aşırı çekimden kaynaklanan yeraltısuyu seviyesindeki düşüşler, DRASTIC gibi çoklu hidrojeolojik parametreyi içeren tekniklerin uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Su seviyesindeki düşüş beraberinde doymamış bölgedeki birimlerin litolojik karmaşıklığını ve hidrolik iletkenliğin belirlenmesindeki güçlükleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, yeraltısuyunun derin olduğu bölgelerde GOD kirlenebilirlik modeli daha kullanılabilir bir yöntem olmaktadır.

Diğer taraftan, ele alınan kirlenebilirlik indeks tekniklerinin genel özelliklerinden biri de ele alınan ağırlık katsayılarının 1 ile 10 arasında değişen rakamlarla ifade edilmesidir. Bu bağlamda, hidrojeolojik parametre katsayı ağırlıklarının daha anlamlı hale gelmesi için son yıllarda bilimsel çalışmalarda sıkça kullanılmaya başlanan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), kirlenebilirlik yöntemlerine uyarlanarak daha anlamlı kirlenebilirlik tekniklerinin geliştirilmesine çaba sarf edilmektedir (Thrillumalaviasan vd., 2003). Kirlenebilirlik indeks tekniklerinin AHS ile uyarlanması sonucu ele alınan hidrojeolojik parametrelerin birbirleri ile göreceli matrisler oluşturularak karşılaştırılmasıyla elde edilen katsayılardan daha anlaşılır sonuçların elde edilmesi beklenmektedir. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak, GOD kirlenebilirlik indeks tekniği AHS ile uyarlanarak, Türkiye'nin batısında yer alan ve en büyük su havzalarından biri olan Kucuk Menderes havzasına uygulanmıştır.

2. ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ

AHS, Saaty (1980) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. AHS'nin en önemli özelliği, karar vericinin hem objektif hem de öznel görüşlerini karar sürecine ekleyebilmesinde yatar. Bu sayede ele alınan farklı problemler birbirleriyle karşılaştırılarak gruplara ve alt gruplara ayrılabilir ve alternatif çözüm önerileri sunulabilir. Bunun için AHS'de ele alınan karşılaştırma matrislerinde her parametreye için Çizelge 1'de sunulan karşılaştırma ölçütleri kullanılarak hiyerarşi oluşturulur. Hiyerarşinin belirlenen düzeyi (n) eleman içeriyorsa, toplam $n(n-1)/2$ adet ikili karşılaştırma yapılmalıdır. İkili karşılaştırma yargılarının tutarlılığını ölçmek için tutarlılık oranı kullanılmaktadır (Saaty, 1980).

Bu oran için Saaty tarafından önerilen üst limit 0.10'dur. Tutarlılık oranı 0.10'un altında ise seçimlerin yeterli bir tutarlılık gösterdiği, tutarlılık oranı 0.10'un üstünde ise yargıların tutarsız olduğu kabul edilir ve seçim kalitesinin iyileştirilmesi gereklidir. Ele alınan karşılaştırmaları kolaylıkla gerçekleştirmek için Expert Choice (EC) programı geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Expert Choice Tutorials, 2000). Bu çalışmada, EC programı kullanılarak katsayılar elde edilmiştir. Bu program ile ikili karşılaştırma matrisleri kolaylıkla yapılmakta ve tutarlılık oranı 0.10'un altı değerler elde edilinceye kadar farklı karşılaştırmalar yapılabilmektedir. Özellikle, çoklu parametrelili karşılaştırmalarda farklı senaryo ve olasılıkları görme olanağı sağlamaktadır.

Çizelge 1. AHS değerlendirme ölçeği (Saaty, 1980).

Table 1. AHP assessment scale (Saaty, 1980).

Sayısal değer	Tanım
1	Öğeler eşit önemde veya aralarında kayıtsız kalınıyor
3	1.öğe 2.ye göre biraz daha önemli veya biraz daha tercih ediliyor
5	1.öğe 2.ye göre fazla önemli veya fazla tercih ediliyor
7	1.öğe 2.ye göre çok fazla önemli veya çok fazla tercih ediliyor
9	1.öğe 2.ye göre aşırı derecede önemli veya aşırı derecede tercih ediliyor
2, 4, 6, 8	Ara değerler

3. MALZEME VE YÖNTEM

GOD kirlenebilirlik indeks tekniğinde yeraltısuyunun kirlenebilirliği için önem taşıyan üç parametre yer almaktadır (Şekil 1). Bunlardan birincisi akiferin kirlenebilirliğini etkileyen akiferin yapısal özellikleridir. Bu yapı GOD modelde genel olarak serbest akifer, yarı serbest akifer, basınçlı akifer, yarı basınçlı akifer ve akan akifer olarak sınıflandırılmıştır. Serbest akiferler ve yarı serbest akiferler, yüzeysel kirleticilerin akifer ortamına geçmesini engelleyecek geçirimsiz düzeylerin olmaması nedeniyle, kirlenebilirlikleri yarı basınçlı ve basınçlı akiferlere göre daha yüksektir. Bu değerlendirme çerçevesinde yapılan karşılaştırma sonucu elde edilen ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 2'de verilmiştir. Diğer bir önemli parametre ise, akifer litolojisidir. Akifer litolojisi yeraltısuyunun depolanması kontrol eder. Bu anlamda çatlaklı kayalar ve gözenekli geçirimli birimler akifer özelliği taşıyan birimleri oluşturur. Çatlaklı kayalar yüzeysel kirleticilerden hızlı etkilenmekte ve kirleticili konsantrasyonu akifer ortamına hızlı taşınmaktadır. Diğer taraftan, pekleşmemiş iri taneli malzemeler ise gözenekli akifer malzemesini oluşturur. Genel olarak düşük kotlu düz alanlara taşınan malzemeler, dağ kıyı şeridinde oldukça iri olmalarına karşın deniz ve delta alanlarda oldukça ince malzemeler görülür (Şen, 1980). Kilaşı, şeyl ve şist gibi kayalar ile kil ve silt gibi ince taneli zeminler akiferin kirlenebilirliğini önleyen geçirimsiz zonları oluşturur ve ayrıca yeraltısuyu açısından oldukça zayıftırlar. GOD modelde ele alınan diğer bir parametre ise, yeraltısuyu derinliği olup, su tablasının yüzeyden derinliği olarak tanımlanır. Su tablasının yüzeye yakın olması yüzeydeki kirleticilerden hızlı etkilenmesine neden olur. Bu nedenle yeraltısuyu derinliği kirlenme potansiyelini etkiler.

şılaştırmadan elde edilen ağırlıklar ise G_{Ri} , O_{Ri} ve D_{Ri} olarak ele alınmıştır (Çizelge 2, 3, 4 ve 5). Elde edilen ağırlık katsayılarına göre Eşitlik 1 kullanılarak doğrusal bir kombinasyon oluşturulmuştur. Bu lineer kombinasyona göre dört farklı kirlenme sınıfı belirlenmiş ve Çizelge 6'da gösterilmiştir.

$$GOD - AHS_{indeks} = G_{Ri} * G_{Ri} + O_{Ri} * O_{Ri} + D_{Ri} * D_{Ri} \quad (1)$$

Çizelge 3. Akifer litolojisi için ikili karşılaştırmalar matrisi (Tutarlılık oranı:0.04).

Table 3. Pairwise comparison matrix for aquifer lithology (Inconsistency ratio: 0.01).

	Çakıl	Kum	Silt	Kil	Konsolide olmuş sedimanlar	Çatlaklı kaya	O_{Ri}
Çakıl	1.0	2.0	4.0	9.0	5.0	1/4	0.247
Kum	1/2	1.0	3.0	4.0	4.0	1/2	0.169
Silt	1/4	1/3	1.0	2.0	2.0	1/5	0.071
Kil	1/9	1/4	1/2	1.0	1.0	1/9	0.038
Konsolide olmuş sedimanlar	1/5	1/4	1/2	1.0	1.0	1/5	0.047
Çatlaklı kaya	4.0	2.0	5.0	9.0	5.0	1.0	0.428

Çizelge 4. Yeraltısuyu derinliği için ikili karşılaştırmalar matrisi (Tutarlılık oranı: 0.01).

Table 4. Pairwise comparison matrix for groundwater depth (Inconsistency ratio: 0.01).

	<5 m	5-10 m	10-20 m	20-50 m	>50 m	D_{Ri}
<5 m	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	0.425
5-10 m	1/2	1.0	2.0	3.0	5.0	0.269
10-20 m	1/3	1/2	1.0	2.0	3.0	0.156
20-50 m	1/4	1/3	1/2	1.0	2.0	0.095
>50 m	1/6	1/5	1/3	1/2	1.0	0.055

Çizelge 5. GOD modelinin ikili karşılaştırmaları (Tutarlılık Oranı:0.01).

Table 5. Pairwise comparison for GOD model (Inconsistency ratio: 0.01).

	G	O	D	Gwi
G	1.0	3.0	4.0	0.174
O	1/3	1.0	1.0	0.192
D	1/4	1.0	1.0	0.634

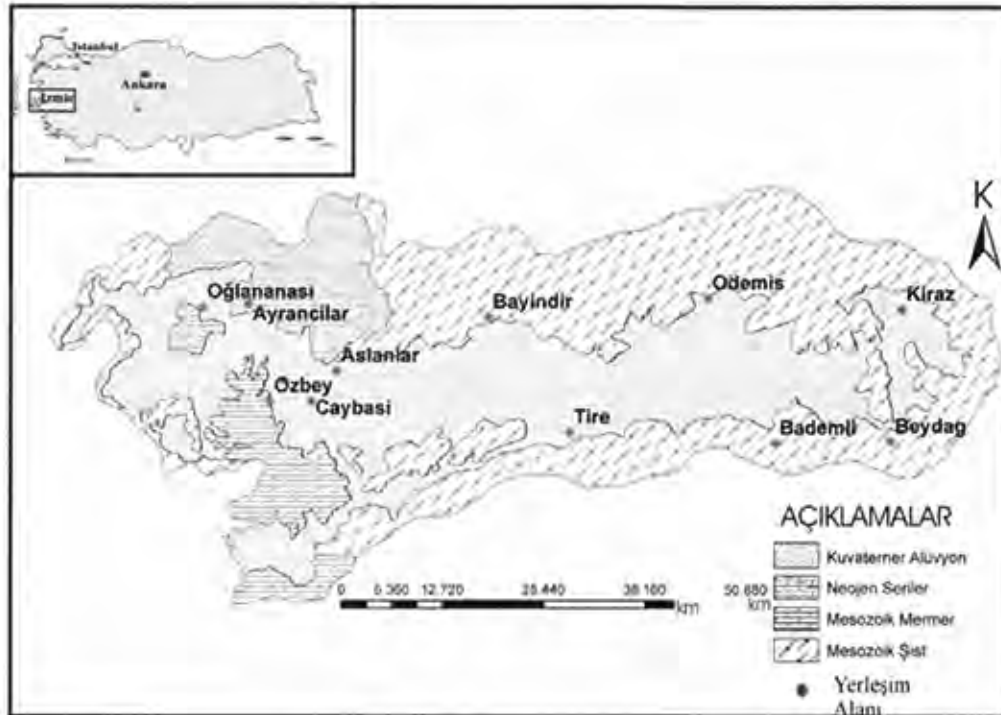
Çizelge 6. AHS-GOD kirlenebilirlik indeksi.

Table 6. AHS-GOD vulnerability index.

GOD-AHS indeksi	Kirlenebilirlik değerlendirilmesi
<0.1	Düşük
0.1-0.2	Orta
0.2-0.3	Yüksek
>0.3	Çok Yüksek

4. ÇALIŞMA ALANININ TANITIMI

Çalışma alanı, Türkiye'nin batısında, İzmir ilinin güneyinde yer almaktadır (Şekil 2) ve genel doğrultusu D-B yönlü bir çöküntü alanı şeklinde şekillenmiştir. Çöküntü alanını dolduran alüvyon dolgu üzerindeki Küçük Menderes Nehri, Kiraz sırtlarından doğar ve 125 km yol katederek Selçuk ilçesi sınırları içerisinde denize dökülür. Havzanın kuzey, güney ve batı kesimleri yüksek dağlarla çevrilidir. Dağlar genelde maki ve çam ormanları ile kaplıdır. Topoğrafyanın ani yükselmesi nedeniyle, dağ alanları yerleşim ve tarım alanı olarak kullanılamamaktadır. Yüzeysel dereler ise, genelde kuzey ve güney yönlü uzanmakta ve büyük bir çoğunluğu Küçük Menderes Nehri'ne birleşmektedir. Küçük Menderes Havzası'nda tipik Akdeniz iklimi hüküm sürmektedir. Yıl bazında en fazla yağış alan kesim doğu kesimleri oluşturan Kiraz ve Bozdağ ilçelerinin bulunduğu yüksek kesimlerdir. 2000 nüfus sayısına göre havza içerisinde yer alan 8 büyük yerleşim ilçe ve köyleriyle birlikte yaklaşık 500.000 kişi yaşamaktadır. Havza sınırı alanı yaklaşık 3.502 km² lik bir yüzey ölçümüne sahiptir. Ancak bu alanın yoğun olarak kullanıldığı düz alanlar 1.100 km² lik bir yüzey alanına sahiptir (Şakıyan ve Yazıcıgil, 2004). Bu değer ise, havzanın % 31'ini oluşturmaktadır. Etkin olarak tarım, sanayi, yerleşim ve diğer faaliyetler için alüvyon alanların kapladığı düz alanlar kullanılmaktadır. Bu nüfus yoğunluğuna göre en fazla nüfus alanın batı kesimindeki Torbalı Ovası'nda, en düşük ise doğudaki Kiraz ilçesi ve çevresinde yer almaktadır. Havzada arazi kullanımı çoğunlukla tarım alanları, yerleşim alanı ve sanayi olarak gerçekleşmektedir (Şimşek, 2007). Arazi kullanımının daha çok serbest akifer özelliğindeki alüvyonel sahada gerçekleşmesi nedeniyle, akiferin kirlenebilirliğinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

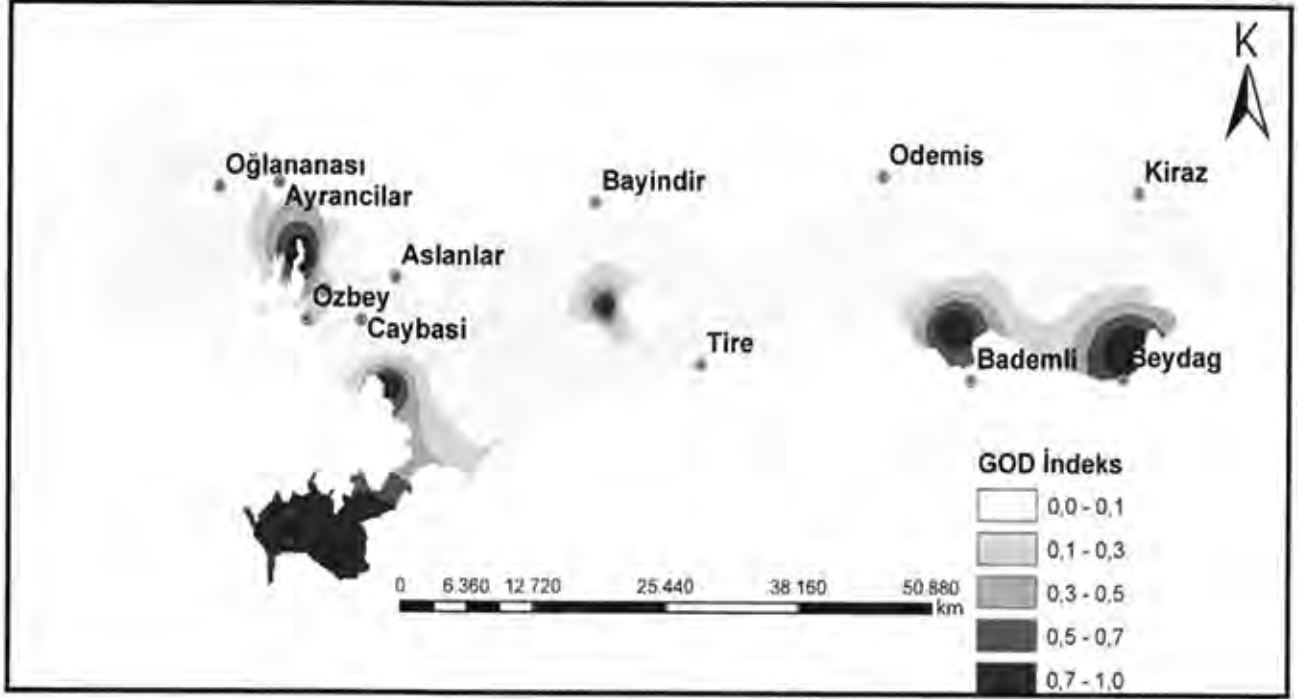


Şekil 2. Çalışma alanının yer bulduru ve genel jeoloji haritası (Şakıyan ve Yazıcıgil, 2004'den değiştirilerek).

Figure 2. Geological and location map of the study area (modified from Şakıyan and Yazıcıgil, 2004).

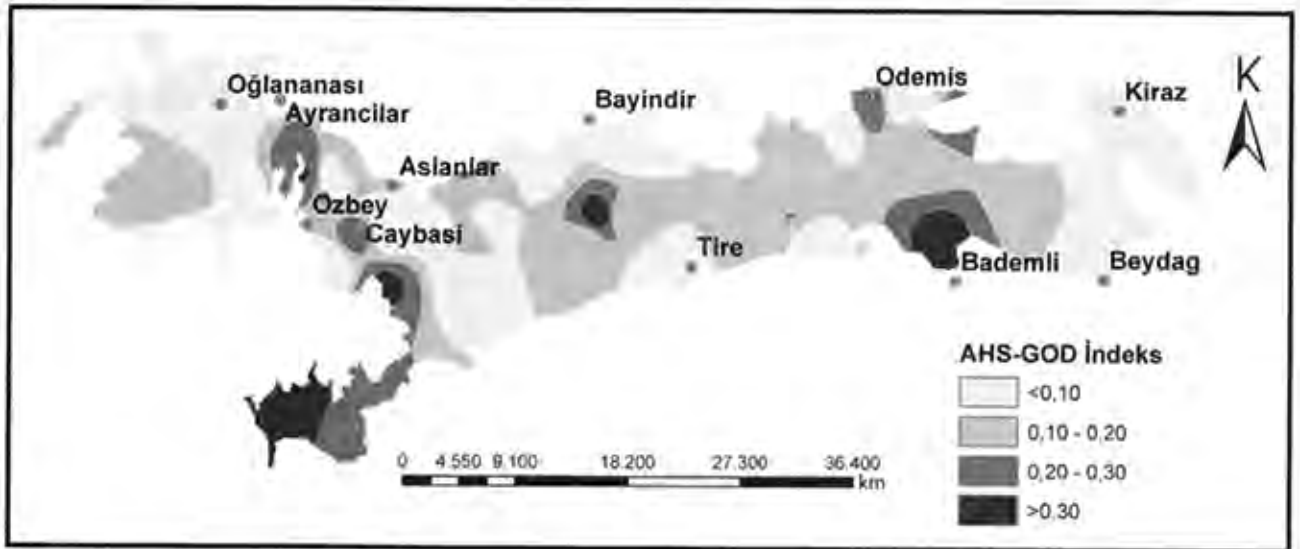
5. GOD-AHS KİRLENEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Çalışma alanında yapılan ayrıntılı hidrojeoloji çalışmalarında en önemli akiferin alüvyon akifer olduğu ve bu akiferden önemli düzeyde yeraltısuyu çekildiği belirlenmiştir (Yazıcıgil vd., 2000). Yazarlar tarafından bölgede yapılan ayrıntılı çalışmada, Küçük Menderes Havzası'na ait önemli bir veri bankası oluşturulmuştur. Bu veri bankasından seçilen bazı kuyular kullanılarak GOD ve GOD-AHS indeks haritaları hazırlanmıştır (Şekil 3 ve 4, Çizelge 7).



Şekil 3. GOD kirlenebilirlik indeksi haritası.

Figure 3. GOD vulnerability index map.



Şekil 4. GOD-AHS kirlenebilirlik haritası.

Figure 4. GOD-AHP vulnerability map.

Çizelge 7. Çalışma alanına ait GOD-AHS indeks veri tabanı.

Table 7. Database for GOD-AHS index in the study area.

Kuyu No.	X	Y	Z	G	O	D	G	O	D	İndeks
				Akifer tipi	Akifer litolojisi	Yeraltısuyu derinliği (m)				
				$G_w=0.174$	$O_w=0.192$	$D_w=0.634$	G_b	O_b	D_b	
10063	532205	4226990	62.00	Yarı Serbest	Kum-Kil	35.00	0.172	0.169	0.095	0.12
10065	606275	4227690	232.00	Yarı Serbest	Killi kum	15.00	0.172	0.169	0.156	0.16
10066	575985	4221517	99.00	Serbest	Kum-Çakıl ardalanması	13.25	0.45	0.247	0.156	0.22
14355	575532	4222231	90.00	Serbest	Kum ve killi çakıl	31.20	0.45	0.247	0.095	0.19
15792	598975	4224775	162.00	Yarı Serbest	Kum ve killi çakıl	29.90	0.172	0.247	0.095	0.14
18643	533310	4201298	20.39	Serbest	Kum ve Çakıl	5.05	0.45	0.247	0.269	0.30
19145	545855	4226972	38.78	Serbest	Kum- Çakıl	33.10	0.45	0.247	0.095	0.19
20045	533375	4201300	34.00	Serbest	Karstik Mermer	1.20	0.45	0.428	0.425	0.43
20321	591000	4231950	165.00	Serbest	Kum- Çakıl	31.60	0.45	0.247	0.095	0.19
21036	519000	4232850	156.00	Yarı Basınçlı	Killi kum-Çakıl	28.00	0.114	0.247	0.095	0.13
21915	547150	4227500	48.50	Yarı Serbest	Kum ve killi çakıl	21.00	0.172	0.247	0.095	0.14
21920	576900	4228625	99.00	Serbest	Kum-Çakıl ardalanması	10.00	0.45	0.247	0.269	0.30
22331	533125	4219975	6.00	Yarı Serbest	Karstik Mermer	5.50	0.172	0.428	0.269	0.28
24859	544225	4220175	19.00	Yarı Basınçlı	Killi kum	9.00	0.114	0.169	0.269	0.22
24865	545900	4221575	21.00	Yarı Serbest	Kum ve Şist	5.00	0.172	0.047	0.269	0.21
24879	545434	4226125	21.00	Serbest	Kum ve killi çakıl	18.20	0.45	0.247	0.156	0.22
24960	545125	4226625	35.00	Serbest	Kum ve killi çakıl	9.00	0.45	0.247	0.269	0.30
25527	583385	4232697	129.50	Serbest	Kum-Çakıl ardalanması	15.00	0.45	0.247	0.156	0.22
26777	527750	4226300	37.50	Serbest	Karstik Mermer	11.70	0.45	0.428	0.156	0.26
27325	589075	4227655	117.50	Yarı Serbest	Kum	12.60	0.172	0.169	0.156	0.16
27363	559780	4229036	75.60	Yarı Serbest	Killi çakıl ve kum	35.00	0.172	0.247	0.095	0.14
27417	530850	4226050	50.50	Yarı Basınçlı	Neojen Kireçtaşı	28.00	0.114	0.047	0.095	0.09
28403	559700	4230410	85.00	Yarı Serbest	Killi silt ve kum	22.00	0.172	0.169	0.095	0.12
28854	541100	4219875	17.50	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	8.60	0.172	0.247	0.269	0.25
30202	575475	4222550	86.00	Yarı Serbest	Siltli kum	11.80	0.172	0.169	0.156	0.16
30297	577300	4219950	119.00	Yarı Serbest	Siltli kum	41.00	0.172	0.169	0.095	0.12
30310	536175	4220125	15.00	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	21.00	0.172	0.247	0.095	0.14
30665	550968	4226417	30.00	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	17.60	0.172	0.247	0.156	0.18
32516	589200	4233000	157.00	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	33.60	0.172	0.247	0.095	0.14
33271	535950	4222450	25.00	Yarı Basınçlı	Neojen kumtaşı	15.00	0.114	0.047	0.156	0.13
34215	563125	4216750	80.00	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	11.00	0.172	0.247	0.156	0.18
36407	517125	4218875	62.00	Yarı Serbest	Kireçtaşı	40.00	0.114	0.047	0.095	0.09
39075	580675	4231330	117.00	Yarı Serbest	Kum- Çakıl	29.00	0.172	0.247	0.095	0.14
39396	550425	4227075	35.00	Yarı Serbest	Siltli kum	24.00	0.172	0.169	0.095	0.12
34490	521975	4224850	43.00	Yarı Serbest	Karstik Mermer	30.00	0.114	0.428	0.095	0.16
S-1	535045	4241146	175.00	Yarı Serbest	Kil	45.00	0.114	0.038	0.095	0.09
7260	543661	4215708	18.00	Yarı Basınçlı	Çakıl	6.00	0.172	0.247	0.269	0.25
7263	555514	4219437	39.00	Serbest	Kum ve killi çakıl	15.00	0.45	0.247	0.156	0.22
21	590276	4220502	131.00	Serbest	Kumlu çakıl	4.50	0.45	0.247	0.425	0.40
5111	526880	4203322	6.00	Serbest	Siltli kum	1.00	0.45	0.169	0.425	0.38
7263	556960	4222200	39.00	Serbest	Kum ve killi çakıl	6.00	0.45	0.247	0.269	0.30
41886	558885	4222154	40.00	Yarı Serbest	Kum ve Çakıl	14.00	0.172	0.247	0.156	0.18
47796	607975	4232525	294.00	Yarı Basınçlı	Killi kum-Şist	30.00	0.114	0.047	0.095	0.09
48720	606700	4218720	177.00	Serbest	Çakıl	5.00	0.45	0.247	0.269	0.30
30303	571895	4219800	114.00	Yarı Serbest	Kum-Çakıl	41.70	0.172	0.247	0.095	0.14
32459	586075	4233025	155.00	Yarı Serbest	Kum-Çakıl	23.20	0.172	0.247	0.095	0.14
51566	609265	4230199	261.00	Yarı Basınçlı	Siltli killi kum	22.00	0.114	0.169	0.095	0.11
43339	519750	4230750	125.00	Yarı Basınçlı	Neojen kilaşı	47.00	0.114	0.047	0.095	0.09
33133	530500	4217100	25.00	Yarı Serbest	Mermer ve Şist	16.00	0.172	0.428	0.156	0.21
46648	535975	4215100	13.00	Serbest	Karstik Mermer	4.00	0.45	0.428	0.425	0.43
54133	515500	4224750	57.00	Yarı Basınçlı	Neojen kilaşı	7.00	0.114	0.047	0.269	0.20
19146	546475	4227750	48.00	Serbest	Kum ve Çakıl	18.00	0.45	0.247	0.156	0.22
5922	536121	4235175	47.00	Yarı Basınçlı	Neojen Kireçtaşı	10.75	0.114	0.428	0.156	0.20
218	534937	4226414	38.00	Yarı Basınçlı	Neojen Kireçtaşı	29.00	0.114	0.428	0.095	0.16
29865	527650	4227200	40.00	Serbest	Karstik Mermer	11.80	0.45	0.428	0.156	0.26

Hazırlanan GOD-AHS indeks haritasına göre alüvyon akifer farklı kirlenebilir kesimlere sahiptir. Alanın batısında yer alan Selçuk ve Torbalı Ovaları kirlenebilirlik açısından yüksek, doğu kesimler düşük, orta kesimler ise orta kirlenebilir alanları oluşturur. Özellikle kirlenebilirliği yüksek olan Selçuk Ovası'nda kirlenebilirliği etkileyen en etkili parametre su derinliği olmuştur. Bu bölgelerde su tablasının yüzeyden 1.0-2.0 m aşağıda olması nedeniyle kirlenebilirlik potansiyelini artırıcı etki yapmıştır. Diğer taraftan, Torbalı Ovası'nda ise kirlenebilirliği akifer litolojisi etkilemektedir. Bu kesimlerde yer alan sanayi nedeniyle aşırı çekim yapılmakta olup, su seviyesi son yıllarda 40 m'ye kadar derinleşmiştir. Ancak, serbest akifer özelliğindeki alüvyonun iri taneli çakıllardan oluşması kirlenebilirlik potansiyelini artırmaktadır. Kirlenebilirliği yüksek olarak belirlenen batı kesimler, ayrıca sığ yeraltısuyu potansiyeline sahip alanlar olup, bu nedenle önemli oranda yeraltısuyu çekimine maruz kalmaktadır. Ayrıca, kirlenebilir ve yeraltısuyu açısından yüksek potansiyele sahip olan batı kesimler yoğun yerleşim ve sanayi alanı olarak kullanılmaktadır. Kirlenebilir alanlardaki sanayi ve evsel faaliyetler, yeraltısuyunun kirlenmesini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda yeraltısularında tarımsal ve evsel faaliyetlerden kaynaklanan kirlenmeler belirlenmiştir (Şimşek, 2004). Kirlenmenin belirlendiği bölgeler ile kirlenebilir bölgeler arasındaki benzerlik, serbest akifer sistemindeki yüzeysel kirleticilerin yeraltısuyuna kolay ulaştığını göstermektedir.

Daha önceden Torbalı Ovası'nda farklı yöntemlerle yapılan kirlenebilirlik çalışmalarında benzer bölgeler kirlenebilir alanlar ve akifer potansiyeli yüksek alanlar olarak belirlenmiştir (Şimşek ve Filiz, 2005; Şimşek vd., 2006; Şimşek, 2007). Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, basit bir yöntem olan GOD-AHS metodu GOD modele göre yapılan kirlenebilirlik haritasına benzer sonuçlar vermiştir (Şekil 3). Ancak, alansal dağılımlarda farklılıklar gözlenmiştir. GOD haritasında tüm kirlenebilirlik sınıflama aralıklarının yüksek kirlenme potansiyeli alanlarda kümelenme gözükürken, GOD-AHS haritasında daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. Her iki haritada aynı değerler kullanılmış olmasına rağmen, iki harita arasındaki alansal dağılım farklılığına GOD-AHS' de ele alınan kirlenebilirlik indeks sınıflama aralıklarından kaynaklanmıştır. AHS ile yapılan ikili karşılaştırmalar ve atanan ağırlık sayıları daha yararlı bir sınıflama yapılmasına yardımcı olmuştur. Ele alınan GOD-AHS sınıflandırma aralıklarının su derinliğinin fazla olduğu alanlarda yapılacak olan kirlenebilirlik haritalarında daha belirgin hatlar sunacağı düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kirlenebilirlik haritaları temiz yeraltısuyu ve akiferlerinin korunması açısından son derece önemlidir. Kirlenebilirlik haritaları sayesinde arazi kullanımı planlanabilmekte ve su kaynaklarının korunmasına yönelik önlemler alınabilmektedir. Son yıllardaki Coğrafi Bilgi Sistemlerinin hızlı gelişmesiyle kirlenebilirlik haritaları kolayca yapılabilmektedir. Bu süreçte kirlenme parametrelerin seçiminde ve karar verme sürecini kolaylaştıran Analitik Hiyerarşi Süreci kullanılarak kirlenebilirlik indeksleri daha etkili

kılınabilmektedir. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada daha kolay bir yöntem olan GOD yöntemi AHS ile uyarlanmış ve kirlenebilirlik sınıflaması ele alınmıştır. GOD-AHS kirlenebilirlik indeksi diğer tekniklerden elde edilenlere benzer sonuçlar vermiştir. Bu benzerlik, daha kolay bir yöntem olan GOD-AHS indeks tekniğinin özellikle büyük su havzalarında kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu yöntemin büyük su havzalarında arazi planlamasından önce uygulanmasıyla, ayrıntılı olmasa da, suların korunmasına önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu yöntem, çoklu parametre içeren yöntemlere göre daha az veri ile aynı amaca yönelik uygulamaların yapılabileceğini de göstermektedir. Çalışma alanını oluşturan Küçük Menderes Havzası'nın yüzeysel akiferinin orta kirlenebilir bir özellik taşıdığı ve kirlenebilirliği yüksek kesimlerde arazi kullanımının en sık olan batı kesimler olduğu görülmektedir. Kirlenebilirliği yüksek kesimlerde atık bertaraf ve arazi kullanımına dikkat edilmesi ve gerekli koruyucu önlemlerin alınması yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Allert, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G., 1987. DRASTIC: 1987 A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. US Environmental Protection Agency Report, 600/2, 87-85.
- Civita, M., 1994. Vulnerability maps of aquifers subjected to pollution: theory and practice. Pitagora Editrice, Bologna (in Italian)
- Expert Choice Software Tutorials (2000), Expert Choice Inc., Pittsburgh.
- Foster, S.S.D., 1987 Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. TNO Committee on Hydrological Research, Proceeding and Information, 38, 69-86.
- Satty, L. T., 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill Comp., U.S.A.
- Şakıyan, J., and Yazıcıgil, H., 2004. Sustainable development and management of an aquifer system in western Turkey. Hydrogeology Journal, 12 (1), 66-80.
- Şen, Z., 1995. Applied hydrogeology for scientists and engineering, Lewis Publishers, New York.
- Şimşek C., 2007. The GIS-integrated surfacial aquifer potential mapping and its importance for aquifer protection, Kucuk Menderes Basin/ West Turkey. State Hydraulic Works, International Congress of River Basin Management, Antalya, pp. 78-94.
- Şimşek, C., Kincal, C., and Gündüz, O., 2006. A solid waste disposal site selection procedure based on groundwater vulnerability mapping. Environmental Geology, 49, 620-633.
- Şimşek, C. ve Filiz, Ş., 2005. Torbalı Ovası ve çevresindeki akiferlerin hidrojeolojisi ve kirlenebilirliği. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 7, 21-37.
- Şimşek, C., 2004. Alüvyon akifer üzerindeki tarımsal faaliyetlerin ve yerleşim alanlarının yeraltısularına etkisinin nitrat ve bor ile izlenmesi Torbalı Ovası, İzmir. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8 (1), 81-93.

- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., and Venuopal, K., 2003. AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modeling and Software*, 18, 645-656
- Yazıcıgil, H., Doyuran, V., Karahanoğlu, N., Çamur, Z., Toprak, V., Rojay, B., Yılmaz, K.K., Sakiyan, J., Süzen, M.L. ve Yeşilnacar, E., 2000. Revize hidrojeolojik etüdler kapsamında Küçük Menderes Havzası yeraltısularının incelenmesi ve yönetimi projesi, T.C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, Ankara.

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 taşımalıdır:

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 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 doğrudan, 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, özetleri, 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 kuralları aşağıda verilmiştir. Yayına kabul edilen makalelerin derginin formatına göre dizilmesi işlemi, basımevi tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle, yayına kabul edilen makalelerin metni, çizelgeleri, şekilleri ve şekiller dizini CD’ye yüklenmiş olarak ayrıca makalenin bir orijinal çıktısıyla birlikte Editörlüğe gönderilmelidir.

Metin Bölümü

1. Metin; A4 boyutunda (24.7x21 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 olmamasına özen gösterilmelidir.
2. Başlık; konuyu en iyi şekilde belirtir ve 10 kelimeyi geçmeyecek şekilde kısa seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı büyük harfle ve koyu yazılmış) yanı sıra, İngilizcesi (İtalik 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 yansıtarak) 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)
 - b. Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i (yazar adları koyu karakterle ve soyadları tamamen büyük harfle, adresler İtalik olarak)
 - c. Öz (anahtar kelimeler eklenerek)
 - d. Abstract (key words 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 vermelidir. Bu durumda 'Sonuçlar' başladığı yerine 'Tartışma ve Sonuçlar' başlığı kullanılmalıdır).
 - h. Katkı belirtme (gerekliyorsa)
 - i. Kaynaklar
5. Yazılarda okuyucuya aktarılması istenen veriler, 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, başlangıç ve bitiş sayfaları

Kitap:

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

Rapor ve Tez:

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

Not : Tüm kaynaklarda ilk satırdan sonrası 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

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

Çizelgeler

- Yazarlar, Bülten'in boyutlarını dikkate alarak, çizelge sayısını sınırlı tutmalı, gerekiyorsa çizelgeleri metinde kullanılabilecek oranda 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 çizelgeler kabul edilmez.
- Çizelgelerin başlıkları, kısa ve öz olarak seçilerek, hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle) hem de İngilizce (İtalik harflerle) hemen ilgili çizelgenin üzerinde verilmelidir.
- 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)

- Tüm çizim 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 verilmelidir.
- Her şekil, ayrı bir sayfada yer alacak biçimde sıraya dizilerek Şekiller Dizin sayfasıyla birlikte çizelgelerden sonra sunulmalıdır. Şekil alt yazılarının ayrıca şekil sayfalarına gerek olmayıp, şekil numaralarının kurşun kalemle her şeklin sağ üst köşesinde belirtilmesi yeterlidir.
- Harita, kesit ve planlarda sayısal ölçek yerine çubuk (bar) türü ölçek kullanılmalıdır.