

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 45

Sayı - Number 2

ISSN 1016 - 9172

Aralık / December 2021



TMMOB JEOLojİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

EDİTÖR / EDITOR

Dr. Tamer TOPAL
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
06531, Ankara
Tel: 0 312 210 26 90
Faks: 0 312 210 57 50
E-Posta: topal@metu.edu.tr

TEKNİK EDİTÖR / TECHNICAL EDITOR

Dr. Müge AKIN
Abdullah Gül Üniversitesi
Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü
Sümer Kampüs 38080
Kocasinan /KAYSERİ
E-posta : muge.akin.jmd@gmail.com

Makale Gönderim Adresi:

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara
Tel : (0312) 434 36 01
Faks : (0312) 434 23 88
E-Posta : jmo@jmo.org.tr
URL : www.jmo.org.tr

Yayın Türü: Yaygın Süreli Yayın

Yayın Şekli: Yılda 2 kez (6 ayda bir)
Türkçe ve İngilizce

Yayın Sahibi: TMMOB JMO Adına
Hüseyin ALAN

Yayının İdare Adresi: Kocatepe Mah.
Hatay 2 Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

Baskı: ERS Matbaacılık,
Kazım Karabekir Cad. Altıntop İşhanı
No:87/7 İskitler/Ankara
Tel : (0312) 384 54 88
Baskı Tarihi : Ocak 2022
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

Dr. Mutluhan AKIN (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)
Dr. Erhan ALTUNEL (Osman Gazi Üniversitesi)
Dr. Serdar BAYARI (Hacettepe Üniversitesi)
Dr. Zeki ÇAMUR (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Dr. Mümtaz ÇOLAK (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Özcan DUMANLILAR (Demir Export)
Dr. Nusret EMEKLİ (İller Bankası)
Dr. Murat ERCANOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)
Dr. Nazan Yalçın ERİK (Cumhuriyet Üniversitesi)
Dr. Ünsal GEMİCİ (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Candan GÖKÇEOĞLU (Hacettepe Üniversitesi)
Dr. Reyhan Kara GÜLBAY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Dr. Nilgün GÜLEÇ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Leyla KALENDER (Fırat Üniversitesi)
Dr. Remzi KARAGÜZEL (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Dr. Nurkan KARAHANOGU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Ali KAYABAŞI (Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi)
Dr. Recep KILIÇ (Ankara Üniversitesi)
Dr. Cem KINCAL (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Mehmet Yalçın KOCA (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Ayhan KOÇBAY (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü)
Dr. Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)
Dr. Yılmaz MAHMUTOĞLU (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Dr. Harun SÖNMEZ (Hacettepe Üniversitesi)
Dr. Mehmet Lütfi SÜZEN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Gültekin TARCAN (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Atiye TUĞRUL (İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa)
Dr. Dilek TÜRER (Hacettepe Üniversitesi)
Dr. Asuman TÜRKMEENOĞLU (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Taner ÜNLÜ (Ankara Üniversitesi)
Dr. Ali Bahadır YAVUZ (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Dr. Hasan YAZICIGİL (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Koray YILMAZ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Dr. Murat YILMAZ (İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi makale ve dizin özleri
SCOPUS, ULAKBİM, TR Dizin, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts, EBSCO, Cabell ve Chemical Abstracts uluslararası indeksleri tarafından taranmaktadır.

*Journal of Geological Engineering is indexed and abstracted by
SCOPUS, ULAKBİM, TR Dizin, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts, EBSCO, Cabell and Chemical Abstracts*

Jeoloji Mühendisleri Odası
Chamber of Geological Engineers
Yönetim Kurulu / Executive Board

Hüseyin ALAN
Yüksel METİN
Faruk İLGÜN
D. Malik BAKIR
M. Emre KIBRIS
Gonca ŞAHİN
Buket YARARBAŞ ECEMİŞ

Başkan / *President*
İkinci Başkan / *Vice President*
Yazman / *Secretary*
Sayman / *Treasurer*
Mesleki Uygulamalar Üyesi / *Member of Professional Activities*
Sosyal İlişkiler Üyesi / *Member of Social Affairs*
Yayın Üyesi / *Member of Publication*

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 45

Sayı - Number 2

Aralık / December 2021

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

155- Araştırma Makalesi / Research Article

Cem KINCAL, Tümay KADAKÇI KOCA, Mehmet Yalçın KOCA

Heyelanlı Bir Alanın Yeniden Etkinleşme Potansiyelinin İncelenmesi: Harmandalı-İzmir Katı Atık Düzenli Depolama Alanı Örneği

Investigation of the Reactivation Potential of a Landslide Area: a case study of Harmandalı-İzmir waste disposal site

181- Araştırma Makalesi / Research Article

Zeynep AYKAÇ, Muge K. AKIN, Ali Fırat ÇABALAR

$V_{S(30)}$ Tabanlı Yerel Zemin Koşulları ve Deprem Hasar İlişkisi: Van-Abdurrahmangazi Örneği

$V_{S(30)}$ Based Local Soil Conditions and Earthquake Damage Relationship:

Van-Abdurrahmangazi Example

199- Araştırma Makalesi / Research Article

Abdurrahman Yasir PARLAK, Ali ELMAS

Investigation of Lineaments in the Mid-Black Arc Region using Bouguer Gravity Data

Orta Karadeniz Yayındaki Çizgiselliklerin Bouguer Gravite Verileri Kullanılarak İncelenmesi

213- Araştırma Makalesi / Research Article

Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL, Gültekin TARCAN

Nalbantlar Ovası (Söke, Aydın) Yeraltı Suyu ve Tarım Toprakları İnorganik Kalite Araştırması: Arsenik ve Uranyum Tehlikesi

Inorganic Quality Study of Groundwater and Agricultural Soils on Nalbantlar Plain (Söke, Aydın): Arsenic and Uranium Hazard

235- Araştırma Makalesi / Research Article

Derya TOKSÖZ HOZATLIOĞLU

Şişen Zeminlerin Kireç Kolonu İle İyileştirilmesinde Kür Süresinin Belirlenmesine Yönelik Bir Yaklaşım

An Approach to Determination of Curing Time in Stabilization of Swelling Soils with Lime Column

245- Derleme / Review Paper

Derya TOKSÖZ HOZATLIOĞLU, Işık YILMAZ

Şişen Zeminlerdeki Kireç Kolonu Uygulamalarında İyon Göçü Mekanizması

Ion Migration Mechanism in Lime Column Applications in Swelling Soils

Araştırma Makalesi / Research Article

Heyelanlı Bir Alanın Yeniden Etkinleşme Potansiyelinin İncelenmesi: Harmandalı–İzmir Katı Atık Düzenli Depolama Alanı Örneği

*Investigation of the Reactivation Potential of a Landslide Area: a case study of Harmandalı–
İzmir waste disposal site*

Cem KINCAL¹ , Tümay KADAKCI KOCA² , Mehmet Yalçın KOCA¹ 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Buca/İzmir

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Menteşe, Muğla

Geliş (Received): 30 Nisan (April) 2021, Düzeltme (Revised): 08 Haziran (June) 2021, Kabul (Accepted): 15 Haziran (June) 2021

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, İzmir-Çiğli semtinde yer alan Harmandalı Düzenli Katı Atık Depolama Sahası'nın KB'ya bakan yamacında 18 Şubat 2013 tarihinde meydana gelmiş heyelanın oluşum nedenlerini ve aynı kayma dairesi üzerinde hareketin tekrar etme potansiyelini araştırmaktır. Eylül-2016'da yeniden başlayan jeolojik ve jeoteknik çalışmalar ışığında bu potansiyelin varlığı değerlendirilmiştir. Başlangıç heyelanı sonrasında, kayma hareketinin yavaşlayarak devam ettiği, heyelan sonrasında açılan inklinometre kuyularında gerçekleştirilen okumalarla belirlenmiştir. 2010 yılında katı atık (çöp) şevlerinin önüne koruma yapısı olarak bir sedde inşa edilmiştir. Sedde tabanında yer alan yüksek plastisiteli kil bandından geçen kayma dairesi boyunca, KB'ya doğru yatay yönde 64.5 mm'lik bir yer değiştirme hareketi meydana gelmiştir. Bu hareket, idari binaların duvarlarında çatlamalar, ana bağlantı yolunda bozulmalar ve seddede sıkışmanın etkisini gösteren kabarma şeklinde deformasyonlara neden olmuştur. Mart-2013 ve Eylül-2016'da presiyometre deneyleri ve inklinometre kuyularında yapılan okumaların sonucu olarak, heyelanın boyuna kesiti, kayma mekanizması ortaya çıkartılmıştır. Buna ek olarak, kaymaya neden olan andezitik tüf ayrışma ürünü yüksek plastisiteli killerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, İnklinometre, Katı Atık, Oturma, Presiyometre, Yüksek Plastisiteli Kil

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the causes of the landslide occurred on 18 February 2013 at the NW-facing slope of the Harmandalı waste disposal site located in İzmir-Çiğli and the reactivation potential of the same circular slip surface. In the light of the geological and geotechnical studies resumed in September-2016; the reactivation potential has been evaluated. An embankment (a barrier) was built as a protection structure in front of the slopes of solid waste in 2010. It was determined from the readings in the inclinometer boreholes drilled right after the landslide that the sliding slowed down gradually after the initial landslide. A 64.5 mm displacement occurred in horizontal direction towards NW along the circular slip surface passing through the high plasticity clay band located under the embankment. This movement caused cracks on the walls of the administration buildings, disruption of the main connection road, and deformation such as buckling indicating the effect of compression within the embankment. The longitudinal cross-section showing the sliding mechanism has been prepared based on the pressuremeter tests and the readings taken from the inclinometer boreholes drilled at different locations in

March–2013 and September–2016. In addition, the engineering properties of high plasticity clays (CH), which are the weathering products of the andesitic tuffs that cause sliding, have been investigated.

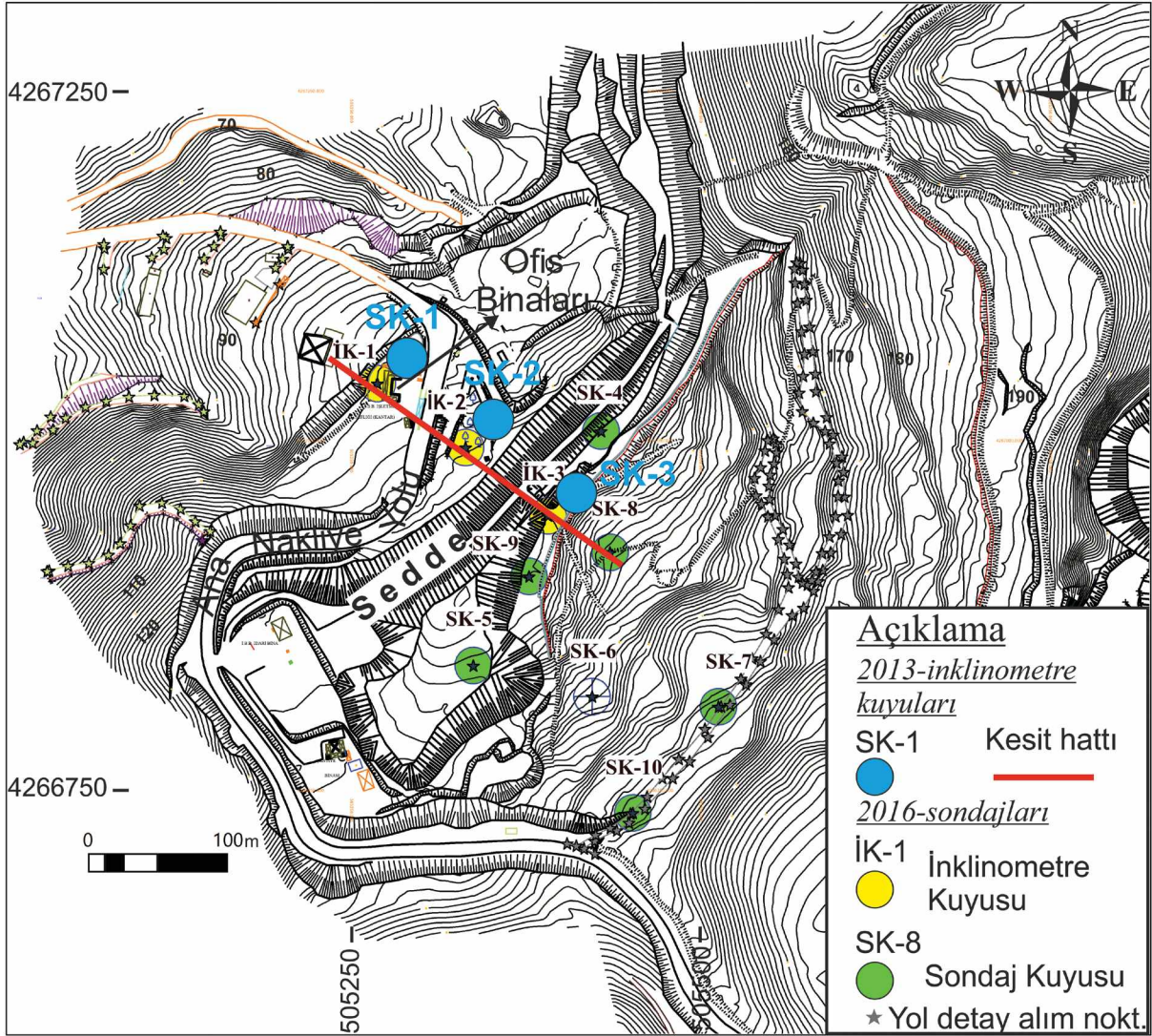
Keywords: *Landslide, Inclinometer, Solid Waste, Settlement, Pressuremeter, High Plasticity Clay*

GİRİŞ

Katı atık depolama sahası İzmir Körfezi'nin kuzeyinde, İzmir İli Menemen İlçesi sınırları içindeki Harmandalı mevkiinde yer almaktadır. İzmir şehir merkezine uzaklığı yaklaşık 30 km'dir. Aralık-1990 tarihinde Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından inceleme alanı etüd edilmiş, "İzmir-Harmandalı Çöp Depolama Alanı Zemin Araştırmaları Raporu" hazırlanmıştır (Günay vd., 1990). 1992 yılından günümüze değin günde yaklaşık 5000 ton, yılda 1.8 milyon ton evsel, endüstriyel ve tıbbi atık 1.2 km² lik alanda düzenli olarak depolanmaktadır (Şekil 1). 18 Şubat 2013'te yoğun yağışlar sonrasında, katı atık şevinin batıya bakan yamacından itibaren başlayan, seddeyi kapsayan ve en batıda ofis binalarına kadar uzanan bir alanda kayma hareketi meydana gelmiştir (Şekil 1 ve 2). Kayma özellikle ana nakliye yolu üzerinde önemli deformasyonlara neden olmuştur (Şekil 3). Bu çalışmanın amacı, kaymayı oluşturan etmenleri ve kayma dairesinin konumunu hem 2013 hem de 2016 yıllarında yapılmış jeolojik ve jeoteknik çalışmalara dayanan verilerle araştırmak, kaymanın nedenlerini ve mekanizmasını incelemektir. 2016 yılının başlangıcından itibaren, seddenin doğusunda yer alan katı atık şevlerinde hareketlenme izleri ve yer değiştirmeler gibi yüzeyde meydana gelen öncekilere ek yeni deformasyonlar gözlenmiştir. Böylece, aynı kayma dairesi boyunca hareketin tekrar edebileceği kuşkusuna oluşmuştur. Bu nedenle, 2016'da yeniden jeolojik ve jeoteknik çalışmalar başlatılmıştır. Kayma dairesi üzerine konumlandırılmış inklinometre kuyularında

Eylül-2016'da tüm yıl boyunca yapılan okumalar, aynı kuyularda gerçekleştirilen presiyometre deneyleriyle heyelanın yeniden aktive olup olamayacağı belirlenmiştir.

18 Şubat 2013'te kayma meydana geldikten 48 gün sonra üç adet inklinometre kuyusu hazırlanmış ve ilk okumalar 8 Nisan 2013 tarihinde yapılabilmektedir. İnklinometre kuyularının derinlikleri SK-1'de 35 m, SK-2'de 32 m ve SK-3'de ise 45 m'dir. Bu kuyular, sahada ilk açılan inklinometre kuyularıdır (Şekil 1). Diğer taraftan, Eylül-2016'da, heyelan sahasında derinlikleri 25 m ile 65 m arasında değişen 10 adet yeni sondaj kuyusu açılmış ve bunların konumları da Şekil 1'de gösterilmiştir. Sondaj kuyularının derinlikleri, yeraltı suyu derinlikleri, kuyu ağız kotları, presiyometre deney sayıları ve kuyu boyunca yüksek plastik kil seviyesi geçilen yerlerin derinlikleri (zayıflık zonları) ise Çizelge 1'de toplu olarak verilmiştir. Eylül-2016'da, önceden hareket etmiş kütlelerin kayma yönünde (K30B-G30D ekseninde) bir hat boyunca üç adet (İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyusu), seddenin GB'de yer alan katı atık depolama alanına kadar kayma zonunun uzanıp uzanmadığını kontrol etmek için de aynı hat üzerinde İK-8 inklinometre kuyusu açılmıştır (Şekil 1). Önceden 3, daha sonra da 4 adet olmak üzere toplam yedi adet inklinometre kuyusuna ait okuma sonuçları bu çalışmada değerlendirilmiştir. Heyelan sonrası, Mart-2013'te açılmış üç adet inklinometre kuyusunda (SK-1, SK-2 ve SK-3) ölçülmüş deplasmanların miktarı ve derinlikleri heyelanın kayma dairesinin yerinin ve konumunun belirlenmesinde dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Sedde, ofis binaları, ana nakliye yolu, katı atık düzenli depolama alanının KB'ya bakan şevleri, 2013 ve 2016 yıllarında açılmış sondajların lokasyonları.

Figure 1. The embankment, office buildings, main transport road, NW facing slopes of the solid waste disposal site and locations of the boreholes drilled in 2013 and 2016.

2016'da yapılan çalışmalarla da (inklinometre okumaları ve presiyometre deneyleri) kayma hareketinin devam edip etmediği belirlenmiş ve söz konusu kayma dairesi üzerinde, kayma hareketinin tekrar etme potansiyeli değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, sedde altında yer alan ve içinden

kayma düzleminin geçtiği yüksek plastisiteli killerin mühendislik özellikleri ve Şubat-2013 heyelanının kayma mekanizması üzerine olan etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışma, heyelana yönelik yapılan şev stabilitesi çalışmalarını kapsamamaktadır.



Şekil 2. Seddeyle katı atık depolama sahası arasında kalan hendekte açılmış SK-4 sondaj kuyusu.

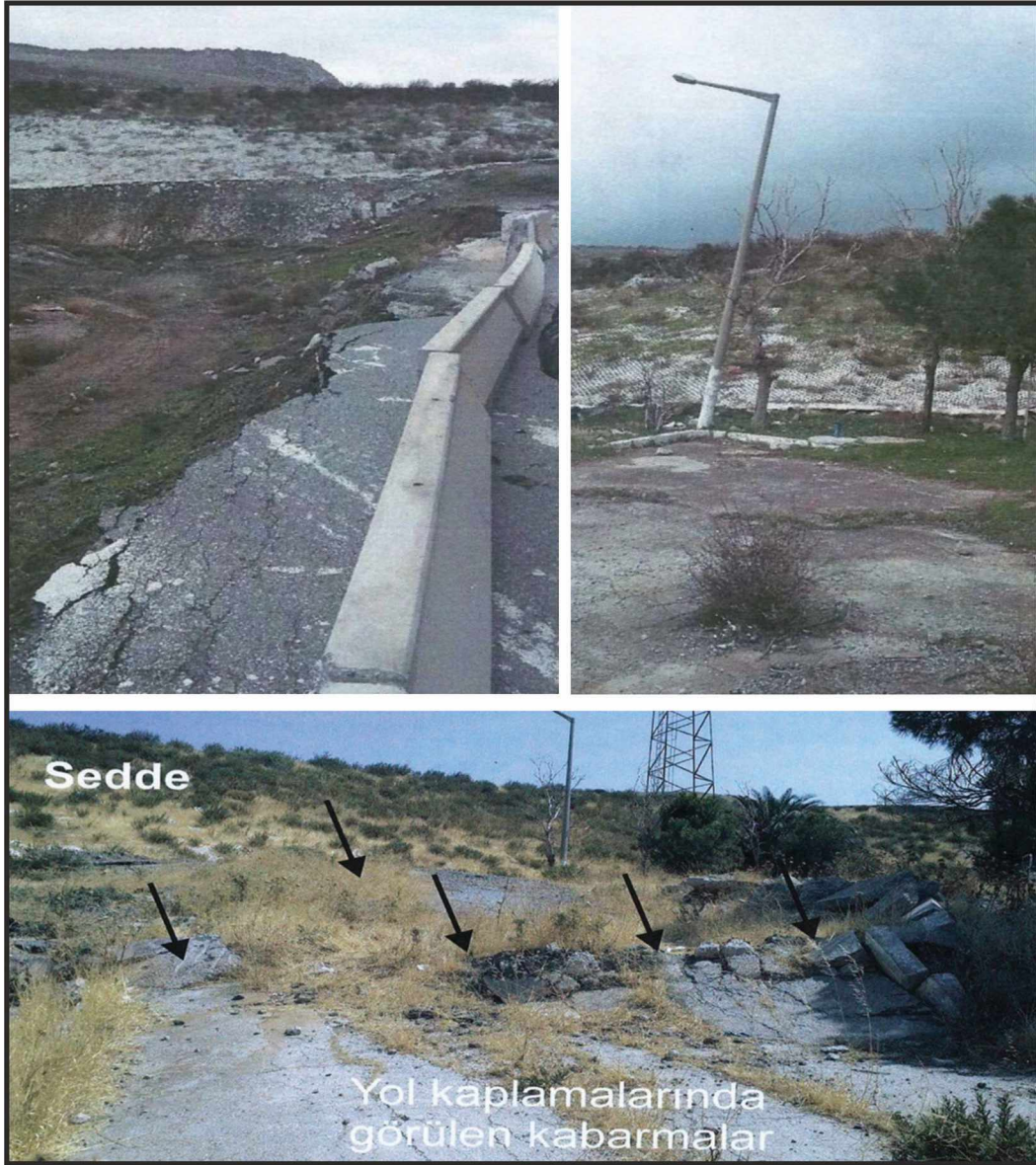
Figure 2. SK-4 borehole drilled in the ditch area between the embankment and the solid waste disposal site.

Çizelge 1. Sondaj kuyularının derinlikleri, kuyularda ölçülen yeraltı suyu derinlikleri, kuyu ağzı kotları, presiyometre deney sayıları ile kuyularda yüksek plastisiteli kil seviyesi geçilen zonların derinlikleri (zayıflık zonları).

Table 1. Depth of boreholes and groundwater levels in the boreholes, elevations of borehole head, number of pressuremeter tests and the depths of the high plasticity clay zones (weakness zones).

Konum	Sondaj No	Derinlik (m)	Kot (m)	Dolgu+katı atık kalınlığı (m)	Yeraltı su seviyesi (m)	Presiyometre deney sayısı	CH-tipi killerin derinliği (m)
Seddenin batısında	İK-1	30	106.5	3.00	5.30	15	21-30 m
	İK-2	40	111.7	0.30	6.80	20	19-23.5 m
	İK-3	50	126.0	9.00	5.30	25	17-21.0 m
	SK-4	50	120.5	20.0	1.40	12	13.3-17 m
	SK-5	50	120.0	-	2.00	12	-
Seddenin doğusunda	SK-6	60	146.0	17.6	16.8	12	-
	SK-7	54	160.0	42.5	39.0	12	-
	İK-8	65	137.0	20.6	17.8	25	-
	SK-9	38	127.0	20.0	20.0	0	-
	SK-10	25	164.0	15.0	14.5	6	-
Toplam Derinlik: 462 m				Toplam: 139			

İK: İnklinometre kuyuları



Şekil 3. Yol kenarındaki beton korumalıklarda meydana gelen yer değiştirmeler, asfalt yolda kabarmalar ve aydınlatma direğinde düşeyden sapma şeklinde gelişen deformasyonlar.

Figure 3. Displacements on the roadside concrete shelters, heavings in asphalt and deformation on concrete lighting pole as deviation from vertical.

YÖNTEMLER

İnclinometre ölçümleri ve presiyometre deneyleri kuyu içinde yapılan yerinde deneylerdir. Yüzey altında yanal yöndeki

deformasyonları ölçmek için gerekli hazırlık yapıldıktan sonra inclinometre ölçümleri yapılır (Mikkelsen, 1996). İnclinometre cihazı, dijital bir inclinometre sondası, makaralı sonda kablosu ve veri iletimini sağlayan verici ile kuyu

içerisine tespit edilen inklinometre borularından ibarettir (ASTM D6230-13, 2013). İnklinometre sondası özel muhafazası içinde okuma yapmak için kuyu içine sarkıtılır. Bu çalışmada, 2013 ve 2016 yıllarında sırasıyla 3 ve 4 adet inklinometre kuyusu açılmış ve bu kuyularda okumalar yapılmıştır (DEÜ, 2016). 2013 yılında yapılan okumalarla kayma dairesinin konumu şekillenmiş, 2016 yılında açılmış inklinometre kuyularında yapılan deformasyon ölçümleriyle de kayma dairesi üzerinde hareketin tekrar etme potansiyeli değerlendirilmiştir.

Presiyometre deneyi bir kuyu yükleme deneyidir ve uygulanan basınca karşı zeminde oluşan hacimsel deformasyon değerlerinin belirlenmesi ilkesine dayanır (ASTM D4719-00, 2000). Zeminlerden zayıf kayalar kadar değişen litolojik seviyelerde deney uygulanabilir. Bu çalışmada presiyometre deneylerinin yapılmasının amacı, inklinometre kuyularının düşey zemin profilleri boyunca kayma hareketlerine hassasiyet gösterebilecek veya önceden meydana gelen hareket nedeniyle örselenmiş ve zayıf bir zon olarak ortaya çıkmış zemin kesitlerinin derinliklerini belirlemektir. Eylül-2016'da açılmış İK-1, İK-2, İK-3 ve İK-8 inklinometre kuyularında sırasıyla 15, 20, 25 ve 25 adet olmak üzere 85 adet, tüm kuyularla birlikte toplamda 139 adet presiyometre deneyi yapılarak deformasyon modülü (E_M) ve presiyometre limit basınç (P_L) değerleri ölçülmüştür (Çizelge 1).

Seddenin kendi ağırlığı nedeniyle zemine statik yüklerin etkimesi, kil bandında gerçekleşen konsolidasyonun başlıca nedenidir. Suyu doymun zeminlerde sıkışma esas olarak boşluklardan suyun dışarı çıkması sonucu meydana gelir (ASTM D2435-04, 2013). İnce taneli zeminlerin geçirgenliği çok düşük olduğundan, yüklenen zeminden suyun dışarı çıkması zamana bağlı

olarak gelişmektedir. Bu çalışmada sedde altında yer alan plastik kil bandından örselenmemiş kil örnekleri alınarak üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon deneyi sonucunda, boşluk oranına karşılık logaritma basınç ($e-\log P$) eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler üzerinde ön konsolidasyon basınçları (σ'_c) bulunmuştur (DEÜ, 2016). Buna göre, aşırı konsolidasyon oranı (AKO) belirlenmiştir.

$$AKO = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (1)$$

Burada, σ'_0 ; kil bandının orta noktasındaki efektif gerilmedir. AKO oranı, incelenen kilin normal (NC), aşırı (OC) veya henüz konsolidasyonunu tamamlanmamış (UC) olması hakkında bilgi verir. Buna ek olarak, sıkışma indisi (c_c) konsolidasyon eğrisinden hesaplanmıştır.

$$c_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log P} \quad (2)$$

Kil bandının kalınlığı (H_0), sıkışma indisi (c_c), seddenin ağırlığı nedeniyle meydana gelen gerilme artışı (Δe) ve kil bandının ortasındaki efektif gerilme değeri yardımıyla sedde tabanında yer alan kil bandının konsolidasyon oturması (S_t) hesaplanmıştır.

$$S_t = \frac{c_c}{1 + e_0} H_0 \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right] \quad (3)$$

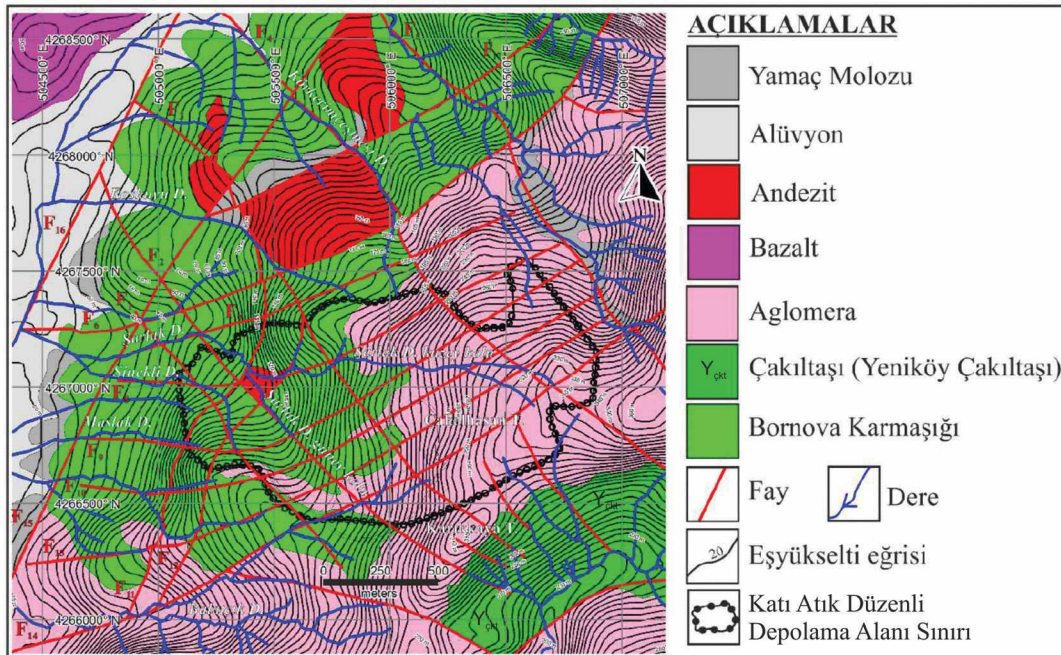
İK-1, İK-2 ve İK-3 konumundaki inklinometre kuyularında, sondajın kil bandını kestiği noktalardan örselenmemiş kil örnekleri alınmış ve bu örnekler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) kesme deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin uzun süredeki kayma dirençlerinin belirlenmesi için drenajlı deneyler yapılmalıdır. Zeminin kayma direncini belirlemek için farklı normal yükler altında (12, 24 ve 48 kg) numuneler deneye tabi tutulmuştur. Kesme kutusu deneyleri ASTM (2004) standardına göre yapılmıştır. Deney, numuneyi kesme cihazına yerleştirip üzerine önceden belirlenmiş normal

bir gerilme uygulamakla başlar. Deney sırasında aşırı boşluk suyu basınçları oluşmayacak şekilde numuneler yavaşça yüklenmiş ve sonunda drenajlı koşullar oluşturulmuştur. Deformasyon göstergeleri numunenin kalınlığını 0.0025 mm, yatay deplasmanı ise 0.025 mm hassasiyetle ölçebilmektedir. Konsolidasyon bitince, drenaja izin verilmeden makaslama gerçekleştirilmiştir. Deneyin sonucunda zemine ait efektif dayanım parametreleri (c' ve ϕ') belirlenmiştir. Killi zeminlerin likit limit, plastik limit ve plastisite indislerinin belirlenmesi için de ASTM D4318–10E1 (2010) standardı dikkate alınmıştır.

JEOLÖJİ

Harmandalı Katı Atık Düzenli Depolama Sahası ve yöresinin jeoloji haritası Şekil 4'te sunulmuştur. Sahada temel kayacını Üst Kretase–Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı

oluşturur (Erdoğan, 1990). Birim, kumtaşı–şeyl ardalanmasından oluşan bir matriks ile matriks içinde olistolit konumunda, değişik boyutlarda kireçtaşı blokları içerir. Zayıf kayaç özelliğindeki lamine şeyller çok kıvrımlı ve kırıklı bir yapı sunar. Matriksin bir diğer bileşeni sağlam, ince – orta katman kalınlığına sahip kumtaşıdır. Katı atık depolama sahası içerisinde Neojen yaşlı tortul kayaçlara rastlanmamıştır. Bu nedenle, Üst Miyosen–Pliyosen yaşlı Yamanlar Volkanitleri'ne ait lav ve piroklastikler (aglomera ve tüfler) uyumsuzlukla doğrudan Bornova Karmaşığı üzerine gelir (Şekil 4 ve 5). Aglomeralar bloklu bir iç yapıya sahip, kolayca aşınabilen, zayıf kayaçlardır. Tüfler aglomeraların tabanında, yanal devamsız, ince bantlar şeklinde (1–5 m) uzanırlar. Andezitler katı atık depolama sahasının dışında, daha düşük topografik kotlarda yüzlekler vermiştir (Şekil 4).



Şekil 4. İnceleme alanı ve yakın yöresinin 1/5000 ölçekli jeoloji haritası (Akbaş vd., 2011'den değiştirilerek).

Figure 4. 1/5000 scale geological map of study area and nearby vicinity (modified from Akbaş et al., 2011).

Katı atık depolama alanı ve yakın yöresi yoğun tektonik etkiye uğramış bir arazi görünümündedir (Şekil 4). İnceleme alanında üç farklı fay takımı belirlenmiştir. i) KDD-GBB uzanımlı, eğim atımlı normal faylar, ii) KB-GD uzanımlı (K30-40B/50-60 B), eğim atımlı normal faylar, iii) 3 m düşey atıma sahip, her iki fay takımını kesen KD-GB uzanımlı ters faylar (Özellikle F_{12} fayı) K 25 D/74 KB, seddeyi dar açıyla kesmekte ve Şubat-2013 heyelanının kayma dairesinin şekillenmesinde rol oynamıştır. Diğer taraftan, birinci takım faylarda ölçülen düşey atımlar 10-20 m arasındadır. Bu atımlar GD-KB yönünde sahaya basamaklı bir morfoloji kazandırmıştır.

YAĞIŞ VE HEYELAN İLİŞKİSİ

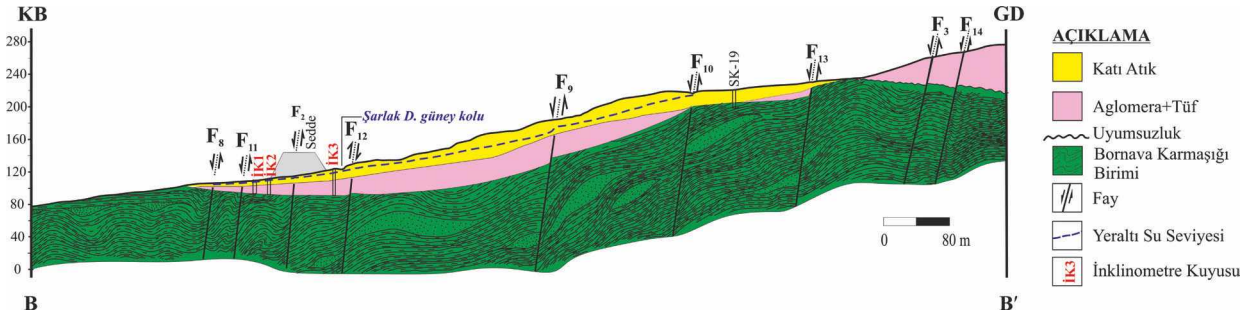
2011, 2012 ve 2013 yıllarına ait yıllık yağış verileri sırasıyla 467.8 mm, 484.6 mm ve 584.4 mm olarak ölçülmüştür (Çiğli Meteoroloji Müdürlüğü, 2013). Harmandalı Düzenli Katı Atık Depolama Sahası'nda 2013 yılının Şubat ayında bir heyelan meydana gelmiştir. Heyelanın meydana geliş tarihiyle yıllık yağış verileri karşılaştırıldığında, 2011 ve 2012 yıllarına ait yıllık yağış verilerinden yaklaşık 100 mm daha fazla yağışın 2013 yılında düştüğü görülmüştür (Şekil 6). Aralık-2012, Ocak ve Şubat-2013 aylık yağış verileri sırasıyla 128.4 mm, 134.0 mm ve 132.6 mm olarak ölçülmüştür. Bu yağış verileri, 2012 ve 2013 yılları içinde ölçülmüş en yüksek aylık yağış verileridir.

İNKLINOMETRE OKUMALARI VE PRESİYOMETRE DENEYLERİ

Seddenin KB'de iki (SK-1 ve SK-2), GD'de bir adet olmak üzere (SK-3) üç adet inklinometre kuyusu açılmış, 08.03.2013 ve 28.09.2013 tarihleri arasında toplam altı inklinometre okuması 9-12 günlük aralıklarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Şubat-2013'te kayma hareketi (heyelanın başlangıç tepkisi)

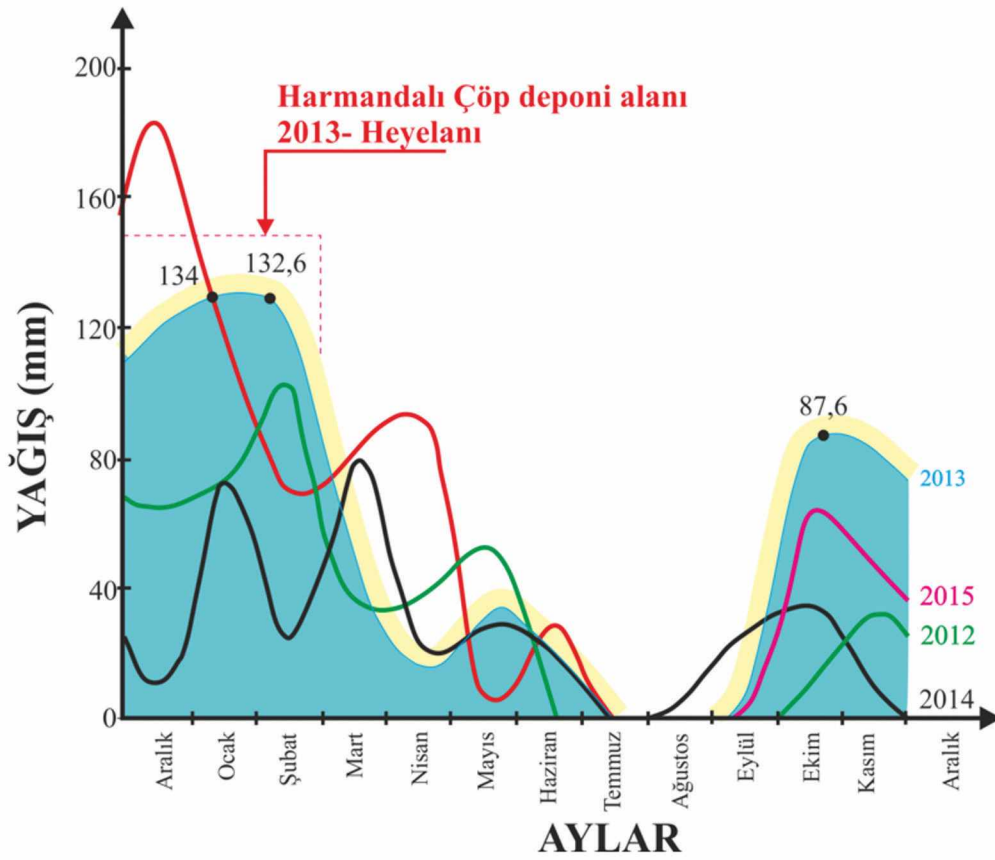
meydana gelmiş, söz konusu kuyuların açılması ve inklinometre kuyusu olarak hazırlanıp okumalara başlanması Mart ayının ilk haftasını bulmuştur (08.03.2013). Kuyu sonları referans alınarak okunmuş deplasman değerleri sırasıyla 52 mm, 64.5 mm ve 35 mm'dir (Şekil 7). SK-1 inklinometre kuyusunda, kayma dairesi yüzeyden 16 m derinlikte ölçülmüştür. SK-2 ve SK-3 inklinometre kuyularında ise bu derinlikler sırasıyla 22 m ve 31 m'dir (Şekil 8). Mart-2013'te açılmış bu üç inklinometre kuyusuna ait yanal yöndeki deformasyonların meydana geldiği derinlikler, Eylül-2016'da açılmış İK-1, İK-2, İK-3, İK-8 inklinometre kuyularında ve SK-4 sondaj kuyusunda gerçekleştirilen presiyometre deney sonuçları ve de sondajlara ait düşey zemin profilleri dikkate alınarak olası kayma modelinin gözlenebildiği heyelanın boy kesiti çıkartılmıştır (Şekil 8). Olası kayma dairesinin derinliğini ve şeklini belirlemek için yapılan diğer çalışmalar ise aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.

Mart-2013'te seddenin batısında açılmış inklinometre kuyularında yeraltı suyu derinlikleri sırasıyla 2 m, 2 m ve 4.5 m olarak ölçülmüştür. Henüz yağışlar başlamadan Eylül-2016'da yaklaşık aynı lokasyonlarda açılmış inklinometre kuyularında ise (İK-1, İK-2, İK-3) YASS derinlikleri sırasıyla 5.3 m, 6.8 m ve 5.3 m'dir (Çizelge 2). Mart ayında alınmış YASS derinlikleri yüzeye daha yakın olarak ölçülmüştür. SK-4 sondaj kuyusu sedde ile katı atık sevi arasında sığ bir hendekte yer almaktadır (Şekil 2). Katı atık sızıntı suları hendekte biriktiği için SK-4 kuyusunda su seviyesi yüzeye daha yakın konumdadır (1.4 m). SK-4 sondaj kuyusu heyelanın kayma mekanizmasının anlaşılması açısından en önemli kuyudur. Bu nedenle, kuyuda hem fay etkisi hem de kaymaya neden olan ve suya doygun koşullarda yer alan kil bandının varlığı kolaylıkla takip edilebilmektedir (Şekil 9).



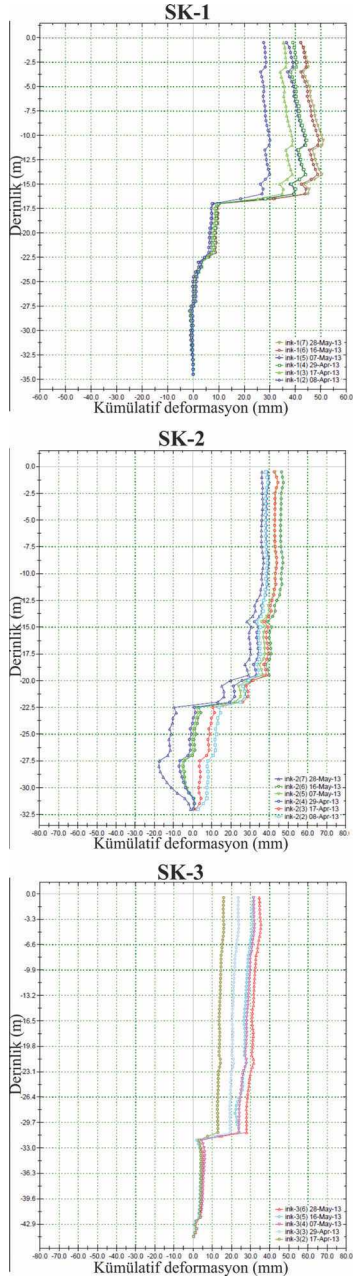
Şekil 5. F₁₂ – fayı ve seddeyi kapsayacak şekilde KB–GD yönünde alınmış jeolojik kesit.

Figure 5. Geological cross-section taken in NW–SE direction involving F₁₂ – fault and the embankment.



Şekil 6. 2012, 2013, 2014 ve 2015 yılları için aylara göre yağış miktarının değişimi.

Figure 6. The variations in the monthly precipitation for the years 2012, 2013, 2014, and 2015.

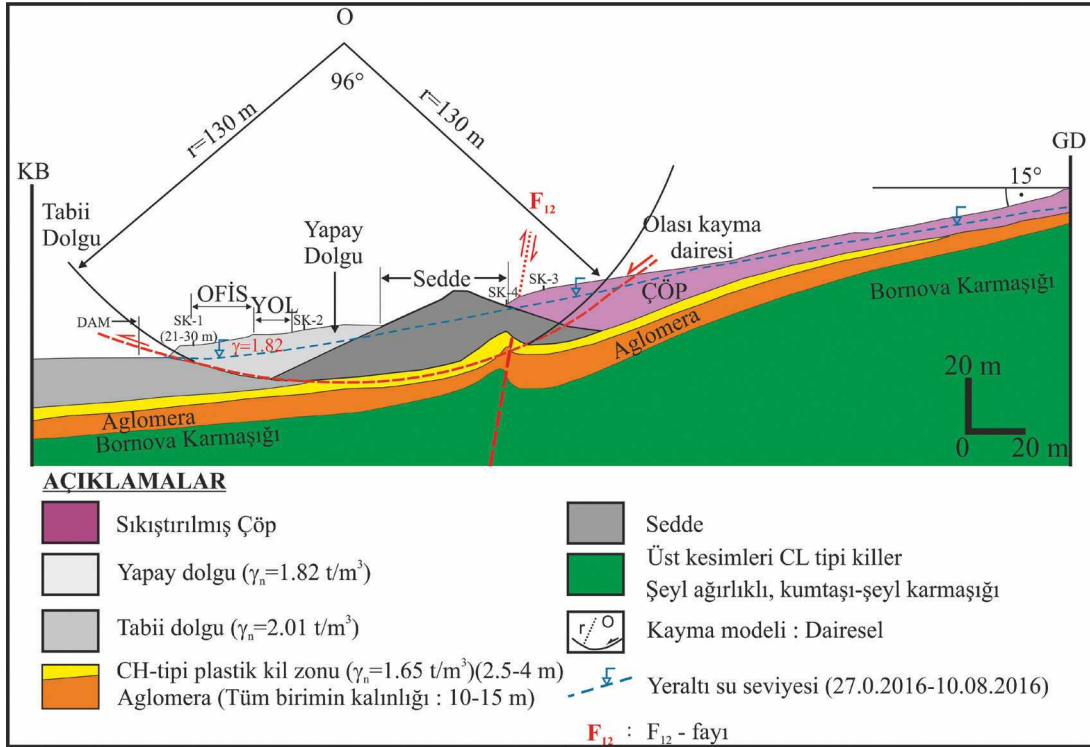


Şekil 7. Heyelanın kayma dairesinin yerini belirlemek üzere inklinometre kuyularında 2013 yılı Nisan ve Mayıs aylarında yapılan toplam altı okumanın grafik sunumları.

Figure 7. The graphs of total six readings made in April and May 2013 along inclinometer boreholes to determine the location of the surface.

Sondajlara ait loglar incelendiğinde, İK-3 inklinometre kuyusunda aglomeralara 17 m'de, seddeye en yakın konumda olan SK-4 kuyusunda ise 13.3 m'de girilmiştir. SK-4 kuyusundan elde edilen karotlarda F_{12} fayının etkisiyle ezilme, parçalanma izleri yoğun olarak gözlenmiştir (Şekil 9). SK-4 sondaj kuyusunda, Bornova Karmaşığı'na, 23 m'de, İK-3'de ise 36 m'de girilmiştir. SK-4 sondajının kuyu ağız kotu 120.5 m, İK-3 kuyusunun ise 126 m'dir (Şekil 8). Bu konumsal durum, F_{12} fayının yükselen bloğunun seddeye bakan tarafta, düşen bloğunun ise katı atık depolama alanına bakan kesiminde yer aldığına işaret etmektedir. F_{12} fayı yüksek açılı bir ters faydır ve olasılıkla kayan kütleyi (hareket eden kütleyi) GD'dan sınırlamaktadır (Şekil 8).

Eylül-2016'da açılmış İK-1, İK-2, İK-3, İK-8 inklinometre ve SK-4 sondaj kuyularında presiyometre deney sonuçlarına göre belirlenmiş en zayıf zonlar, limit basınç (P_L) ve elastisite modülü (E_M) değerlerinin derinlikle değişimleri sırasıyla Şekil 10 ve 11'de grafik olarak sunulmuştur. Olası kayma dairesinin geçtiği zon boyunca sondaj kuyularında okunan net limit basınç değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Heyelanın kayma dairesinin geçtiği zon boyunca net limit basınç değerlerinin 68–125 kg/cm² mertebesinde olduğu Çizelge 3'ten anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Heyelanın 1/1000 ölçekli jeoteknik kesiti.

Figure 8. 1/1000 scale geotechnical cross-section of the landslide.

Çizelge 2. Sondaj kuyularında ölçülen su seviyesinin tabii zemin kotuna göre konumu ve derinlikleri (Eylül–2016’da açılmış sondajlar).

Table 2. The location of the water table level measured in boreholes relative to the ground level and their depths (boreholes drilled in September–2016).

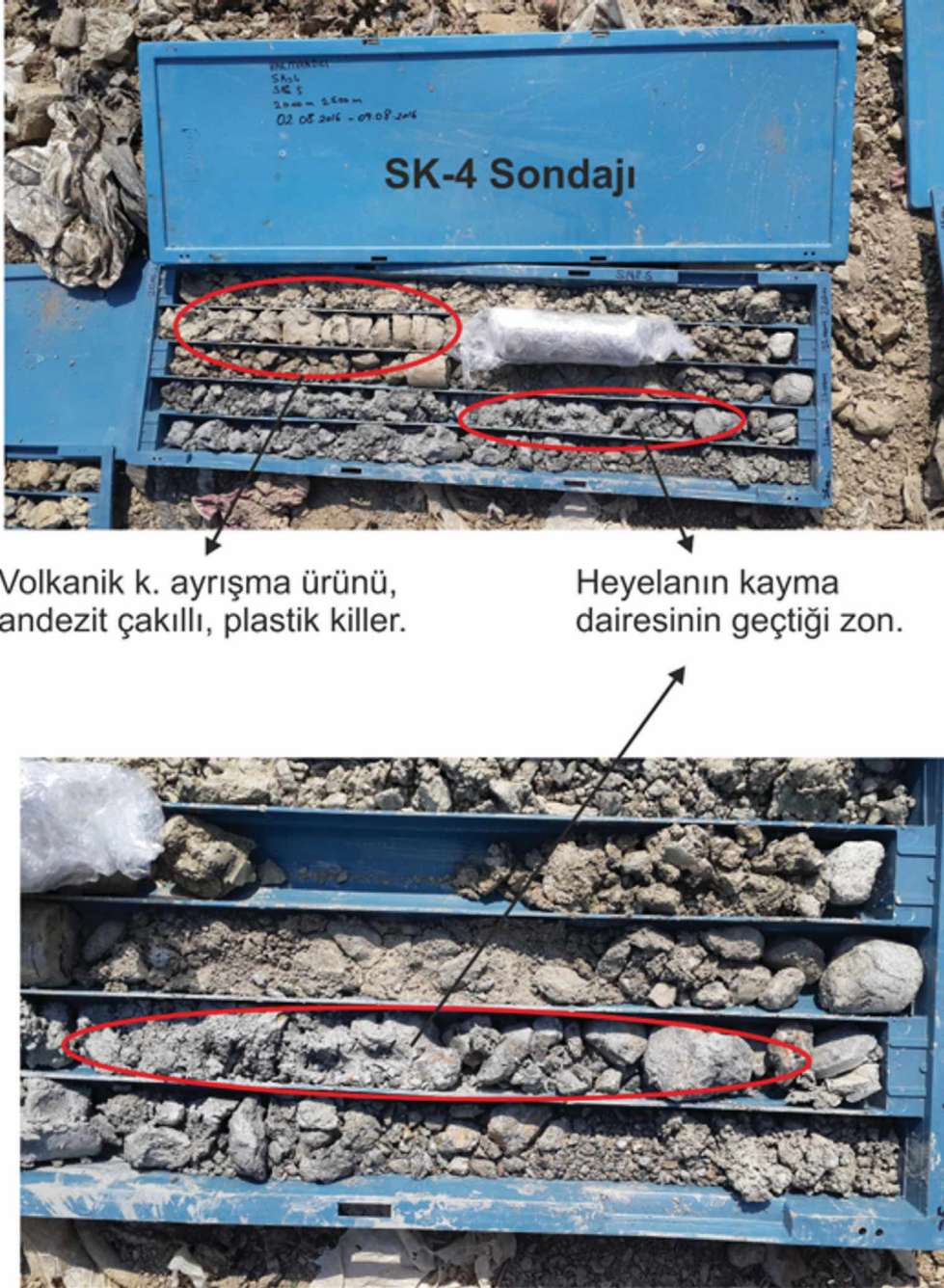
Malzeme	Sondaj No	YASS (m)	Dolgu+ Katı atık Kalınlığı (m)	Fark (m)	Su seviyesinin konumu
Katı atık yok, vasıfsız yüzey dolgusu var	İK-1	5.30	3.00	- 2.30	Tabii zemin
	İK-2	6.80	0.30	- 6.50	kotunun
	SK-5	2.00	-	- 2.00	altında
Sondajda yüzeyden itibaren Katı atık + dolgu kesilmiş daha sonra kaya birimine girilmiştir.	İK-3	5.30	9.00	+ 3.70	Tabii zemin kotunun üzerinde
	SK-4	1.40	20.0	+ 18.6	
	SK-6	16.8	17.6	+ 0.80	
	SK-7	39.0	42.5	+ 3.50	
	İK-8	17.8	20.6	+ 2.80	
	SK-10	14.5	15.0	+ 0.50	Tabii zemin kotunda
	SK-9	20.0	20.0	-	

İK: İnklinometre kuyuları



Şekil 9. F_{12} fayının etkisiyle deforme olmuş aglomeralar ve Bornova Karmaşığı'na ait şeyler.

Figure 9. The deformed agglomerates due to F_{12} fault and weathered shales of Bornova Melange.



Şekil 9. devam ediyor.

Figure 9. to be continued.

Çizelge 3. Kayma dairesinin geçtiği zon boyunca sondaj kuyularında gerçekleştirilen presiometre deneylerinin sonuçları.

Table 3. The pressuremeter test results performed in the boreholes along the zone of circular slip surface.

Sondaj No	Ölçülen derinlik (m)	Net limit basınç (kg/cm ²)	Elastisite modülü (kg/cm ²)
İK-1	4-6	8.94-9.4	81-125
İK-2	19.5-21.5	W_s ve $SCR \leq \%20$	185
İK-3	17-21	11.0	81-84
SK-4	20-23	9.0	68-78

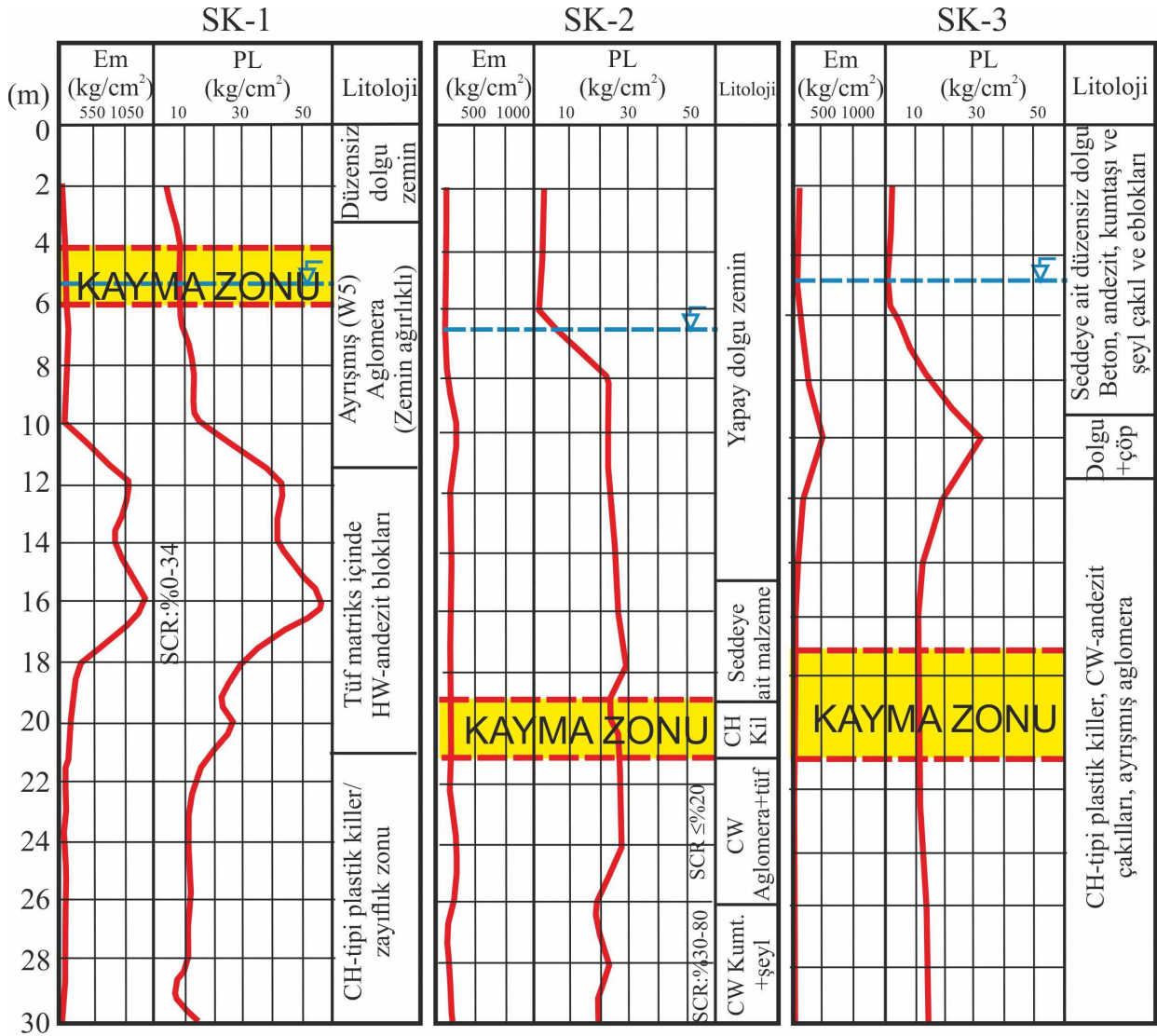
W_s : Tamamen ayrılmış kayaç, %SCR (Sağlam karot verimi).

İK-2 inklinometre kuyusunda 19.5 m-21.5 m arasında çok sık çatlaklı bir zon geçilmiştir (SCR $\leq \%20$), (Şekil 10). Bu zonda andezit kaya parçaları plastik killerle birlikte yer almaktadır. Bu nedenle, zon boyunca diğer kuyulardaki değerlerden daha yüksek net limit basınç (20-25 kg/cm²) ve deformasyon modülü değerleri (185 kg/cm²) elde edilmiştir. Kayma dairesinin geçtiği yüksek plastik kil zonunda boyunda presiometre baskın limit basınç değerleri 9.0-11.0 kg/cm² mertebesinde, deformasyon modülü değerinin ise 70-80 kg/cm² arasında olduğu belirlenmiştir. Şekil 8'de heyelanın kayma mekanizması ve olası kayma dairesinin geçtiği zon hem litolojilere hem de yeraltı suyu seviyesinin konumuna göre izlenebilmektedir. 2013 yılında açılmış inklinometre kuyularında yapılan okumalarla belirlenmiş kayma dairesinin geçtiği derinliklerle 2016'da açılmış kuyularda presiometre deney sonuçlarından elde edilen zayıflık zonlarının derinlikleri örtüşmektedir.

Heyelanın kayma dairesi, sedde altındaki yüksek plastisiteli killerin yer aldığı zon boyunca, topoğrafik eğimle KB'ye doğru ilerlemekte daha sonra, tabii zemin ve yapay dolgu zemin arasında yer alan dokanaktan geçmektedir (Şekil 8). Kayma dairesinin geçtiği yayın merkezi, Şekil 8'de gösterilmiş olan "O" noktası dikkate alındığında, seddenin büyük bir bölümünün

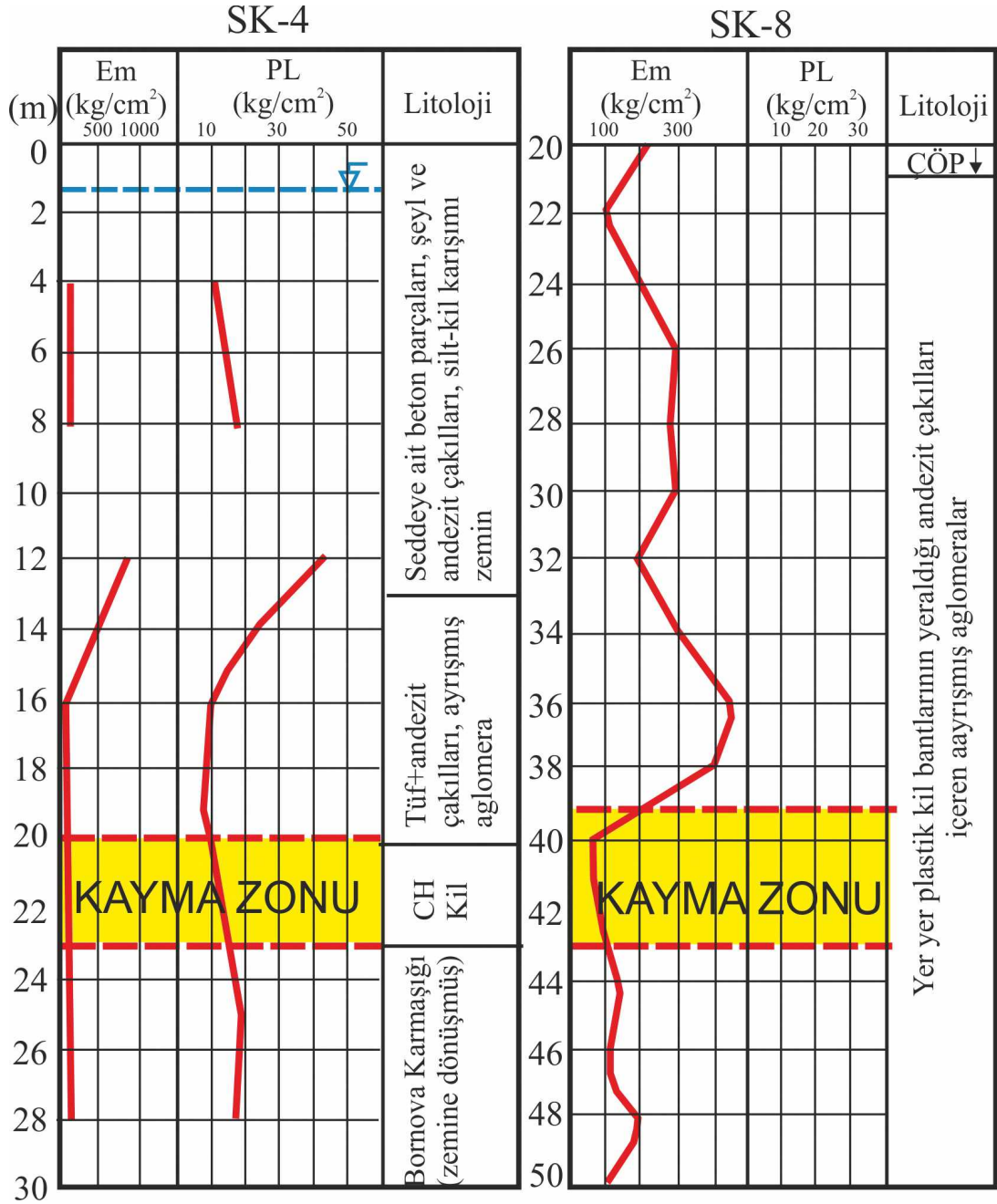
kaymayı tetikleyici, küçük bir bölümünün de engelleyici bir rol üstlendiği anlaşılmaktadır. Seddenin bu konumu stabilite açısından da uygun olmayan bir durumdur.

Boya deneyleri: Sedde ile katı atık depolama alanı arasında yer alan hendekte (Kot:118 m, SK-4 ve İK-3 kuyuları arasında) ve İK-8 inklinometre kuyusunun yer aldığı (Kot:137 m) katı atık sevi basamağında boya deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin amacı, gerek inklinometre okumaları gerekse de presiometre ölçümlerine ve de arazi gözlemlerine dayandırılarak belirlenmiş olası kayma dairesinin konumunun doğruluğunu onaylamak, hendekten ve üst kotlardan bırakılan boyalı suyun (Rodamin katkılı, C.I.45170, $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$), ofis binalarının arkasında yer alan dere içine erişip erişmediğini gözlemlemektir. Boyalı su SK-4 sondajının eteğindeki bataklık alandan 10.11.2016 tarihinde salınmıştır. 27.11.2016 tarihinde, 3-5 dakikalık çok kısa bir zaman diliminde su çıkışı dere içinde gözlemlenmiştir. Rodamin katkılı su, katı atık suyunun kahverengimsi gri renkle karışması nedeniyle, kırmızımsı pembe olan rengi bordoya dönüşmüş olarak dere içinde izlenmiştir. Rodamin içeren suyun izlenebilmesi, heyelanın kayma dairesinin, sedde gerisinde yer alan tabanı yüksek plastisiteli kil olan çukurluğa/hendeğe yakın olarak geçtiğini göstermektedir (Şekil 8).



Şekil 10. İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyularında gerçekleştirilen presiometre deney sonuçlarının derinlikle değişimi ve kayma zonlarının derinlikleri.

Figure 10. The variations in the pressiometer test results performed in the inclinometer boreholes İK-1, İK-2 and İK-3 with depth and the depth of slip zones.



Şekil 11. SK-4 ve İK-8 sondaj kuyularında gerçekleştirilen presiometre deney sonuçlarının derinlikle değişimi ve kayma zonlarının derinlikleri.

Figure 11. The variations in pressiometer test results performed in the inclinometer boreholes SK-4 and İK-8 with depth and the depth of slip zones.

KİLLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Eylül-2016'da açılmış inklinometre kuyularından alınmış, örselenmiş (D) ve örselenmemiş (UD) zemin örnekleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış ve sonuçları Çizelge 4'te toplu olarak sunulmuştur. Ayrıca alınan örneklerin kıvam durumları, doğal birim ağırlıkları, doğal su içerikleri, kıvam indisi (I_c) ve likitlik indisi (I_L) değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Bu çizelgede zeminlerin doğal su içeriklerinin plastik limit değerleriyle karşılaştırılması da görülmektedir. Bu karşılaştırma, doğal su içeriğindeki bir zeminin, plastik kıvamda olup olmadığının doğrudan değerlendirmesini vermektedir. Kohezyonlu zeminler plastik kıvama geçtiklerinde hacimce artış gösterirler. Hacimce genişleme (ΔV) nedeniyle zeminin hareket etme kabiliyeti de artar. Bu nedenle, zeminlerin kıvam durumlarının belirlenmesi, kütle hareketi oluşturma potansiyellerinin araştırılmasında önemlidir. İK-1, İK-3 ve İK-8 inklinometre kuyularından elde edilen zemin örneklerinde $\% \omega_n > \% \omega_{PL}$ durumu söz konusudur ve kayma eğilimi açısından bu zeminler göreceli daha uygundur. Buna ek olarak, kıvam indisi, $I_c: \left[\frac{W_{LL} - W_n}{w_{PI}} \right]$ ve likitlik indisi, $I_L: \left[\frac{w_n - w_{PL}}{w_{PI}} \right]$ değerleri de bu durumu (Holtz ve Kovacs (1981)'e göre plastik katı özellikte zeminler) destekler niteliktedir, $0 < I_L < 1.0$, (Çizelge 5). I_c değerlerine göre, İK-2 kuyusundan alınan örnek yarı katı ($I_c > 1.0$), diğer kil örnekleri ise plastik davranış göstermektedir ($0.25 < I_c < 1.0$). Zemin

örneklerinin plastisite kartı üzerindeki yerleri ve zemin sınıfları Şekil 12'de gösterilmiştir. Buna göre, İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyularından alınan zemin örneklerinin “yüksek plastisiteli kil, CH”, İK-8 inklinometre kuyusundan alınan zemin örneğinin ise “düşük plastisiteli kil, “CL” olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 12). Yüksek plastisiteli killer bünyelerine çok miktarda su alıp şişebilme, suyunu kaybettiklerinde de büzülme özelliğine sahiptir (Koca ve Türk, 1994; Koca, 1999; Kıncal vd., 2017). Yüksek plastisiteli killerin bünyelerine çok miktarda su aldıklarında, yumuşamaya bağlı olarak kesme dirençleri de çok düşer. Tüm bu özellikler CH türü killerin kayma potansiyelini arttırmaktadır. İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyularından alınmış örselenmemiş kil örnekleri üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) direkt makaslama deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar normal gerilme-makaslama gerilmesi grafiğine işlenerek Şekil 13'te sunulmuştur.

Andezitik tüf ayrışma ürünü yüksek plastisiteli killerin en büyük efektif içsel sürtünme açısı (ϕ'), 14° değerine kadar düşmekte ve katı atık yığınlarına taban oldukları lokasyonlarda kaymaya hassas zonlar oluşturmaktadırlar. Killerin kohezyon değerleri ise doğal su içeriklerinde sıfıra yakındır (5 – 12 kPa), (Şekil 13 ve Çizelge 6). Normal konsolide killerde $\tau_f = \sigma \tan \phi'$ eşitliği, $c' \approx 0$ olduğundan doğrudan dikkate alınabilir. Kohezyonun sıfır veya sıfıra yakın değerlerde olması kaymayı artırıcı yönde bir etki yaratmaktadır.

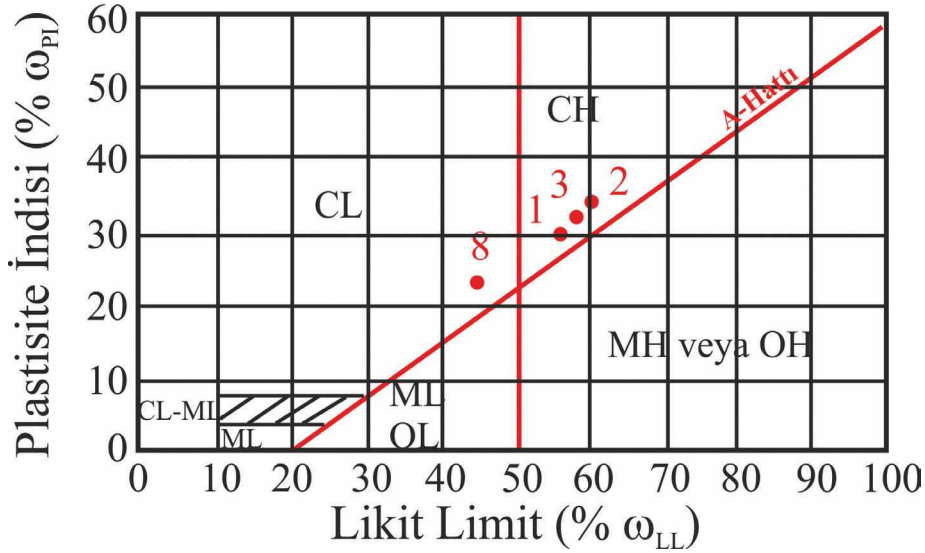
Çizelge 4. Zemin mekaniği deney sonuçları.
Table 4. Soil mechanics test results.

ÖRNEK	Sınıflandırma Deneyleri										Direkt Kesme Deneyi (CD)		Konsolidasyon Deneyi				
	Yıkamalı Elek Analizi		Atterberg Limitleri		Sınıflandırma Sistemi		USCS		ω_n	G_s	γ_n	c'	ϕ'	İlk boşluk oranı	Son Sıkışma indisi		
	+ #10	- #200	LL	PL	PI												
									%		g/cm ³	kg/cm ²	(°)	e_i	e_s	c_c	
Kuyu No	Örnek No	Derinlik (m)	%	%	%	%	-										
İK-1	UD	5.30-5.60	11	56	26	30	CH	27.1	2.71	1.92	0.05	17	0.733	0.594	0.13		
İK-2	UD	24.00-24.50	9	77	60	26	34	CH	22.1	2.71	1.81	0.12	15	0.883	0.672	0.28	
İK-3	KAROT	32.00-32.40	10	68	58	25	33	CH	28.3	2.70	1.90	0.08	14	0.760	0.557	0.23	
SK-4	KAROT	21.60-21.80	37	33	32	20	12	GC	10.5	-	-	-	-	-	-	-	
İK-8	KAROT	34.00-34.50	4	81	44	20	24	CL	26.7	-	1.94	-	-	-	-	-	

Çizelge 5. Zemin örneklerinin Atterberg kıvam limitleri, doğal su içerikleri, birim ağırlıkları ve kıvam durumları.

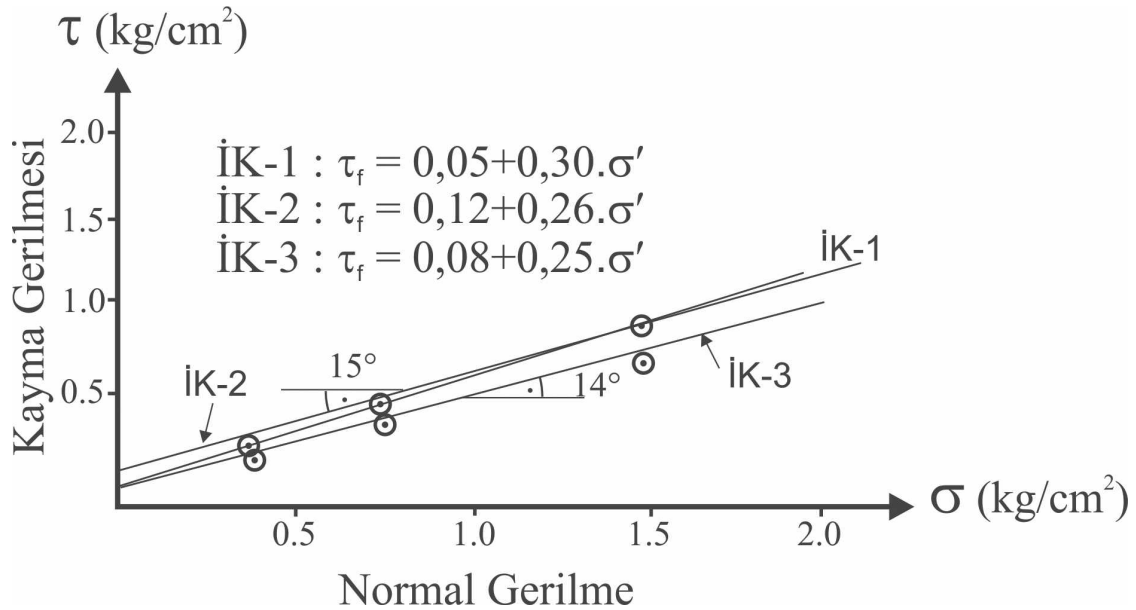
Table 5. Atterberg limits, water content, unit weight and consistency of the soil specimens.

Sondaj	ω_{LL} (%)	ω_{PL} (%)	ω_{PI} (%)	ω_n (%)	γ_n (t/m ³)	$\omega_n > \omega_{PL}$ (%)	$(\omega_{LL} - \omega_n) / \omega_{PI}$	Likitleik indisi, I_L
İK-1	56	26	30	27.1	1.92	+	0.63	Plastik (yumuşak)
İK-2	60	26	34	22.1	1.81	-	1.11	Yarı katı
İK-3	58	25	33	28.3	1.90	+	0.90	Plastik (sert) (sert)
İK-8	44	20	24	26.7	2.00	+	0.72	Plastik (yumuşak)



Şekil 12. İK-1, İK-2, İK-3 ve İK-8 sondaj kuyularından elde edilen zemin örneklerinin plastisite kartı üzerindeki yerleri.

Figure 12. The locations of the soil specimens taken from İK-1, İK-2, İK-3, and İK-8 boreholes on the plasticity chart.



Şekil 13. Andezitik tüf ayrışma ürünü yüksek plastisiteli killere ait normal gerilme ve kesme gerilmesi ilişkisi.

Figure 13. The relationship between normal stress ve shear stress for the high plasticity clay derived from weathering of the andesitic tuff.

Çizelge 6. Yüksek plastisiteli killere ait kesme deneyi sonuçları.

Table 6. Shear test results of the high plasticity clays.

Örnek	Kıvam durumu	Kilin türü	Doğal birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Efektif içsel sürtünme açısı, ϕ (°)	Efektif kohezyon (kg/cm ²)	ω_n (%)
İK-1	Plastik	CH	19.2	17	0	27.1
İK-2	Yarı katı	CH	18.1	15	0.12	22.1
İK-3	Plastik	CH	19.0	14	0.10	28.3

Konsolidasyon Deneyleri

Andezitik tüf ayrışma ürünü yüksek plastisiteli killer (CH) sedde altında, seddenin kret kotundan itibaren maksimum 20 m derinlikte yer almaktadır. Seddenin eteklerinde bu derinlik daha da düşmektedir (12 m). Sedde altında yer alan bu killer ofis binalarına doğru (GD'den KB'ye doğru) giderek kalınlıkları azalan bir şekilde konumlanmıştır. Kil bandının kalınlığı 2.5–4 m arasında değişmektedir. Killi zeminlerin sabit gerilmeler altında, zamana bağlı bünyelerindeki suyu atarak sıkışmalarına konsolidasyon denir. Bu zaman dilimi içerisinde, suya doymuş kil bandında yavaş yavaş oluşan efektif gerilme artışı seddede zamanla oturmaya neden olmuştur. İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyularından, farklı derinliklerden elde edilen zemin örnekleri üzerinde konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 14). Ayrıca İK-1, İK-2 ve İK-3 inklinometre kuyularından elde edilen zemin örneklerinin konsolidasyon deney sonuçları Çizelge 7'de toplu olarak verilmiştir. Konsolidasyon deneyinde yüklemeler sırasında 0.25, 0.40, 1.0, 2.0, 4.0 ve 8.0 kg/cm² gerilmeler uygulanmıştır (Şekil 14). Her uygulamada oluşan kademedeki boy değişimi (ΔH_i) kaydedilmiştir. Kademedeki boşluk oranı değişimleri hesaplanmıştır.

$$\Delta e_i = \frac{\Delta H_i}{H_{son}} \quad (4)$$

Konsolidasyon deney sonuçlarını gösteren e–log P grafiği üç deney için ayrı ayrı elde edilmiştir (Şekil 14).

Sedde altında yer alan yüksek plastisiteli killerde meydana gelen oturma miktarları Çizelge 7'deki veriler yardımıyla hesaplanmıştır. Sedde altında yer alan kil bandının kalınlığı 2.5–4.0 m arasında değişmektedir (2.5 m $\leq H_0 \leq$ 4.0 m). Seddenin yüksek plastisiteli kil bandına uyguladığı sabit gerilme değeri aralığı $\Delta \sigma = H_{sedde} \times \gamma_{kaya \text{ bloğu}}$, $\Delta \sigma_{mak} = 20 \times 2.1 = 42 \text{ t/m}^2$ ve $\Delta \sigma_{min} = 12 \times 2.1 = 25 \text{ t/m}^2$ olarak alınabilir. Sedde eğimli bir yüzeye sahip olduğundan H_{sedde} yüksekliği de değişmektedir. Bu nedenle, $\Delta \sigma$ değeri 25–42 t/m² arasında değerler almaktadır. Sedde tabanında yer alan yumuşak kıvamdaki, yüksek plastisiteli killer, normal konsolide (NK) killerdir ($\sigma'_0 = \sigma'_c$). Şekil 14'te verilen İK-1, İK-2 ve İK-3 eğrilerinden killerin ön konsolidasyon basınçlarının $1.10 \leq \sigma'_c \leq 2.05 \text{ kg/cm}^2$ aralığında değiştiği görülmektedir. SK-4 konumunda açılan sondajın zemin profilinde kil bandının yer aldığı seviyedeki efektif gerilmeler yaklaşık 1.0 kg/cm², İK-2'de benzeri seviyelerde ise yaklaşık 2.0 kg/cm² mertebesinde (1.0 $\leq \sigma'_0 \leq$ 2.0 kg/cm²). Bir diğer anlatımla, aşırı konsolidasyon oranı, $AKO = \sigma'_c / \sigma'_0 = 1$ durumu söz konusudur

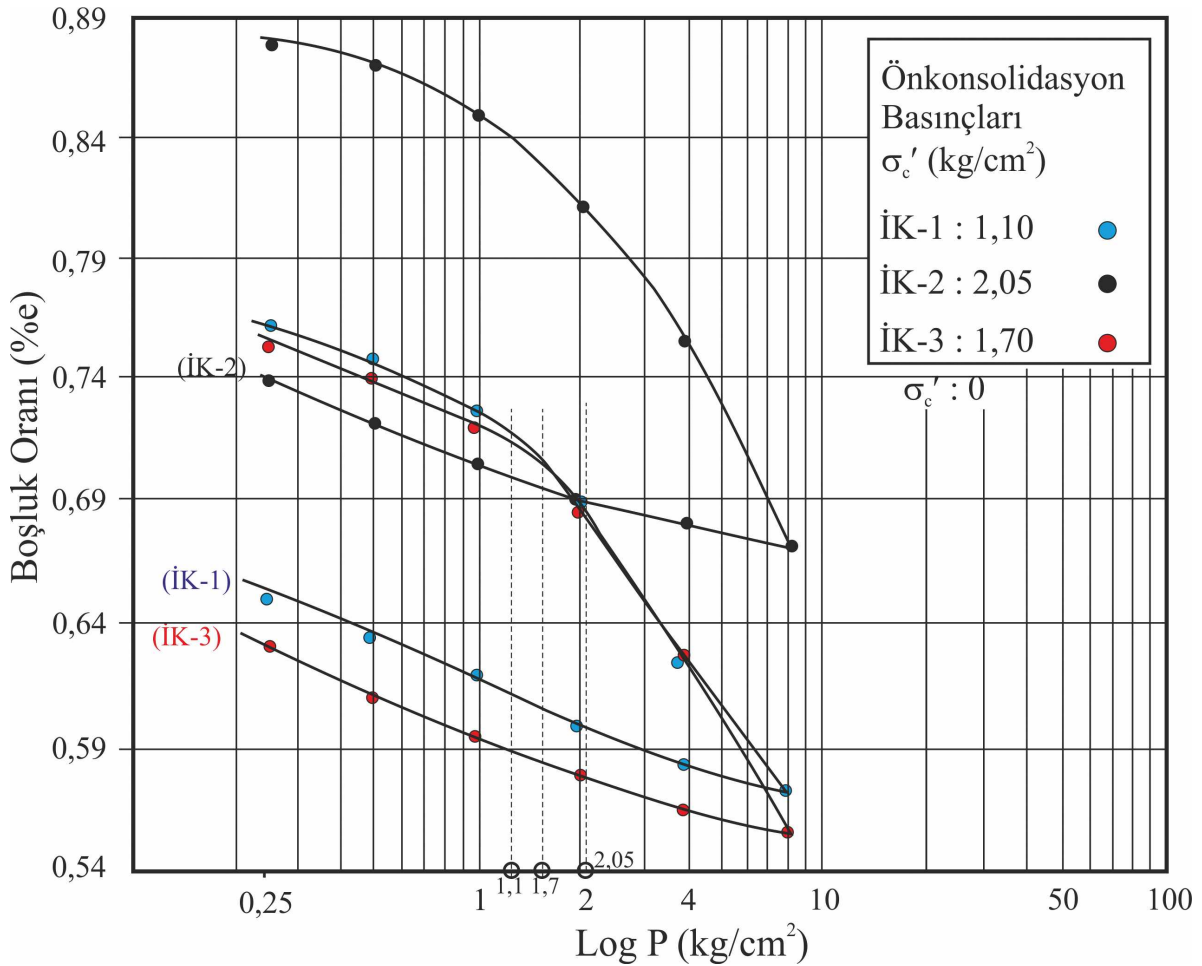
(NK). Her sondaj konumundan elde edilen plastik kil bandı kalınlıkları 2.5 m ve 4.0 m için konsolidasyon oturmaları Eşitlik 3 kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Konsolidasyon

oturmaları minimum 13.42 cm (SK-4'de, $\sigma'_0 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ ve $H_0 = 2.5 \text{ m}$ için), maksimum 56.67 cm (İK-2'de, $\sigma'_0 = 2.0 \text{ kg/cm}^2$, $H_0 = 4.0 \text{ m}$ için) elde edilmiştir.

Çizelge 7. Konsolidasyon deney sonuçları

Table 7. Consolidation test results.

Sondaj no	Başlangıç boşluk oranı (e_0)	Son boşluk oranı (e_s)	Δe	Sıkışma indisi (c_c)
İK-1	0.733	0.594	0.139	0.13
İK-2	0.883	0.672	0.211	0.28
İK-3	0.760	0.557	0.203	0.23



Şekil 14. Boşluk oranı (e)–Log P (kg/cm^2) grafiği.

Figure 14. Void ratio (e)–Log P (kg/cm^2) graph.

Kil bandında meydana gelen oturmalar drenaj boru hattının işlevini tamamen yitirmesine neden olmuştur. Oturmaların sonucunda sedde yamaçlarında kabarma şeklinde gelişen yüzey deformasyonları meydana gelmiştir (Şekil 15). Sedde civarında oluşan deplasmanların önemli bir bölümünün oturma kaynaklı olduğu ortaya çıkmaktadır.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Şubat-2013 ve Nisan-2013 tarihlerinde sürekli, ancak yavaş gelişen kayma hareketinin öncesinde meydana gelen jeoteknik olaylar dizini aşağıda anlatıldığı gibi seyretmiştir. Sedde tabanında, seddenin kretinden maksimum 20 m derinde, 8°-10° batıya eğimli bir şekilde yataklanmış yüksek plastisiteli yumuşak killerde (CH), seddeye ait dolgu yükleri altında 64.5 mm'ye erişen konsolidasyon oturmalarının meydana geldiği tahmin edilmiştir. 2010'dan 2013'e kadar geçen üç yıllık zaman diliminde (seddenin yapımından konsolidasyonunu tamamlamasına kadar geçen zaman diliminde) bu oturmaların büyük bir kısmının tamamlandığı düşünülmüştür.

Yüksek oturmaların sonucunda, sedde yamaçlarında kabarma şeklinde gelişen yüzey deformasyonları ortaya çıkmıştır (Şekil 15). Normal konsolide, yüksek plastisiteli kil bandında meydana gelen oturmaların sonucu olarak, sedde altında yer alan atık su drenaj borularında hasarlar oluşmuştur. Drenaj borularında bükülmeler ve eğrilmeler meydana gelmiş ve zamanla işlevlerini kaybetmişlerdir. Böylece, sedde altından atık su drenajı tam olarak mümkün olamamıştır. Drene edilemeyen katı atık ve yüzey suları sedde gerisinde birikmiştir. Özellikle yağışlı aylar sonrasında, sedde ile katı atık depolama alanı arasında kalan çukurluk bölgede suya doymuş koşulların oluştuğu, su seviyesi ölçümleriyle belirlenmiştir. Buna ek olarak, bu alanın yaz aylarında da bataklık halinde kaldığı gözlenmiştir. Biriken katı atık

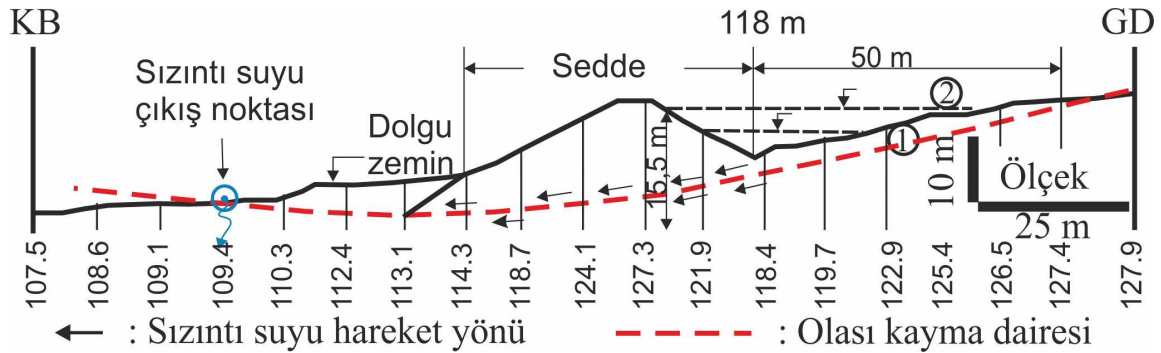
ve yüzey suları sedde arkasında baraj etkisi yapmakta, buna ek olarak, bu sular kontrolsüz bir şekilde kayma dairesi boyunca, hidrolik eğim yönünde KB'ye doğru (ofis binalarına doğru) sızmaktadır. Katı atık ve yüzey suları seddenin ve ana nakliye yolunun altından geçmekte, ofis binalarının arka tarafında yer alan bir dereden deşarj olmaktadır. Rodamin katkılı su kullanarak yapılan boya deneyleri, kayma dairesi boyunca su sızıntılarının olduğunu kanıtlamıştır (Şekil 16).

Su seviyesi, yağışlar öncesinde SK-4 kuyusunda 1.40 m olarak ölçülmüştür. Katı atık düzenli depolama sahası Aralık ve Şubat-2013'te art arda çok yüksek yağışlar almıştır (134 mm ve 132.6 mm). Bu yağışlarla birlikte YASS yüzeye çok yaklaşmış ve 18 Şubat 2013 tarihinde mevcut ortam tamamen suya doymuş zemin koşullarına geçmiştir. Suya doymuş zemin koşullarında, artan boşluk suyu basıncının (u_w) yönü yüzeye doğrudur. Bu nedenle, kayma yüzeyi boyunca gelişen makaslama dayanımında u_w kadar azalmalar meydana gelmiştir ($\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi'$). Bu durum kaymanın nedenlerinden biridir. Buna ek olarak, sedde gerisinde biriken sular baraj etkisi yapmış ve su seviyesinin yükselmesine bağlı olarak artan su basıncının meydana getirdiği ek itki kuvveti ($u_w = 15.5 \times 1.0 = 15.5 \text{ t/m}^2$) seddeyi KB'ye doğru kaydırıcı yönde etkilemiştir (Şekil 16). Sedde gerisinde meydana gelen hidrostatik su basıncının yükselmesi, drene edilemeyen katı atık ve yüzey sularının sedde altındaki yüksek plastisiteli kil bandı üzerinden, hidrolik akım yönünde ana nakliye yoluna ve ofis binalarına doğru sızması (Şekil 16), sedde gerisinde ve altında konumlanmış tüm zeminlerin suya doymuş koşullara erişmesi sonucunda, Şubat-2013'te kütleli başlangıç tepkisi olarak ilk kayma hareketi başlamıştır. 2013 yılı Nisan ve Mayıs aylarında gerçekleştirilen inklinometre ölçümlerinden kayma hareketinin bir süreliğine daha devam ettiği anlaşılmıştır.



Şekil 15. Sedde üzerindeki kabarmalar.

Figure 15. Bucklings on the embankment.



Şekil 16. Sedde gerisinde katı atık sızıntı ve yüzey sularının birikerek baraj etkisi oluşturması, su seviyesinin mevsimsel olarak değişimi (1 ve 2) ve olası kayma dairesinin konumu.

Figure 16. The dam effect due to the accumulated wastewater leakage and surface run-off behind the embankment, the seasonal changes in ground water level (case 1 and 2) and possible location of the circular slip surface.

İK-8 inklinometre kuyusunun yer aldığı basamak şevinde (137 m) yapılan boya deneyi sonuç vermemiştir. Buna karşın, SK-4 ve İK-3 sondaj kuyuları arasındaki çukurluktan (kot: 118 m) dökülen rodaminli su ofis binalarının

gerisindeki dereden 27.11.2016 tarihinde çıkış yapmıştır (Şekil 16). Bu durum, heyelana ait kayma yüzeyinin katı atık şevleri içinden geçmediğine işaret etmektedir. Bir kütle içerisinde çok yumuşak bir kil bandı/tabakası

gibi düşük makaslama dayanamına sahip eğimli, düzlemsel seviyelerin varlığı halinde, kayma düzleminin dairesel olması genellikle beklenmez. Bu tür koşullarda kaymalar, dairesel olmayan, şev tepesine yakın kesimlerde dairesel olarak başlayan ve derinde düzlemsel plastik kil tabakasını takip eden birleşik yüzey boyunca meydana gelir. İnceleme alanına yönelik olarak ikinci bir düşünce, kayma dairesi, F_{12} - fayının aynasını başlangıç olarak alabilir ve daha sonra yüksek plastisiteli kil bandını takip edebilir (kombine bir hareket). İnceleme alanında plastik kil bandının en kalın olduğu zon sedde altıdır. Ofis binalarına doğru ise giderek incelmektedir. Ofis binaları ve ana nakliye yolu yapay dolgu üzerinde yer almaktadır (Şekil 16). Yapay dolgu ile tabii zemin yüzeyi arasında yer alan dokanak boyunca, makaslama gerilmeleri düşüktür. Bu nedenle, kayma dairesi bu dokanaktan çıkarak yüzeyleyebilir. Yukarıda sıralanan etmenler ve presiometre deney verileri dikkate alındığında, kayma dairesinin hafif iç bükey eğri bir yüzey olduğu ortaya çıkmaktadır (Şekil 16). Kayma düzleminin belirlenen konumuna göre, seddenin büyük bir bölümünün kaymayı destekleyen, göreceli daha küçük bir bölümünün de kaymayı engelleyen kayma düzlemi kesitinde yer aldığı görülür. Bu durum, katı atık şevlerinde meydana gelecek olası derin bir taban heyelanında, kayarak hareket edecek sıkıştırılmış katı atıkların ana nakliye yoluna ve ofis binalarına doğru hareketini engelleyici bir işlevinin esasen olmadığını göstermektedir. Aksine, seddenin ağırlık merkezine göre büyük bir bölümü kaymayı destekler konumdadır.

18 Şubat 2013 tarihinde katı atık düzenli depolama sahasında bir kayma hareketi başlamıştır. Hareketle beraber ana nakliye yolunda, ofis binalarında ve seddede deformasyonlar gelişmiştir. 08.03.2013'de açılan üç adet inklinometre kuyusunda yapılan

okumalarda hareket eden kütlelerin yanal yönde KB'ya doğru hareket miktarlarının SK-1, SK-2 ve SK-3 inklinometre kuyularında sırasıyla 53 mm, 64.5 mm ve 35 mm olduğu belirlenmiştir. Bu veriler, başlangıç kayma hareketinden 18 gün sonra da hareketin devam ettiğini göstermektedir. Önceden hareket etmiş kütle, hareketine devam ederken sahada gözlenen deformasyonlar da ivme kazanmıştır. Ancak hareket etmiş kütle, yer değiştirmenin sonucunda, ana nakliye yoluna ve ofis binalarına doğru ilerleyerek herhangi bir yıkıma neden olmamıştır. Daha inklinometre kuyularında okumalar yapılmadan önce, öncelikli çözüme yönelik bir önlemin alınması planlanmıştır. Bu önlem; yağış ve katı atık sızıntı sularının sedde gerisinde birikmesi ve tahliye edilmesiyle kayma hareketinin hızının kesilmesi ve/veya durdurulması ve sedde gerisinde meydana gelen baraj etkisinin ortadan kaldırılmasıdır. Böylece, sedde ile birlikte büyük bir kütlelerin kayma hareketinin hızı kesilecek, belki de hareket durdurulmuş olacaktır. Bu zaman dilimi, kayma hareketinin bir heyelana dönüşmesini (progresif aşamaya geçmesini) engelleyecek, düşünülen diğer önlemlerin alınmasına da imkan sağlayacaktır. Yeraltı su seviyesinin sedde arkasından yaklaşık 50 m geriye kadar, 110–113.1 m kotları arasında kalması nihai sonuç açısından dikkate alınmıştır (Şekil 16). 113.1 m kotu, olası kayma dairesinin yeraltında eriştiği en derin noktadır. Bu fikirler doğrultusunda, seddenin altından yatay delgi yöntemiyle boru geçirilerek sedde gerisinde biriken katı atık sızıntı suları çökeltme havuzuna aktarılmıştır. Çökeltme havuzu ile sedde altından geçirilen boru, bir kanal aracılığıyla birbirine bağlanmıştır. Yatay delgi yöntemiyle sedde altından boru geçirmek suretiyle atık su drenajının sağlanması fikrine alternatif olarak, seddede yarıklar açarak yatay delgi işlemine gerek kalmadan, drenaj borusunun doğrudan döşenmesi de düşünülmüş ancak,

birinci çözüm önerisi uygulamaya geçirilmiştir. Önerilen çözümün etkili olduğu sonraki dönemlerde deformasyonların yavaşlamasından ve 2016 yılında gerçekleştirilen inklinometre okumalarından anlaşılmıştır.

Sedde gerisinde yer alan katı atık şevlerinde bazı hareketlenmeler, seddenin KB'ya bakan yamacında, öncekilere ek olarak gelişmiş kabarma şeklinde deformasyonlar, hareketlerin aynı kayma dairesi boyunca tekrar başladığının bir işareti olup/olmadığı kuşkusunu ortaya çıkartmıştır. 30.09.2016, 19.10.2016 ve 27.10.2016 tarihlerinde yeni inklinometre kuyularında yapılan okumalardan, kayma dairesi üzerinde herhangi bir hareket belirtisinin olmadığı anlaşılmıştır. İnklinometre kuyularında deformasyon ölçümleri Kasım-2016'dan sonra ilk altı ay, birer ay aralıklarla altı adet, daha sonraki zamanlarda, üç ay aralıklarla üç kez gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir hareket belirtisinin olmaması; kayma hareketinin yoğun yağışlarla birlikte başlamış olduğunu, bir süre devam ettiğini ve alınan basit bir önlemlerle (yatay delgi yöntemiyle atık su drenajı) giderek sönümlendiğini göstermektedir. Bu haliyle heyelanın retrogresif bir aşamaya (geriye dönük yenilme aşamasına) geçtiği anlaşılmaktadır. Diğer bir anlatımla, heyelanın retrogresif aşamadan progresif aşamaya (ileriye dönük yenilme aşaması) geçmesi, alınan basit bir önlemlerle bertaraf edilmiştir. Geriye dönük, işlemler mekanizmayı anlamak ve bu mekanizmanın oluşumunda etkin parametreleri ortaya çıkarmak, çözüme giden yolu kısaltmaktadır.

İK-8 inklinometre kuyusu çok zor koşullarda, palye düzeninde yerleştirilmiş ve sıkıştırılmış katı atık şevinde açılmıştır. Yüzeyden 20.6 m sıkıştırılmış katı atık derinliği geçildikten sonra tabii zemin kotunda yer alan ayrılmış aglomeralara girilmiş ve 44.7 m bu

birim içerisinde ilerlenmiştir. Bu kuyuda en zayıf zonun yer aldığı derinlik 40-42 m arası olarak belirlenmiştir (P_L : 11.2-16.27 kg/cm², E_M : 79-94 kg/cm²). Sondaj profilinde katı atık seviyesi geçildikten sonra, doğal zemin seviyesinden 21.4 m derinde bir zayıflık zonuna (olası kayma zonu) erişilmiştir. İK-8'de yüzeyden 40-42 m, SK-4'te 20-23 m ve ofis binalarının hemen altından bir kayma dairesi geçmesi durumunda, çok büyük bir kütle (sıkıştırılmış katı atık+ayrışmış aglomera) hareket etmiş olması gerekirdi. Ancak Şubat-2013 kaymasında hareket eden kütle miktarı son derece sınırlıdır. Bu nedenle, 2013 Şubat ve Nisan aylarında oluşan kayma hareketiyle ilgili, seddenin çok gerisinden başlayan, seddeyi de içine alan olası bir kayma dairesi hipotezi, veriler ışığında muhtemel görünmemektedir. Ancak önceden hareket etmiş bu kütle yeni bir dış etmenle (yoğun yağış, katı atık şevlerinin şev yüksekliklerinin artması, sismik aktivite vb.) tekrar harekete geçebilme potansiyeline sahiptir. Kayma hareketi sonucunda yenilmiş kütleler rezidüel dayanım parametrelerine (c_r , ϕ_r) sahip olurlar. Bu nedenle, kritik denge halindedirler. Kayma hareketinin başlaması, bir süreliğine devam etmesi ve daha sonra hareketin yavaşlayarak durması (kritik dengede stabil bir durum seyretmesi) heyelanın retrogresif bir aşamaya geçtiğine, geçici bir stabilizeye erişmiş olduğuna işaret etmektedir. Söz konusu hareketin progresif bir aşamaya geçmesi bir dış etmenin beklenmedik müdahalesiyle mümkündür. Stabilite analizlerinin sonucunda, sedde önüne, uygun düzende, uygun derinliğe (kayma dairesi altına) soketlenecek beton kazık uygulaması problemin kalıcı çözümüne yönelik radikal bir önlem olacaktır.

KAYNAKLAR

- Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ.E., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, İ., Günay, Y., Güven, İ.H., Hakyemez, H.Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan, Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M.F., Yurtsever, A. 2011. 1:1.250.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara-Türkiye.
- ASTM D2435 – 04, 2013. Standard Test Method for One – Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080–04, 2004. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318 -10e1, 2010. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4719 – 00, 2000. Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils. West Conshohocken, PA.
- ASTM D6230 – 13, 2013. Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe Type Inclinedmeters. West Conshohocken, PA.
- DEÜ, 2016. İzmir Büyükşehir Belediyesi Harmandalı düzenli katı atık depolama sahası sedde önü şev stabilite problemleri ve çöp yığınlarının stabilitesi için değerlendirme ve stabilite önlemleri projesi raporu, Jeoloji Müh. Bölümü, İzmir, 98 s (yayımlanmamış).
- Erdoğan, B., 1990. İzmir-Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. TPJP Bülteni, 2(1), 1-20.
- Günay, G., Erkan, Y., Kocaefe, S., Yeşertener, C., Çağlan, D., Ekmekçi, M., Erduran, B., Akkuş, N., Varol, Z., 1990. İzmir-Harmandalı Çöp Depolama Alanı Zemin Araştırmaları Raporu. Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara, 40 s (yayımlanmamış).
- Holtz, R.D., Kovacs, D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall Inc., New Jersey, 736 p.
- Kıncal, C., Kadakçı Koca, T., Koca, M.Y., 2017. Jeolojik bariyer olarak faylar, örnek çalışma: Çiğli Evka-5 heyelanı (İzmir). Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 41, 1–30.
- Koca, M. Y., 1999. İzmir yöresinde andezitlerin bozunma ürünü killerin oluşum şekilleri ve mühendislik özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 42 (2), 39–49.
- Koca, M.Y., Türk, N., 1994. Ayrışmanın andezitlerin petrografik, kimyasal ve jeomekanik etkisi. Türkiye Jeoloji Kurultayı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, 373–382.
- Mikkelsen, P. E., 1996. Field instrumentation. Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report (Editors: A. K. Turner and L. Schuster), Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 278–318.

$V_{s(30)}$ Tabanlı Yerel Zemin Koşulları ve Deprem Hasar İlişkisi: Van-Abdurrahmangazi Örneği

$V_{s(30)}$ Based Local Soil Conditions and Earthquake Damage Relationship Van-Abdurrahmangazi Example

Zeynep AYKAÇ¹ , Muge K. AKIN² , Ali Fırat ÇABALAR³ 

¹ Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Erciş Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Van

² Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Kayseri

³ Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gaziantep

Geliş (Received): 14 Nisan (April) 2021 / Düzeltme (Revised): 11 Haziran (June) 2021/ Kabul (Accepted): 21 Haziran (June) 2021

ÖZ

Depremlerin sebep olduğu afet riskinin en aza indirilebilmesi için sadece il ve ilçe bazlı çalışmaların değil aynı zamanda mahalle ve köy gibi küçük bölgeleri kapsayan çalışmaların da yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada Van ilinde 2011 yılında 23 Ekim ve 09 Kasım tarihlerinde gerçekleşen iki depremde yüksek oranda hasar gören mahallelerden biri olan Abdurrahmangazi Mahallesi incelenmiştir. Çalışma alanında yer alan yapılarındaki bina koşulları ile mahallenin bulunduğu alanda yer alan zemin koşulları birlikte ele alınmıştır. Zeminlerin dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için kayma dalgası hızı (V_s) kullanılmıştır. Çalışma alanında yapılmış sondaj verileri değerlendirilip SPT-N ile V_s ilişkisi için bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen 5 farklı ampirik bağıntı kullanılarak kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak $V_{s(30)}$ değerleri belirlenmiş ve National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP-2000), EUROCODE-8, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)'e göre zemin sınıflandırmaları yapılmıştır. Ayrıca yeni deprem yönetmeliği olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) de dikkate alınmıştır. Bina hasar durumları ile mahallenin bulunduğu alanda yer alan zemin koşulları birlikte değerlendirilmiştir. Depremler sonrasında oluşan bina hasarlarının bu mahalle için zemin koşullarına bağlı olmadan yapısal eksikliklerden ve yapı kalitesinden kaynaklandığı belirlenmiş ve hasar dağılımları bu doğrultuda yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: 2011 Van Depremleri, Yapısal Hasar, Zemin Koşulları, NEHRP-2000, EUROCODE-8, DBYBHY-2007, TBDY-2018

ABSTRACT

In order to minimize the disaster risk caused by earthquakes, not only province and district-based studies, but also studies covering small areas such as neighborhoods and villages should be carried out. In this study, Abdurrahmangazi Neighborhood, one of the districts that was severely damaged by two earthquakes that took place on 23 October and 09 November 2011 in the province of Van, was examined. The building conditions and the ground conditions in the study area where the quarter is located have been considered together. Shear wave velocity (V_s) was used to determine the dynamic behavior of soils. The borehole data obtained in the study area were evaluated and the shear wave velocities were determined by using 5 different empirical relations developed by some researchers for the

relationship between SPT-N and V_s . Using these, $V_{S(30)}$ values were determined and ground classifications were made according to the National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP-2000), EUROCODE-8, the Regulation on Buildings to be Built in Earthquake Zones (DBYBHY-2007). In addition, the new earthquake regulations is Turkey Earthquake Building Regulations (TBDY-2018) were also considered. The building damage conditions and the ground conditions in the area where the quarter is located were evaluated together. It was determined that the building damages after earthquakes were caused by structural deficiencies and building quality for this neighborhood, regardless of the ground conditions, and damage distributions were interpreted accordingly.

Keywords: 2011 Van Earthquakes, Structural Damage, Ground Conditions, NEHRP-2000, EUROCODE-8, DBYBHY-2007, TBDY-2018

GİRİŞ

Van Gölü Havzası, Doğu Anadolu Fayı ile Kuzey Anadolu Fayı'nın kesiştiği bölgede yer almaktadır. Bu durum Van ilinin deprem değerlendirmesi açısından önemli bir yeri olduğunu göstermektedir. Aktif olan bu faylar Van ilinde Türkiye'nin en büyük depremleri arasına giren birçok depremin meydana gelmesine sebep olmuştur. Ayrıca Van ili ve çevresinde yer alan yerleşim birimlerinde genellikle yumuşak zeminlerin olması, bölgede geçmişteki yıllarda yıkıcı depremlerin yaşanmasına sebep olmuştur. 1976 Çaldıran ($M_w=7.3$), 1988 Van Gölü ($M_w=5.4$), 1999 Erçiş ($M_w=3.8$), 2000 Gevaş ($M_w=5.3$), 2001 Edremit ($M_w=4.7$), 2011 Tabanlı ($M_w=7.2$), 2011 Edremit ($M_w=5.6$), 2020 Saray ($M_w=5.4$) depremleri bunlardan bazılarıdır (AFAD, 2011; KOERİ, 2012; Selçuk ve Üner, 2020).

23 Ekim 2011 tarihinde Tabanlı Köyü'nde saat 13.41'de meydana gelen 7.2 büyüklüğündeki depremden sonra 09 Kasım 2011 saat 21.23'te dış merkezi Edremit ilçesi olan 5.6 büyüklüğünde bir deprem daha meydana gelmiştir. AFAD'dan elde edilen verilere göre bu depremler sonucunda 644 kişi hayatını kaybetmiş, 1966 kişi yaralanmış ve 17005 bina yıkılmış veya ağır hasar görmüştür (AFAD, 2011). 23 Ekim 2011 tarihli Tabanlı depremiyle başlayıp 30 Kasım 2011 Kevenli depremiyle devam eden süre içinde toplam 5281 deprem kayıt edilmiştir (KOERİ, 2012). Van ili

yerleşim alanında meydana gelen hasarın büyük çoğunluğu 9 Kasım 2011 depremine bağlı olarak oluşmuştur. İlk depremde hasar gören yapıların bir kısmı bu depremde yıkılırken, hasar görmemiş binaların bir kısmı da hasar görüp kullanılamaz hale gelmiştir. Bu depremlerden sonra yetkililer tarafından Van ili için hasar dağılımı yapılmıştır. Bu hasar dağılımına göre gerek yapı kalitesi ve gerekse zemin koşulları açısından hasarın etkileri Van ili merkez mahallerinde farklı şekilde gözlenmiştir. Van il merkezi eski göl-akarsu çökelleri üzerinde bulunmasından dolayı 2011 Van depremlerine bağlı olarak farklı hasarların oluşmasına neden olmuştur (Kızılkıran vd., 2011; Aydan vd., 2012; Akın vd., 2015; Aykaç, 2016).

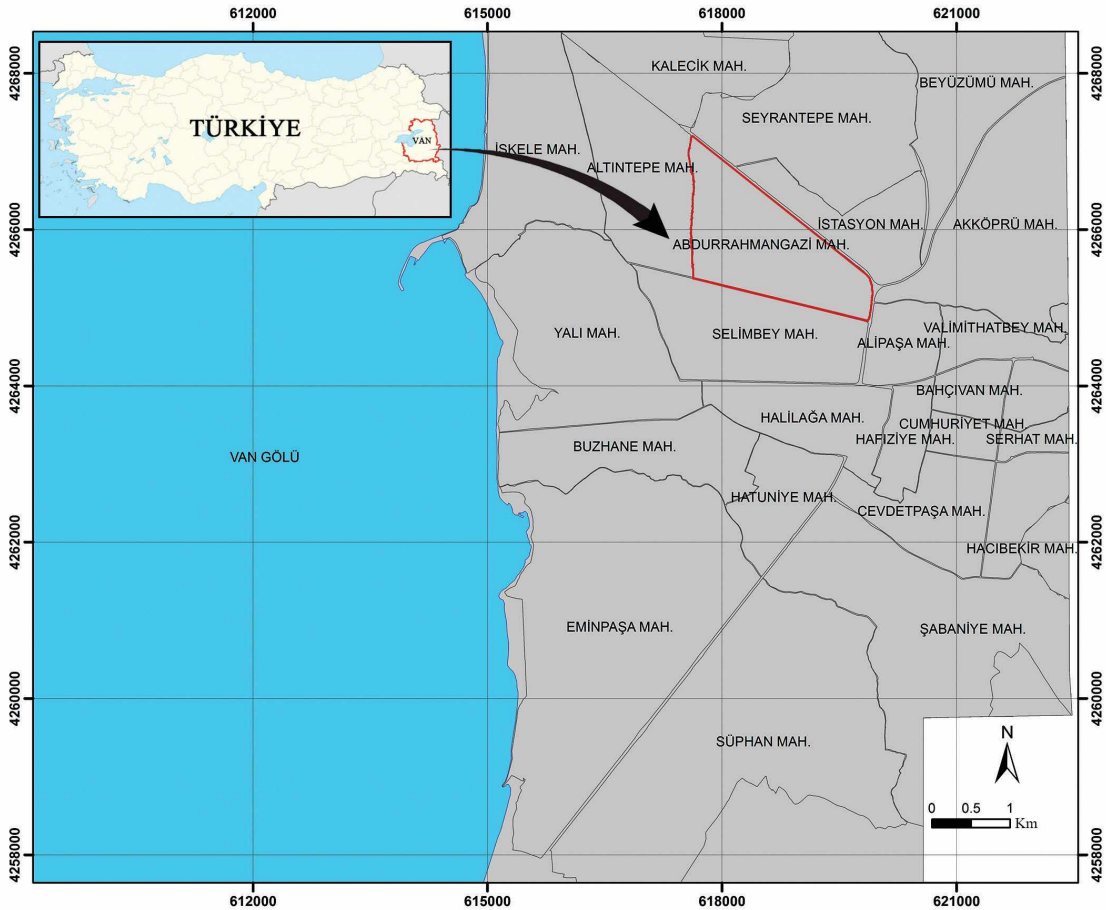
Bu depremler, zeminlerin incelenmesi ve gerekli mühendislik jeolojisi çalışmalarının yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada hasar dağılımı Van il merkezinde Abdurrahmangazi Mahallesi için incelenmiştir. İncelenen bu mahallede yer alan yapılardaki bina koşulları ile mahallenin bulunduğu alanda yer alan zemin koşulları birlikte değerlendirilmiştir.

ÇALIŞMA ALANI GENEL ÖZELLİKLERİ VE HASAR DAĞILIMI

Van ili Türkiye'nin doğusunda $38^{\circ}32'31''\text{K}$ $43^{\circ}36'05''\text{D}$ / 38.542°K 43.6015°D koordinatlarında yer almaktadır. Çalışma alanı

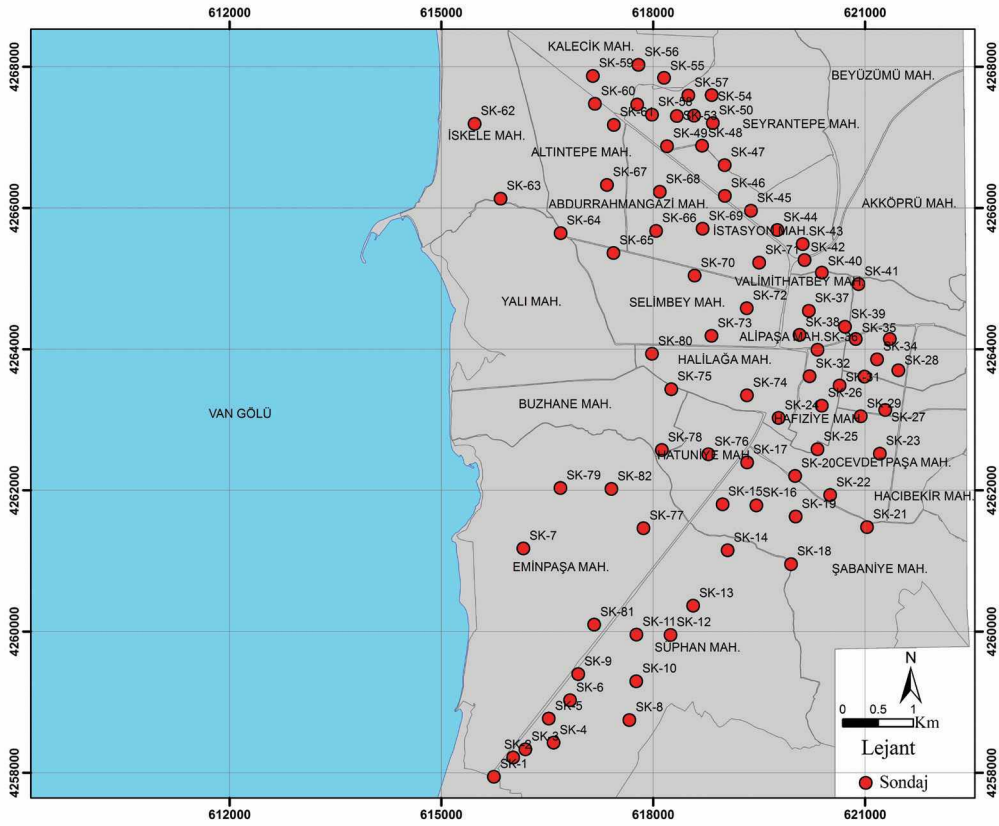
olan Abdurrahmangazi Mahallesi ise Van ili kuzey batısında yer almaktadır (Şekil 1). Yüzölçümü 2833 km² olan mahalle 2019 yılında yapılan nüfus sayımında 18462 kişi ile Tuşba ilçesindeki en yoğun mahallelerden biri olmuştur (URL-1). Depremin meydana geldiği Van Gölü Havzası Doğu Anadolu Platosu'nda yer almaktadır. Bu plato Avrasya ve Arap plakaları arasında gerçekleşen çarpışmanın sonucu olarak oluşmuştur. (Şengör ve Kidd, 1979; Şengör ve Yılmaz, 1981; Köse, 2004; Köse, 2005).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yapılan 82 sondaj verisinden Abdurrahmangazi Mahallesi sınırları içerisinde ve sınıra yakın yer alan sondajlar zemin koşullarını belirlemek amacı ile değerlendirilmiştir (Şekil 2). Mahalle sınırları içinde yer alan sondaj kuyuları incelendiğinde Abdurrahmangazi mahallesinin genel olarak killi birimlerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Yeraltı su seviyesinin de 4.3 ile 10.2 m arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı yerbulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.



Şekil 2. Sondaj dağılımı haritası (Aykaç, 2016).

Figure 2. Borehole distribution map (Aykaç, 2016).

2011 depremleri sonrası resmi kurumlar tarafından binalarda oluşan yapısal hasarlar yıkık-ağır hasarlı, orta hasarlı, az hasarlı, hasarsız olmak üzere dört gruba ayrılmıştır (AFAD, 2011). Taşıyıcı sisteminde herhangi bir hasar olmayıp; sadece yüzeysel etkiler (sıva çatlağı, sıva dökülmesi vb.) almış binalar “az hasarlı”; taşıyıcı sisteminde oluşan hasarlar onarılabilir olarak güvenli olarak adlandırılacak düzeye getirilebilecek derecede hasarı bulunan binalar “orta hasarlı” olarak sınıflandırılmıştır. Tamamen veya kısmen göçen ve zemin kaynaklı (devrilme, eğilme, batma vb.) sebeplerden onarılamayacak kadar zarar görmüş olan yapılar ise “yıkık-ağır hasarlı” olarak sınıflandırılmıştır

(AFAD, 2011). Van İl Afet Müdürlüğü ve Van Büyükşehir Belediyesinden elde edilen veriler değerlendirildiğinde (Çizelge 1), ağır hasarlı olarak tespit edilen konutlar yaklaşık olarak Abdurrahmangazi mahallesi konut sayısının %13.1’i olarak belirlenirken, orta hasarlı ve az hasarlı oranının toplamı % 45.4 ve hasarsız oranı ise %19’dur. Konut sayısının %22.5’lik oranının ise herhangi bir değerlendirmesi yapılamamıştır. Oluşan hasarların büyük bir kısmı “yığma yapı” olarak adlandırdığımız yapılarda meydana gelmiştir. “Betonarme” yapılarda yıkık oranı %0.6 gibi düşük bir oranı oluşturmaktadır.

Çizelge 1. Abdurrahmangazi Mahallesi yapı hasar dağılımı.

Table 1. Building damage distribution of Abdurrahmangazi.

Yapı hasar durumu/ Kullanım şekli	Hasarsız	Az Hasarlı	Orta Hasarlı	Ağır Yıkık	Değerlendirilmeyen	Toplam
Konut	648	1310	256	452	775	3441
İşyeri	63	224	45	21	47	400
Ticarethane	14	49	6	7	57	133
Depo	27	60	14	15	55	171
Ahır	7	3	0	6	1	17
Diğer		8			6	14
Metruk					2	2
Tespit Edilemeyen					41	41
Toplam	752	1643	321	495	934	4145

Mahallenin yapı hasar durumlarını gösteren Şekil 3 incelendiğinde “Az Hasarlı-Orta Hasarlı (Moderately damaged)” yapıları temsil eden rengin “beyaz”, “Ağır hasarlı (Heavily damaged)” yapıları temsil eden rengin “turuncu” ve “yıkılmış (Collapsed)” yapıları temsil eden rengin “kırmızı” olduğu görülmektedir. Kırmızı rengin ifade ettiği yıkılmış binaların genel olarak mahallenin inceleme alanının güneyinde yer aldığı ve mahallenin hasar dağılımının ağırlıklı olarak turuncu renkte olduğu görülmektedir.

METOT

Depremlerde yapıların üzerinde bulundukları zeminin koşulları; yapıları etkileyen depremin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle yapılarda oluşabilecek hasarları tahmin etmek için önemli aşamalardan biri de; yapılan çalışmalarda zemin tabakalarının etkisinin belirlenmesidir. Zemin tabakalarının etkisi zemin tabakalarının cinsine, kalınlıklarına ve yeraltı su seviyesine bağlı olarak değişir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için inceleme alanında daha önce

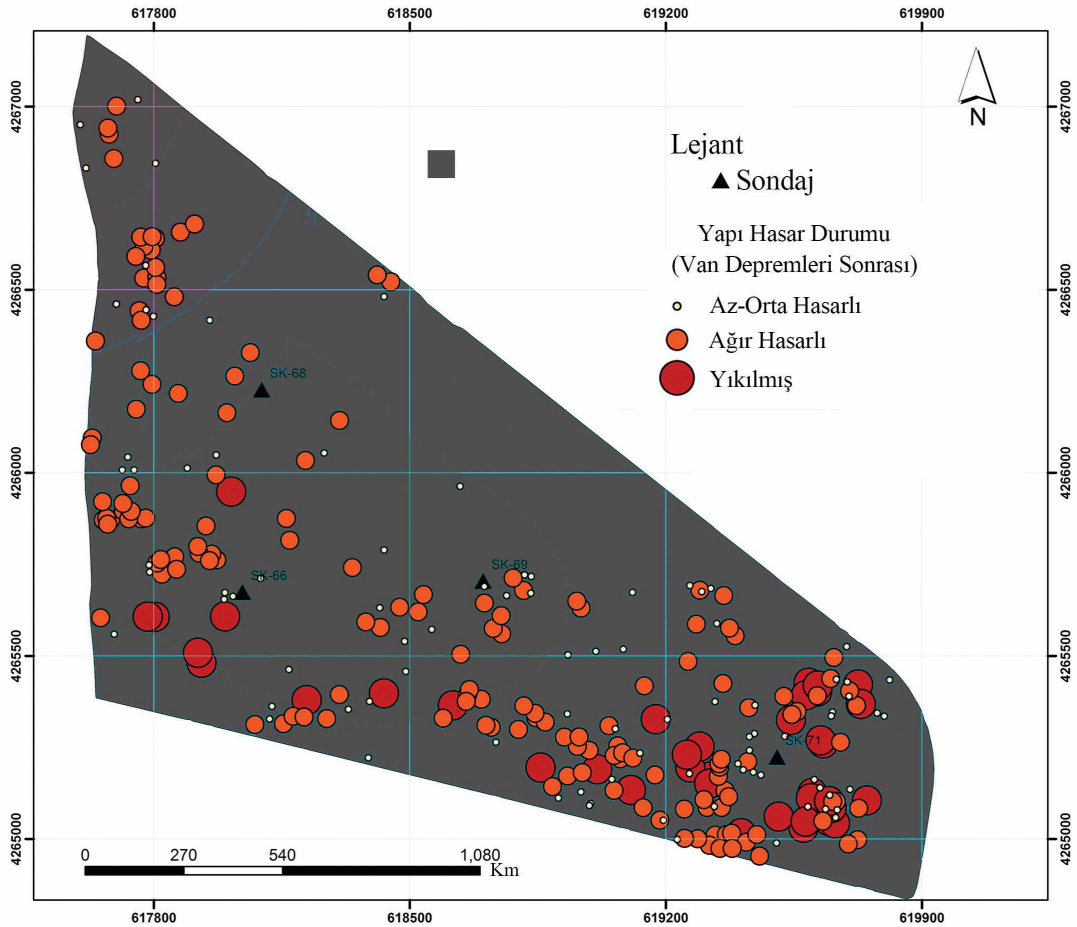
yapılmış veya yeni yapılacak sondajlar sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilebilir. Zeminlerin dinamik davranışında önemli bir rol oynayan kayma dalgası hızı yerinde ölçülerek veya SPT-N sayısı kullanılarak belirlenir. Ancak kayma dalgası hızının yerinde ölçüm çalışmaları hem ekonomik hem de zaman açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bu sıkıntının ortadan kaldırılması için, kayma dalgası hızının arazi penetrasyon deneylerinden hesaplanması doğrultusunda bağıntılar geliştirilmiştir. Bu yüzden pratikte kayma dalgası hızları çoğunlukla, SPT-N sayıları ile hesaplanır. (Ohsaki ve Iwasaki, 1973; Ohta ve Goto, 1978; İyisan, 1996; Hasançebi ve Ulusay, 2007; Akın vd., 2011).

Bu çalışmada, çalışma alanının kapsadığı bölgede yapılmış sondaj logları kullanılmıştır. Bu loglardaki ilk 1.5 m den başlayıp 20 m derine kadar yapılan SPT’ler incelenmiştir. SPT-N değerlerinin 11 ile 38 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. SPT deneyi sonucunda elde edilen bilgiler genel olarak; sınıflandırma ve zeminin sıklık derecesinin belirlenmesi için kullanılır. Ayrıca buna ek olarak; darbe sayısı

(N) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasında kurulan korelasyonlar açısından da yararlı olmaktadır. Kayma dalga hızı (V_s), zeminlerin dinamik özelliklerini tanımlamak için gerekli olan temel bir parametredir. Kayma dalga hızının belirlenmesi, zemin sınıflandırması, sıvılaşma potansiyeli, zemin hâkim periyodu ve büyütme değerlerinin hesaplanmasında önemlidir.

Van ili merkezinde çeşitli noktalarda yapılmış sondaj verilerinden inceleme alanı

sınırları içinde kalanlar değerlendirilip SPT-N ile kayma dalgası hızı (V_s) ilişkisi için bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen ampirik bağıntılardan faydalanılarak kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında SPT-N ile V_s hızı arasındaki ilişki için, Ohsaki ve Iwasaki (1973), Ohta ve Goto (1978), İyisan (1996), Hasançebi ve Ulusay (2007) ve Akın vd. (2011)' in tüm zeminler için geçerli olan bağıntıları kullanılmıştır. Bu bağıntılar Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma alanı yapı hasar dağılımı (Aykaç, 2016).

Figure 3. Building damage distribution map of the study area (Aykaç, 2016).

Çizelge 2. Araştırmacılar tarafından geliştirilen ampirik bağıntılardan SPT-N ile V_s ilişkisi.

Table 2. The relationship between SPT-N and V_s from the empirical relations developed by the researchers.

Araştırmacı	V_s (m/s) (Tüm Zeminler)
Ohsaki ve Iwasaki (1973)	$V_s = 81.4N^{0.39}$
Ohta ve Goto (1978)	$V_s = 85.35N^{0.348}$
Iyisan (1996)	$V_s = 51.5N^{0.516}$
Hasançebi ve Ulusay (2007)	$V_s = 90N^{0.309}$
Akın vd. (2011)	$V_s = 59.44N^{0.109}Z^{0.426}$

(N: darbe sayısı, V_s : kayma dalgası hızı, z: derinlik)

Zemin sınıflandırması genel olarak, kayma dalga hızının ($V_{s(30)}$) 30 m derinliğe kadar olan ortalama hızına ($V_{s(30)}$) dayanmaktadır. Çalışma kapsamında ilk olarak Çizelge 2’de yer alan araştırmacıların tüm zeminler için geçerli olan bağıntıları kullanılarak V_s değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan V_s değerleri kullanılarak zemin sınıflandırılması için gerekli olan $V_{s(30)}$ değerlerinin hesaplanması yapılmıştır. Bunun için; Boore (2004) tarafından geliştirilen $V_{s(30)}$ ve $V_{s(d)}$ arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitlik (1) kullanılmıştır.

$$\log V_{s(30)} = a + b \log V_{s(d)} \quad (1)$$

Burada a açıklayıcı (bağımsız) değişken ve b bağımlı değişkendir. Bu değişkenlerin derinliklere (d) bağlı olarak aldığı değerler Çizelge 3’te verilmiştir. Böylece, $V_{s(d)}$ değerlerini kullanarak derinliği 30 m’den az ve 10 m’den büyük olan alanlar için $V_{s(30)}$ belirlenmiş olacaktır.

Çizelge 3. Eşitlik 1’in katsayıları (Boore, 2004).

Table 3. The coefficients of Equation 1 (Boore, 2004).

d	a	b
10	4.2062E-02	1.0292E+00
11	2.2140E-02	1.0341E+00
12	1.2571E-02	1.0352E+00
13	1.4186E-02	1.0318E+00
14	1.2300E-02	1.0297E+00
15	1.3795E-02	1.0263E+00
16	1.3893E-02	1.0237E+00
17	1.9565E-02	1.0190E+00
18	2.4879E-02	1.0144E+00
19	2.5614E-02	1.0117E+00
20	2.5439E-02	1.0095E+00
21	2.5311E-02	1.0072E+00
22	2.6900E-02	1.0044E+00
23	2.2207E-02	1.0042E+00
24	1.6891E-02	1.0043E+00
25	1.1483E-02	1.0045E+00
26	6.5646E-02	1.0045E+00
27	2.5193E-02	1.0043E+00
28	7.7322E-02	1.0031E+00
29	4.3143E-02	1.0015E+00

Araştırmacıların SPT-N ve V_s hız dağılımı için geliştirdiği bağıntılar kullanılarak elde edilen S-dalgası hız değerleri kullanarak oluşturulacak zemin sınıflandırmaları için çeşitli sınıflama kriterleri mevcuttur. Bu çalışmada; Ulusal Deprem Tehlike Azaltma Programı (National Earthquake Hazard Reduction Program-NEHRP), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007), ve EUROCODE-8'e göre zemin sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Ayrıca 2018'da yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) de dikkate alınarak ilgili yerel zemin sınıflamasına uygun olarak da değerlendirme yapılmıştır.

Ulusal Deprem Tehlike Azaltma Programı (NEHRP), yeni binaların ve diğer yapıların depreme dayanıklı tasarım ve inşası için uyulması gereken koşulları belirleyen, Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen bir yönetmeliktir. NEHRP; 30 metre derinliğe kadar olan ortalama kayma dalgası hızına (V_{s30}) dayanan bir zemin sınıflandırma sistemidir (Çizelge 4).

Deprem yer hareketlerinde olası zemin davranışlarını daha ayrıntılı ortaya koyabilmek için D sınıfına karşılık gelen $180 < V_s < 360$ m/s aralığının kendi içinde bölünebileceği önerilmiştir (BSSC, 2003). Buna göre D sınıfı;

$$D1 \quad 300 < V_s \leq 360 \text{ m/s}$$

$$D2 \quad 250 < V_s \leq 300 \text{ m/s}$$

$$D3 \quad 220 < V_s \leq 250 \text{ m/s}$$

$$D4 \quad 200 < V_s \leq 220 \text{ m/s}$$

$$D5 \quad 180 < V_s \leq 200 \text{ m/s}$$

gibi aralıklarda verilmiştir. Bu çalışmada da bu bölümlere dikkate alınmış ve zemin sınıflandırması buna göre yapılmıştır.

EUROCODE-8 (Çizelge 5) tarafından önerilen zemin sınıflandırmayı yönetmeliği, NEHRP sınıflandırmasına oldukça benzemektedir. EUROCODE-8 zemin sınıflarının tanımlamaları incelendiğinde NEHRP'e oranla daha detaylı tanımlamaların olduğu görülmektedir

Çizelge 4. NEHRP'de yer alan zemin sınıf tanımları (BSSC, 2003).

Table 4. Definition of NEHRP site classes (BSSC, 2003).

Zemin Sınıfı	Genel açıklama	$V_{s(30)}$ (m/s)
A	Sert kaya	> 1500
B	Kaya	$760 < V_s \leq 1500$
C	Çok yoğun toprak ve yumuşak kaya	$360 < V_s \leq 760$
D	Sert toprak	$180 \leq V_s \leq 360$
E	Toprak veya 3 m'den fazla yumuşak kil içeren herhangi bir profil,	≤ 180

Çizelge 5. EUROCODE-8'deki zemin sınıfı tanımları (TS EN, 2003).

Table 5. Definition of EUROCODE-8 site classes (TS EN, 2003).

Zemin Sınıfı	Genel Açıklama	$V_{s(30)}$ (m/s)
A	Kaya veya kaya benzeri jeolojik oluşumlar	>800
B	Çok yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil	$360 < V_s \leq 800$
C	Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri	$180 \leq V_s \leq 360$
D	Gevşek-orta az kohezyonlu toprak birikimi	≤ 180
E	C veya D tipi V_s değerlerine sahip bir yüzey alüvyon tabakasından oluşan bir toprak profili	

Çizelge 6. DBYBHY-2007'de alt sınıf tanımları (DBYBHY, 2007).

Table 6. Subclass definitions of DBYBHY-2007 (DBYBHY, 2007).

Alt Sınıflar	Litolojik Tanımlar	N	V_s (m/s)	q_u (kPa)
A	Kaya grubu 1	-	>1000	>1000
	Çok yoğun kum, çakıl vb.	>50	>700	-
	Sert kil, siltli kil vb.	>32	>700	>400
B	Kaya grubu 1	-	700-1000	500-1000
	Yoğun kum, çakıl, vb	30-50	400-700	-
	Çok sert kil, silt vb	16-32	300-700	200-400
C	Kaya grubu 3	-	400-700	< 500
	Orta yoğun kum, çakıl, vb.	10-30	200-400	-
	Sert kil, siltli kil vb.	8-16	200-300	100-200
D	Yüksek su tablalı, yumuşak derin alüvyon tabaka	-	< 200	-
	Gevşek kum, çakıl vb.	< 10	< 200	-
	Yumuşak kil, siltli kil vb.	< 8	< 200	< 100

DBYBHY-2007 sınıflandırması, NEHRP ve EUROCODE-8'den çok farklı bir sınıflandırma sistemine sahiptir. Zemin sınıfı, sığ toprak veya kayaların kalınlığı kullanılarak litolojik tanımlara ve V_s , N veya q_u (serbest basınç dayanımı) için ölçülen değerlere göre kategorize

edilerek belirlenir. Bu kategoriler alt sınıf olarak adlandırılır. Alt sınıflara yönelik litolojik, geoteknik ve sismik tanımlar Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelge 6'daki alt sınıf ve kalınlığı en az 3 m olan bir alan Çizelge 7'de verilen tanımlara göre sınıflandırılmıştır.

Çizelge 7. DBYBHY-2007’de yerel zemin sınıfı tanımları (DBYBHY, 2007).

Table 7. Definition of DBYBHY-2007 site classes (DBYBHY, 2007).

Yerel Zemin Sınıflandırması	Alt zemin sınıfları
Z1	Altsınıf (A) zemini Altsınıf (B) zemini $h1 \leq 15$ m
Z2	Altsınıf (B) zemini $h1 > 15$ m Altsınıf (C) zemini $h1 \leq 15$ m
Z3	Altsınıf (C) zemini $15 \text{ m} < h1 \leq 50$ m Altsınıf (D) zemini $h1 \leq 10$ m
Z4	Altsınıf (C) zemini $h1 > 50$ m Altsınıf (D) zemini $h1 > 10$ m

(h1: en üst zemin tabaka kalınlığı)

Çizelge 8. Yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018).

Table 8. Definition of local site classes (TBDY, 2018).

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60(30)})$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	$50 >$	> 250
ZD	Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak-katı kil tabakaları $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller.	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY-2018) yer alan deprem tasarım spektrumlarının tanımlanmasında esas alınacak yerel zemin sınıfları için Çizelge 8’de verilen

yerel zemin sınıfları kullanılmaktadır. İlgili yerel zemin sınıfları üst 30 metrede yer alan ortalama $V_{s(30)}$, $N_{60(30)}$ ve $c_{u(30)}$ (kohezyon) değerlerini dikkate alarak sınıflama sağlamaktadır.

$V_{s(30)}$ DAĞILIM HARİTALARI VE ZEMİN SINIFLANDIRMA

Çizelge 2'de verilen bağıntılar kullanılarak, ilk olarak mahalle sınırları içinde yer alan sondaj verilerinin V_s değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu V_s değerleri kullanılarak $V_{s(30)}$ değerleri hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 9'da verilmiştir. Hesaplanan bu değerlerin 240 ile 360 m/s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Bu değerlerden faydalanılarak her araştırmacı için zemin sınıfları tespit edilmiştir (Çizelge 10). Buna ek olarak her bir araştırmacı için $V_{s(30)}$ hız dağılım haritaları çizilmiş ve hız dağılım haritaları üzerinde hasar dağılımlarına da yer verilerek karşılaştırılma yapılmıştır. Çizilen haritalarda mahalle sınırları içinde yer alan dört sondaj verisinin yanısıra diğer 82 sondajdan mahalle sınırına yakın bölgelerde yer alan sondajlara ait veriler de kullanılmıştır. Ayrıca yakın sondaj değerleri birlikte ele alınarak haritalar hazırlanmış ve belirlenen uygun değer

aralıklarına göre renk zonları oluşturulmuştur.

Ohsaki ve Iwasaki (1973) Yaklaşımı

Ohsaki ve Iwasaki (1973) bağıntısı kullanılarak hesaplanan V_s değerlerinin 270 ile 360 m/s arasında değiştiği belirlenmiştir. Hesaplanan bu değerler ile elde edilen $V_{s(30)}$ hız dağılım haritası incelendiğinde inceleme alanının orta kesiminde yani merkezinde, $V_{s(30)}$ en küçük değer olan 300 değerini alırken, mahallenin güney doğu kesimi ise en yüksek değer olan 350 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4). Bu değerler göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmalarda; NEHRP-2000 zemin sınıfı D1 ve D2, EUROCODE-8 zemin sınıfı C, DBYBHY-2007 zemin sınıfı ise C- Z3 olarak belirlenmiştir. TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZD grubu orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını içeren zemin grubunda yer almaktadır

Çizelge 9. Çizelge 2 kullanılarak hesaplanan $V_{s(30)}$ değerleri.

Table 9. $V_{s(30)}$ values calculated using Table 2.

Sondaj	Derinlik (m)	YASS (m)	Ohsaki ve Iwasaki (1973)	Ohta ve Goto (1978)	Iyisan (1996)	Hasançebi ve Ulusay (2007)	Akın vd. (2011)
SK-66	20	4.3	302	279	281	261	275
SK-68	20	6.5	296	273	273	256	273
SK-69	20	6.3	277	258	251	243	269
SK-71	20	10.2	357	323	349	297	289

Çizelge 10. V_{s(30)} değerleri ile belirlenen zemin sınıfları.

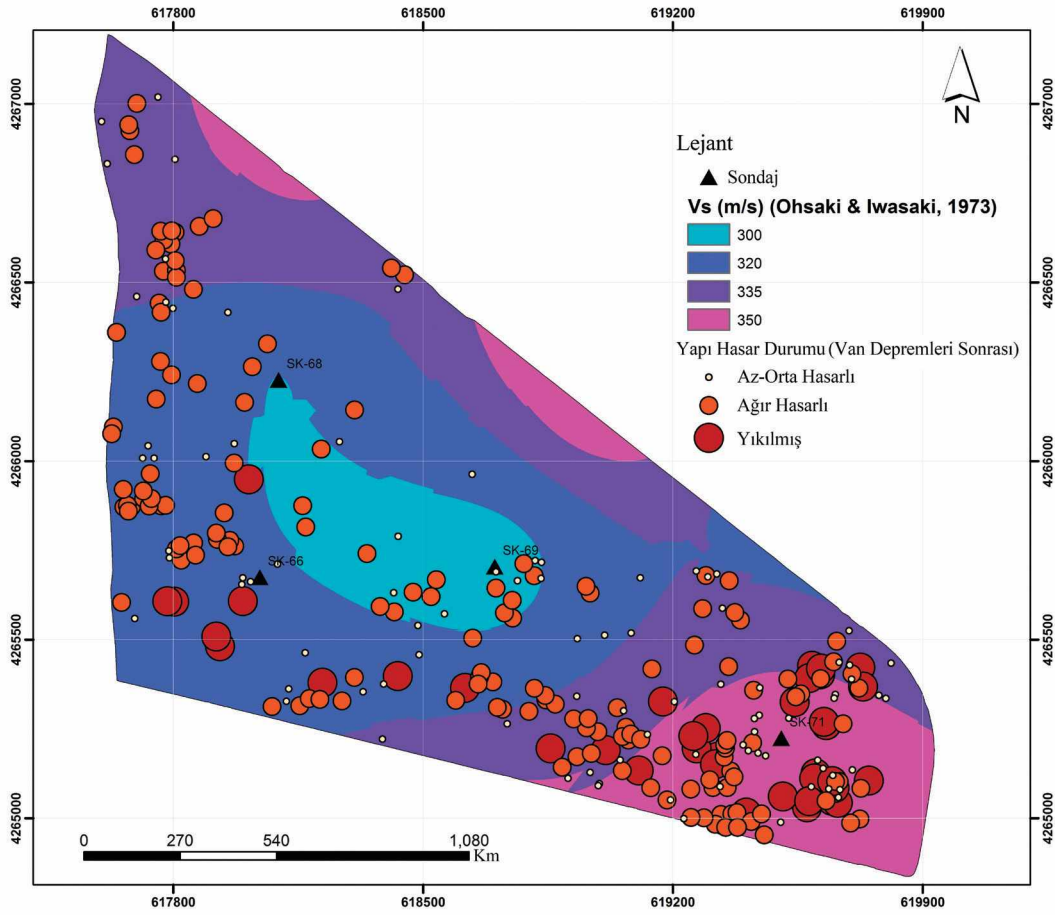
Table 10. Site classes determined by V_{s(30)} values.

	NEHRP	EUROCODE-8	DBYBHY-2007	TBDY-2018
Ohsaki ve Iwasaki (1973)	D1-D2 (Sert toprak)	C (Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri)	C-Z3 (Orta yoğun kum, çakıl, vb.)	ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları)
Ohta ve Goto (1978)	D1-D2 (Sert toprak)	C (Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri)	C-Z3 (Orta yoğun kum, çakıl, vb.)	ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları)
Iyisan (1996)	D1-D2 (Sert toprak)	C (Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri)	C-Z3 (Orta yoğun kum, çakıl, vb.)	ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları)
Hasançebi ve Ulusay (2007)	D2-D3 (Sert toprak)	C (Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri)	C-Z3 (Orta yoğun kum, çakıl, vb.)	ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları)
Akın vd. (2011)	D2 (Sert toprak)	C (Yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya çok elenmiş kil birikintileri)	C-Z3 (Orta yoğun kum, çakıl, vb.)	ZD (Orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları)

Ohta ve Goto (1978) Yaklaşımı

V_s değerlerinin hesaplanması için kullanılan bir diğer bağıntı olan Ohta ve Goto (1978) bağıntısında V_s değerleri 250 ile 325 m/s arasında hesaplanmıştır. İnceleme alanı olan mahallenin merkezi ve merkezinin batı kesimi küçük renk zonu değeri olan 285 m/s olarak belirlenirken, mahallenin güney doğu kesimi ise en yüksek değer olan 315 m/s'ten büyük

olarak 323 m/s olarak hesaplanmıştır (Şekil 5). Bu değerler göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmalarda; NEHRP-2000 zemin sınıfı D1 ve D2, EUROCODE-8 zemin sınıfı C, DBYBHY-2007 zemin sınıfı ise C- Z3 olarak belirlenmiştir. TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZD grubu orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını içeren zemin grubunda yer almaktadır.



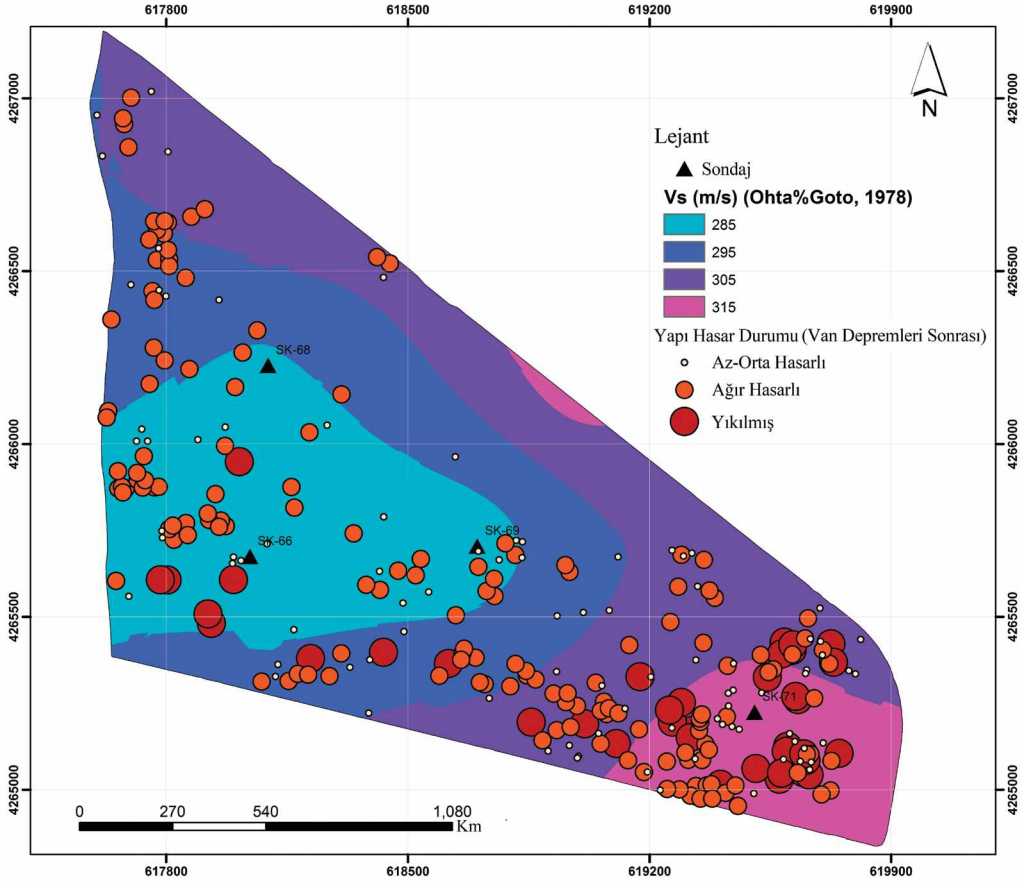
Şekil 4. Ohsaki ve Iwasaki (1973)- $V_{s(30)}$ hız dağılım ile yapı hasar haritası.

Figure 4. The distribution of $V_{s(30)}$ for Ohsaki and Iwasaki (1973) and building damage map.

İyisan (1996) Yaklaşımı

İyisan (1996) kullanılarak hesaplanan V_s değerlerinin 250 ile 350 m/s arasında değiştiği ve mahallenin orta kesimin en düşük, doğu kesiminin ise en yüksek değeri aldığı belirlenmiştir (Şekil 6). V_s değerleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmada; NEHRP-2000 zemin

sınıfı D1 ve D2, EUROCODE-8 zemin sınıfı C, DBYBHY-2007 zemin sınıfı ise C- Z3 olarak belirlenmiştir. TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZD grubu orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını içeren zemin grubunda yer almaktadır.



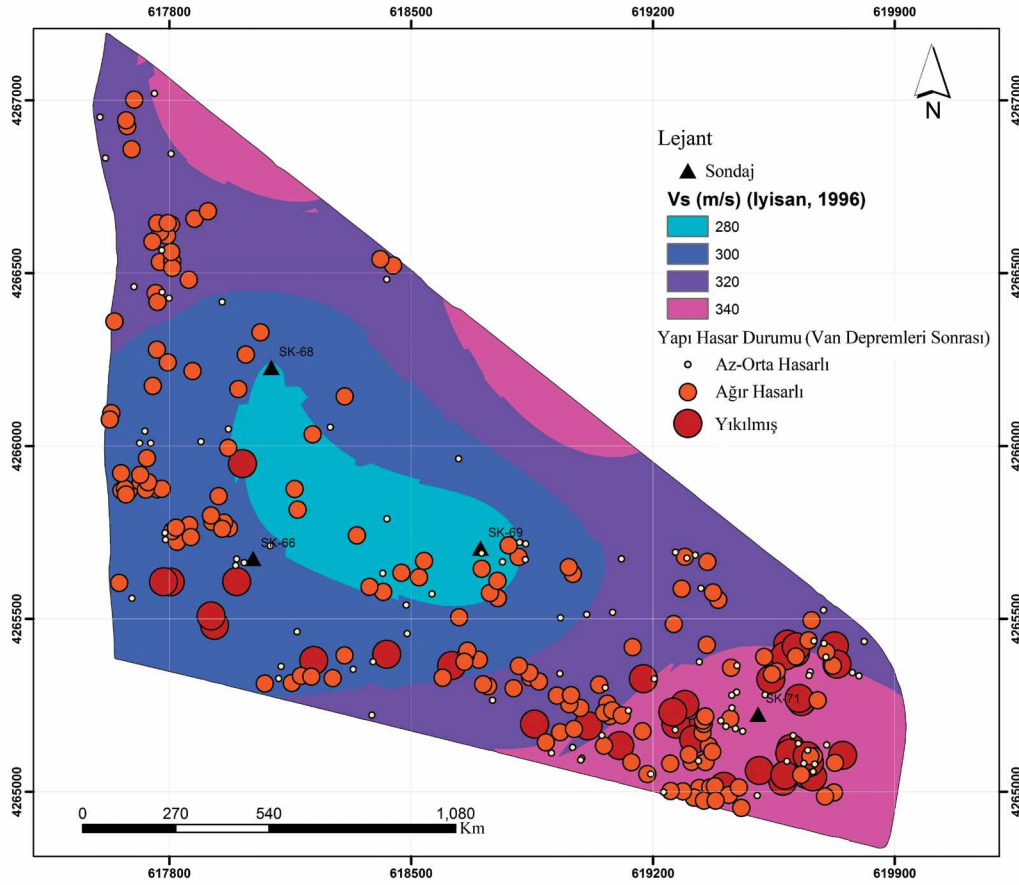
Şekil 5. Ohta ve Goto (1978) - $V_{s(30)}$ hız dağılım ile yapı hasar haritası.

Figure 5. The distribution of $V_{s(30)}$ for Ohta and Goto (1978) and building damage map.

Hasançebi ve Ulusay (2007) Yaklaşımı

Hasançebi ve Ulusay (2007) bağıntısı kullanılarak hesaplanan V_s değerlerine bağlı olarak çizilen Şekil 7'deki harita incelendiğinde, haritanın Ohsaki ve Iwasaki (1973) ile İyisan (1996) bağıntıları ile şekil olarak benzerlik gösterdiği görülmektedir. Fakat hesaplanan değerlerin bu iki bağıntıdan daha farklı ve küçük değerler olduğu belirlenmiştir. Hesaplamalara göre en küçük değer mahallenin orta kesiminde yer alırken, en yüksek değer

mahallenin güneydoğu kesimini oluşturmuştur. Bu değerler göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmalarda; NEHRP-2000 zemin sınıfı diğer bağıntılardan farklı olarak yalnızca D2 ve D3 iken, diğer iki sınıflandırma benzerlik göstererek EUROCODE-8 zemin sınıfı C, DBYBHY-2007 zemin sınıfı ise C- Z3 olarak belirlenmiştir. TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZD grubu orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını içeren zemin grubunda yer almaktadır.



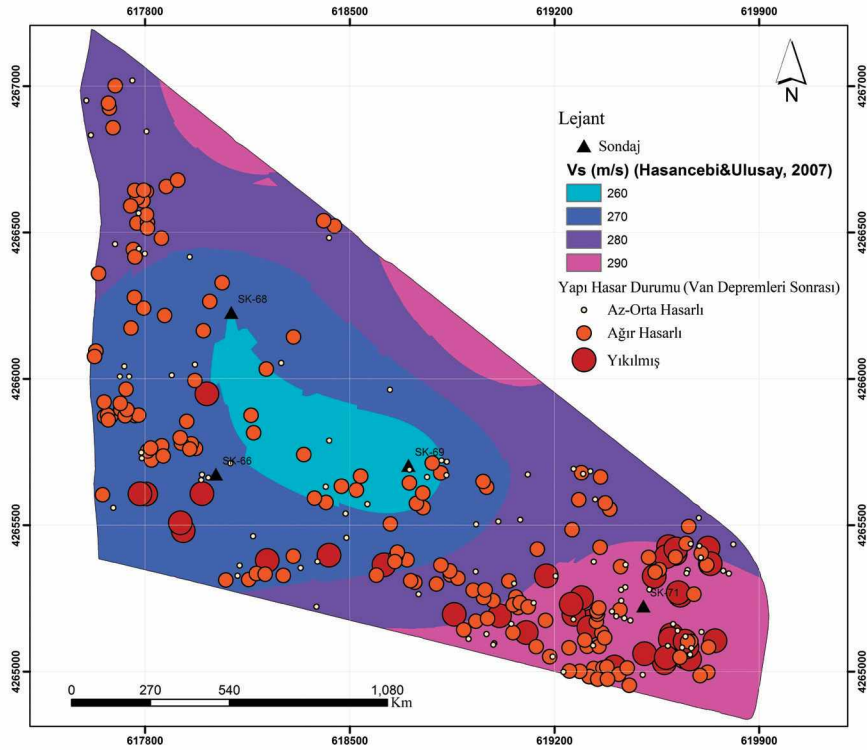
Şekil 6. İyisan (1996)- $V_{s(30)}$ hız dağılım ile yapı hasar haritası.

Figure 6. The distribution of $V_{s(30)}$ for İyisan (1996) and building damage map.

Akın vd. (2011) Yaklaşımı

Akın vd. (2011) bağıntısı kullanılarak hesaplanan V_s değerlerinin diğer dört araştırmanın bağıntısına göre daha küçük değerler olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, V_s değerleri diğer bağıntılardan farklı olarak maksimum değerini yani 295 m/s değerinin incelenen mahallenin kuzey batısında ve 260 m/s değeri ise genel olarak inceleme alanında

ağırlıklı olarak hesaplanmıştır. V_s değerleri göz önünde bulundurularak yapılan sınıflandırmada; NEHRP-2000 zemin sınıfı D2, EUROCODE-8 zemin sınıfı C, DBYBHY-2007 zemin sınıfı ise C- Z3 olarak belirlenmiştir. TBDY yerel zemin sınıflamasına göre ZD grubu orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarını içeren zemin grubunda yer almaktadır.



Şekil 7. Hasaıçebi ve Ulusay (2007)- $V_{s(30)}$ hız dağılım ile yapı hasar haritası.

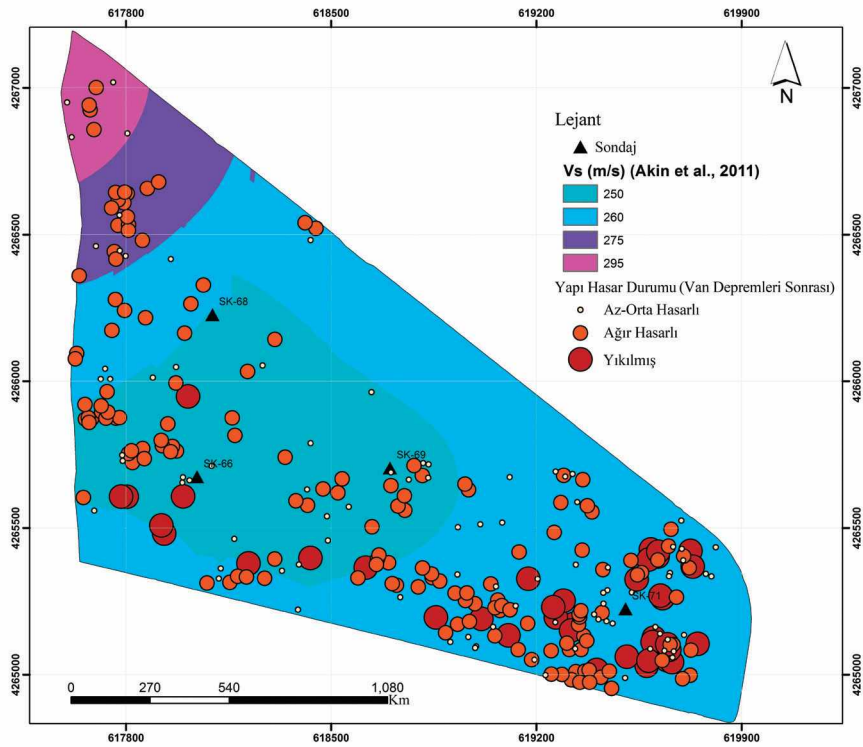
Figure 7. The distribution of $V_{s(30)}$ for Hasaıçebi and Ulusay (2007) and building damage map.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Van ili aktif faylar üzerinde yer alan ve Türkiye'nin en büyük depremleri arasında giren birçok depremin meydana geldiği bir il olduğundan, bu çalışma kapsamında Van il merkezinde bulunan Abdurrahmangazi Mahallesi için zemin özellikleri jeofizik yöntemler kullanılarak araştırılmaya çalışılmıştır. Van depremleri öncesi ve sonrası Abdurrahmangazi Mahallesi için hasar dağılımı incelenmiş, hasar dağılım haritaları ve $V_{s(30)}$ dağılım haritaları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında daha önce yapılan uygulamalar sonucunda elde edilen verilerden ve daha önce yapılmış çalışmalardan faydalanılmıştır. SPT-N ve V_s tespiti için sondaj

verileri değerlendirilerek bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen beş farklı ampirik bağıntı kullanılarak Abdurrahmangazi Mahallesi için kayma dalgası hızları elde edilmiş ve buna bağlı olarak yerel zemin koşullarını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ampirik bağıntılardan elde edilen kayma dalga hızları kullanılarak yerel zemin koşulları 4 farklı sınıflandırmaya göre belirlenmiştir. D zemin grubu sert zemini temsil etmektedir. DBYBHY-2007'ye göre ise, inceleme alanının geneli için zemin grubu C, yerel zemin sınıfı Z3 olarak belirlenmiştir. EUROCODE-8 kriterlerine göre sınıflandığında inceleme bölgesinin tamamı C tipi zemin sınıflarında yer almaktadır.



Şekil 8. Akın vd. (2011)- $V_{s(30)}$ hız dağılım ile yapı hasar haritası.

Figure 8. The distribution of $V_{s(30)}$ for Akın et al. (2011) and building damage map.

Yeni deprem yönetmeliği'ne göre de tamamı ZD grubunda yer alan zeminler olarak değerlendirilmiştir.

Hazırlanan $V_{s(30)}$ haritaları incelendiğinde, her ampirik yaklaşım için en orta bölgede değerlerin düşük çıktığı, ancak $V_{s(30)}$ değerlerinin dağılımlarına ve yaklaşımlardaki farklılıklara göre alanda değişik dağılımlar gösterdiği gözlenmiştir. Özellikle Akın vd., (2011) yaklaşımına bağlı olarak elde edilen verilere göre $V_{s(30)}$ değerlerinin daha düşük olduğu ve derinliği de dikkate alan bu yaklaşımın daha kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Bu yaklaşımla elde edilen harita değerlendirildiğinde ağır hasara sahip ve yıkılan binaların da daha çok yoğunlaştığı mahallenin güneydoğu tarafında diğer SPT-N değerini ele

alan ampirik yaklaşımlara göre daha düşük $V_{s(30)}$ değeri verdiği belirlenmiştir.

İlgili çalışma alanındaki hasar dağılımı incelendiğinde, deprem sonrası hasarın genel olarak mahallenin doğusunda olduğu gözlemlenmiş ve ağır hasarlı olarak tespit edilen konutların bulunduğu alanlarda zemin koşullarından kaynaklı bir hasar dağılımının olmadığı belirlenmiştir. Yapısal hasarın temel nedeni zemin koşullarına bağlı olmadan betonarme taşıyıcı sistemleri olan yapılarda malzeme kalitesinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmalar neticesinde detaylı analizler yapılarak bölgenin yerel zemin koşulları ve elde edilen bulgular dikkate alınarak uygun yapılaşmaya gidilmeli, mevcut yapılar da bu kriterler ışığında yeniden değerlendirilmelidir. Ayrıca mevcut yapıların

incelenerek gerekli önlemlerin alınması deprem zararlarının azaltılması yolunda alınacak tedbirlerden biri olacaktır.

KAYNAKLAR

- AFAD, 2011. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (<https://www.afad.gov.tr/afet-raporu--van-depremi>)
- Akin, M. K., Kramer, S. L., Topal, T., 2011. Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering Geology*, 119(1-2), 1-17.
- Akın, M. K., Akin, M., Akkaya, İ., Özvan, A., Üner, S., Selçuk, L., Tapan, M., 2015. Mikrobölgeleme çalışmasına altlık oluşturmak üzere Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi kampüs zemininin dinamik özelliklerinin belirlenmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39(1), 1-26.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., Konagai, K., 2012. Site investigation and engineering evaluation of the Van earthquakes of October 23 and November 9, 2011. *Japan Society of Civil Engineers, JSCE*, 148.
- Aykaç, Z., 2016. Evaluation of Relationship between Local Site Conditions and Earthquake Damage: After 2011 Van Earthquakes, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, Yüksek Lisans Tezi, 75 s (yayımlandı)
- Boore, D.M., 2004. Estimating $V_s(30)$ from shallow velocity models (Depths <30 m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (2), 591–597.
- BSSC, Building Seismic Safety Council, 2003. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450), Part1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency(Report FEMA 368), Washington, DC.
- DBYBHY-2007, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- Hasançebi, N., Ulusay, R., 2007. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(2), 203–213.
- İyisan, R., 1996. Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results, Chamber of Civil Engineers of Turkey. *Teknik Dergi* 7, 1187–1199.
- Kızılkıranat, A., Koçak, A., Çoşar, A., Güney, D., Selçuk, M. E., Yıldırım, M., 2011. Yıldız Teknik Üniversitesi 23 Ekim 2011 Van Depremi Teknik İnceleme Raporu (<http://www.ek.yildiz.edu.tr/images/images/yayinlar/vandeprem.pdf>).
- KOERI, 2012. Son Depremler, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Boğaziçi Üniversitesi.
- Köse, O., 2004. Van Gölü yakın çevresinin coğrafyası. Van Gölü Havzası Jeotraversleri Çalıştay Kitapçığı, DAJEO-2004, 1-6.
- Köse, O., 2005. Van Gölü'nün Oluşumu, Gelişimi, Doğal Çevre Gelişimindeki Yeri. In: Köse, O., Gökdero A.F., Tolluoğlu, D. (eds). Program Kitapçığı, 12.Ulusal Kil Sempozyumu-KİL 2005, 05-09 Eylül 2005, Van. pp. 33-48.
- Ohsaki, Y., Iwasaki, R., 1973. On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. *Soils and Foundations*, 13(4), 61-73.
- Ohta, Y., Goto, N., 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(2), 167-187.
- Selçuk A.S., Üner S., 2020. 25 Haziran 2020 Saray (Van) Depremi Özet Raporu, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Afet Yönetimi ve Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi ([https://www.yyu.edu.tr/images/files/Saray\(Van\)_depremi.pdf](https://www.yyu.edu.tr/images/files/Saray(Van)_depremi.pdf)).
- Şengör, A. M. C., Kidd, W. S. F., 1979. Post-collisional tectonics of the Turkish-Iranian plateau and a comparison with Tibet. *Tectonophysics*, 55(3-4), 361-376.
- Şengör, A. C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, Mart 2018.
- TS EN 1998-1 Standartı, 2003. Eurocode 8: Depreme dayanıklı yapıların projelendirilmesi, Bölüm 1: Genel kurallar, Sismik etkiler ve binalar için kurallar.
- URL-1: <https://www.nufusu.com/tusba-van-mahalleleri-nufusu> (Erişim tarihi: 31 Mayıs 2021).

Research Article / Araştırma Makalesi

Investigation of Lineaments in the Mid-Black Arc Region Using Bouguer Gravity Data

Orta Karadeniz Yayındaki Çizgiselliklerin Bouguer Gravite Verileri Kullanılarak İncelenmesi

Abdurrahman Yasir PARLAK¹ , Ali ELMAS¹ 

¹ Karadeniz Technical University, Department of Geophysical Engineering TR-61080 Trabzon, Turkey

Geliş (Received): 27 Nisan (April) 2021 / Düzeltme (Revised): 08 Temmuz (July) 2021 / Kabul (Accepted): 05 Ekim (October) 2021

ABSTRACT

The gravity data used in this study were taken from the Earth Gravity Model (EGM08) to investigate the crustal structure in the mid-Black arc region. In this study, geological structure boundaries that offer differences in density were tried to determine in the mid-Black arc region. For this purpose, the possible geological structure limits at the basement levels were especially focused on. For this reason, horizontal gradient and tilt angle techniques were practiced to find possible geological structure limits using first vertical derivative data of the regional gravity data of the region. The soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho interfaces have been determined using the radial mean amplitude spectrum of Bouguer data of study region. The topographies of these interfaces were also presented utilizing the Parker-Oldenburg algorithm. Depth values found by inversion calculations for soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho interface topographies are changed as 0.7-3.5, 2.1-7.4, 9.1-14.2, and 35.1-42.5 km, respectively. The linearities determined in the study were matched against to substantial faults of region. It has been observed that there is a qualitative relationship between the faults, ore deposit and earthquake epicenters in the region. The results of this practice were based on studies such as exploring the ore deposits and investigating the risks of earthquakes in the future.

Keywords: First Vertical Derivative, Mid-Black Arc Region, Horizontal Gradient, Tilt Angle, Lineament

ÖZ

Orta Karadeniz yay bölgesindeki kabuk yapısını incelemek için, bu çalışmada kullanılan gravite verileri, Dünya Gravite Modelinden (EGM08) alınmıştır. Bu çalışmada Orta Karadeniz bölgesinde yoğunluk farklılıkları sunan jeolojik yapı sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, özellikle, temel kaya seviyelerindeki olası jeolojik yapı sınırlarına yoğunlaşmıştır. Bu nedenle, bölgenin bölgesel gravite verilerinin birinci düşey türev verileri kullanılarak olası yapı sınırlarını bulmak için yatay gradyan ve eğim açısı teknikleri uygulanmıştır. Yumuşak-sert sediment, temel kaya, Conrad ve Moho arayüzleri, çalışma bölgesinin Bouguer gravite verilerinin radyal ortalama genlik spektrumları kullanılarak belirlenmiştir. Bu arayüzlerin topografyaları da Parker-Oldenburg algoritması kullanılarak sunulmuştur. Yumuşak-sert sediman, temel kaya, Conrad ve Moho arayüzey topografyaları için, ters çözüm hesaplamalarıyla bulunan derinlik değerleri sırasıyla, 0.7-3.5, 2.1-7.4, 9.1-14.2 ve 35.1-42.5 km arasında değişmektedir. Çalışmada belirlenen çizgisellikler, bölgenin önemli fayları ile eşleştirilmiştir. Bölgedeki faylar, maden yatakları ve deprem merkez üsleri arasında niteliksel bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu uygulamanın sonuçları, maden yataklarının araştırılması ve gelecekte deprem risklerinin araştırılması gibi çalışmalara altlık olacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Birinci Düşey Türev, Orta Karadeniz Bölgesi, Yatay Gradyan, Tilt Açısı, Çizgisellik

INTRODUCTION

The mid-Black arc region is situated in western part of Eastern Pontides (Figure 1). According to the International Seismological Center (ISC), the region has experienced many earthquakes. The region has several fault zones one of them is North Anatolian Fault Zone (NAFZ) which lies in the Alpine-Himalaya zone. According to ISC, within the historical time period, region, have shaken as a result of occurrences of a number of seismic events (URL-1, 2020). The study area is approximately 200 km south-north orientation and 300 km west-east orientation (Figures 1 and 2). The study area can be divided into three subregion as axial, southern and northern zones (Eyüboğlu et al., 2007; Figure 1). The mid-Black arc region is one of the great examples for well-maintained continental arcs in the Alpine-Himalayan mountain zone (e.g., Eyuboglu et al., 2007; 2011). The geodynamic involvement of this region is still debate on the score of the lack of scientific data sets. A number of scientists defend that the region was shaped as a result of northward subduction of an age-old oceanic lithosphere that is Paleotethys pending the Paleozoic-Mesozoic period (e.g., Rice et al., 2009; Dilek et al., 2010). On the other hand, some scientists offer that the region was developed southward subduction of lithospheric plate under the Paleotethys Ocean that was settled down in the north of the mountain zone in course of the Paleozoic to Cenozoic period (Dewey et al., 1973; Bektaş et al., 1999; Eyuboglu, 2010; Eyuboglu et al., 2016). Therefore, it becomes important to investigate the mid-Black arc region with different techniques. There are many scientific studies, that use the gravity data, to examine the deep structural and stratigraphic structure of the region (Mindevalli and Mitchell, 1989; Çakır et al., 2000; Çakır and Erduran, 2004; Angus et al., 2006; Barazangi et al.,

2006; Pamukçu et al., 2007 and Maden et al., 2009). Mindevalli and Mitchell (1989) showed the upper mantle and crust velocity structures using seismic velocities and calculated around 40 km crustal thickness under the region. Çakır et al. (2000) has calculated that the depth of the Moho ranges from 32 to 40 km in the mountain region. Also, they found that the dips of Moho roughly southwards. Çakır and Erduran (2004) concluded that Moho interface is situated at about 35 km depth by using seismic velocities on the north of the region. Also, in the same area, Maden et al. (2009) analyzed the crust structure using gravity values. They calculated the depths of the basement (4.6 km), Conrad (26.5 km) and Moho (35.7 km) using spectral analysis method. Also, using the inversion method, they found the variation of Moho depth from 30.1 km to 43.8 km in the region.

Generally, the solution of issues such as the density change limits of the structural and stratigraphic elements forming the earth's crust and the topography of the basement structure can be realized based on the analysis of gravity data. In particular, the Horizontal Gradient (HG) technique is used in determining the discontinuities arising from the difference in density within the earth's crust (Cordell and Grauch, 1985; Nabighian, 1972; Elmas, 2019) and Parker-Oldenburg algorithm (PO) has been used to reveal the basement upper surface topography (Parker, 1973; Oldenburg, 1974; Gomez-Ortiz and Agarwal, 2005; Oruç et al., 2013; Elmas, 2019). In addition, the Tilt Angle (TI) technique is used to reveal the geological structure boundaries (Miller and Singh, 1994; Oruç and Keskinsezer, 2008; Oruç, 2010; Akın et al., 2011; Dogru et al., 2017; Elmas, 2018).

In this study, the structural and stratigraphic characteristics of the region and its vicinity

were investigated based on the combined and sequential analysis of gravity data using HG, TI and PO techniques. The study area is in the north of Turkey (Figure 1). Earthquake data were obtained from the International Seismological Center (ISC) (Figure 2). The gravity data used in this study were taken from the Earth Gravity Model (EGM08) (Figures 3a). Also, the topography data shown in Figure 3b were also taken from the Global 30 Arc-Second Elevation Model (GTOPO30) (USGS, 1998). The mean depths of the interfaces in sediment, basement upper surface, Conrad and Moho interfaces in the region were calculated by the amplitude spectrum of Bouguer gravity data. Gravity values originating from different levels were calculated by applying a band pass filter to Bouguer gravity values. To determine discontinuities, POTENSOFT software (Arisoy and Dikmen, 2011) was used for HG and TI boundary analysis. By applying the HG and TI technique to the first vertical derivative values of the filtered gravity data, the boundaries of the region presenting the density difference in the basement levels were tried to be displayed. Boundary analyzes were made especially for the basement. In addition, the interface topographies in the study area were calculated with the Parker-Oldenburg inverse algorithm.

MATERIALS AND METHODS

There are some lineaments in the area and particularly we focused on the lineaments of the geological structures (Figure 1).

In the previous studies, the fault type structures of the study area were studied by using different method (Dewey et al., 1973; Bektaş et al., 1999; Eyuboglu et al., 2007; Eyuboglu, 2010; Eyuboglu et al., 2016), but they could not determine boundaries that offered the difference

in density for the sub-units. In this study, it was tried to determine the boundaries of subunits which could not be determined by previous studies. HG and TI techniques were used for this purpose.

Parker-Oldenburg algorithm has been used nowadays to reveal the topographies of the interface in the crust (Elmas, 2019). Gomez-Ortiz and Agarwal (2005) developed the 3DINVER inversion program. In addition, POTENSOFT program prepared by Arisoy and Dikmen (2011) was used to determine the boundaries that arise from the density differences. Figure 2 presents the epicenters of earthquakes with magnitude greater than 3 from 1996 to 2020 (URL-1, 2020). Looking at the figure, many earthquakes are observed around the fault zones. In addition, if the hypocenter depths of earthquakes are examined, it can be seen that most earthquakes are at the first 10 km depth. The Bouguer gravity values seen in Figure 3a were obtained from Earth Gravity Model (EGM08) (Pavlis et al., 2008). When gravity anomaly is examined, the location of the main fault zones can be seen approximately. Also the gravity anomaly increased to the north. The gravity values in the study area go up from south to north. This causes crust thickness to decrease from south to north. In other words, with the thinning of the crust, the gravity values increased from south to north with the geological structure of asthenosphere with a high density approaching upward. The topography values shown in Figure 3b were compiled from Global 30 Arc-Second Elevation Model (GTOPO30) (USGS, 1998). In contrast to gravity data, topography values decrease from south to north. When the gravity and topography data are taken together, NAFZ location can be seen.

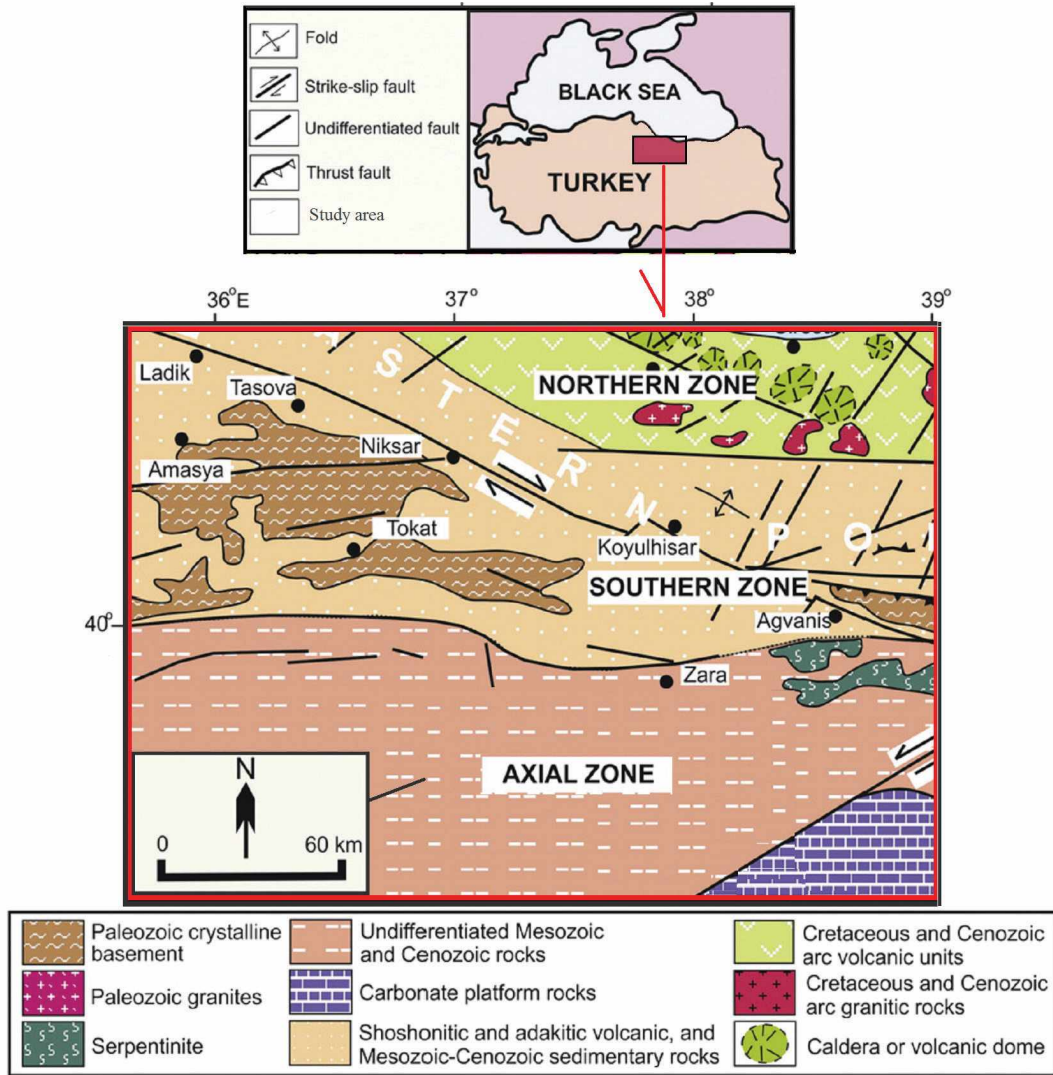


Figure 1. Map of the geological and tectonic structures of the region (After Eyuboglu et al., 2007). Northern zone, southern zone and axial zone are seen. The main discontinuity boundaries separating these zones are also seen here.

Şekil 1. Bölgenin jeolojik ve tektonik yapı haritası (Eyuboglu vd. 2007'den düzenlenmiştir). Kuzey zonu, güney zonu ve eksen zonu görülmektedir. Bu zonları ayıran ana süreksizlik sınırları da burada görülmektedir.

CALCULATION OF THE DEPTH OF THE INTERFACES

The amplitude spectrum calculated from the Fourier transforms of potential field anomalies provide information about the mean depths of the interface boundaries (Bhattacharya, 1967;

Spector and Grant, 1970). The amplitude spectrum is written as in Equation (1), where $F(x)$ is the potential data measured on the earth plane.

$$A(w) = \sum_{0}^{n-1} F(x)e^{-iwx} \quad (1)$$

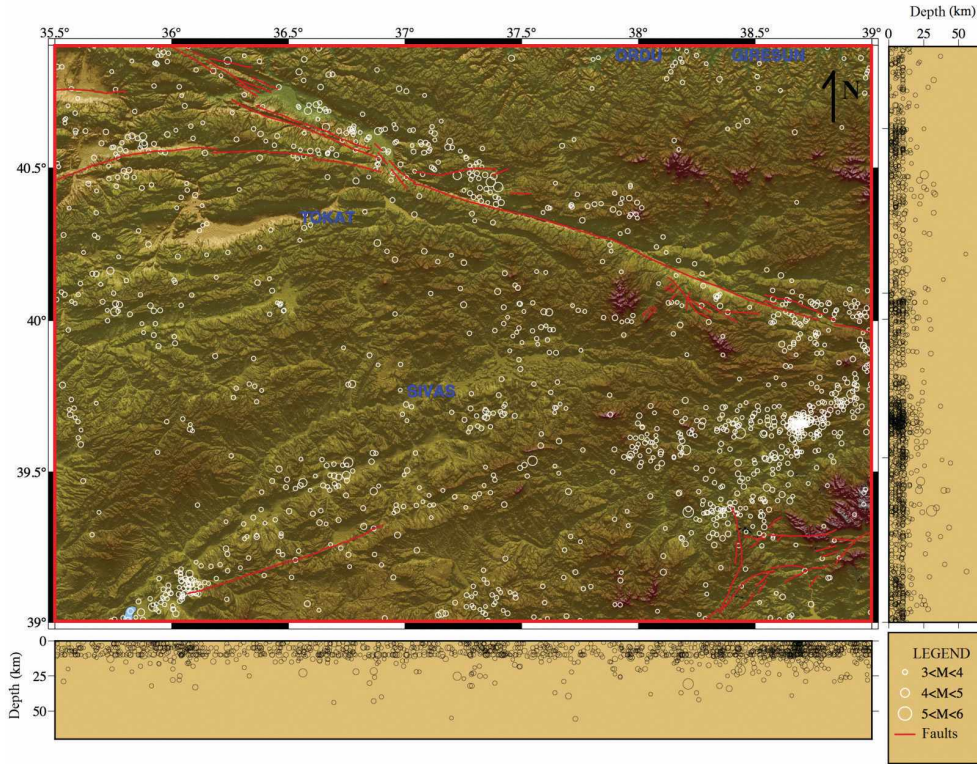


Figure 2. Epicenter and hypocenter of earthquakes for the study region (ISC). (Active faults taken from Emre et al., 2013).

Şekil 2. Çalışma bölgesi için depremlerin merkez üssü ve odak derinlikleri (ISC). (Aktif faylar, Emre vd., 2013'den alınmıştır).

In Equation (1), $w=2\pi k$ is defined as the angular frequency and k is defined as $k=1/\lambda$ as the inverse of the wavelength (λ). The Fourier spectrum of the interface boundary or Bouguer plate effect at the mean depth h is given by Karner and Watts (1983) as in Equation (2).

$$B(k) = 2\pi G \Delta \rho e^{-2\pi k h} F(k) \quad (2)$$

In Equation (2), $\Delta \rho$ is the density difference between the two layers bounding the plate, G is the universal gravity constant, and $F(k)$ is the Fourier spectrum of the measured data. It is clear from Equation (2) that the only factor affecting the characteristic variation of the amplitude spectrum is the exponential term. Equation (3) is

obtained by taking the natural logarithm of both sides.

$$\ln B(k) = \ln A(k) \pm 2\pi k h \quad (3)$$

Thus, it is clear that a linear relationship will be found if the logarithmic amplitude spectrum is plotted against the wavenumber. The parameter affecting the slope of the line is the average depth h of the interface boundary. By utilizing this property, the average depths of the interface boundaries can be found. With this technique, 2D Fourier transformation of the gravity data is calculated. With this process, four different interface depths were calculated (Figure 4). With the spectrum process, calculated average depths

of the interfaces are 39.2 km, 11.4 km, 5.1 km, and 2.1 km. These are belong to Moho, conrad, basement, and hard-soft sediment interfaces, respectively. In this study, the algorithm developed by Parker (1973) and Oldenburg (1974) was used to calculate the interface topographies (Figure 5). The inversion processes are made with this

algorithm. In the inversion processes performed in this study, if the Root Mean Square (RMS) error obtained from two consecutive results is lower than the specified 0.01 km, convergence criterion, the iteration process ends. The used algorithm is described in detail in Elmas (2019).

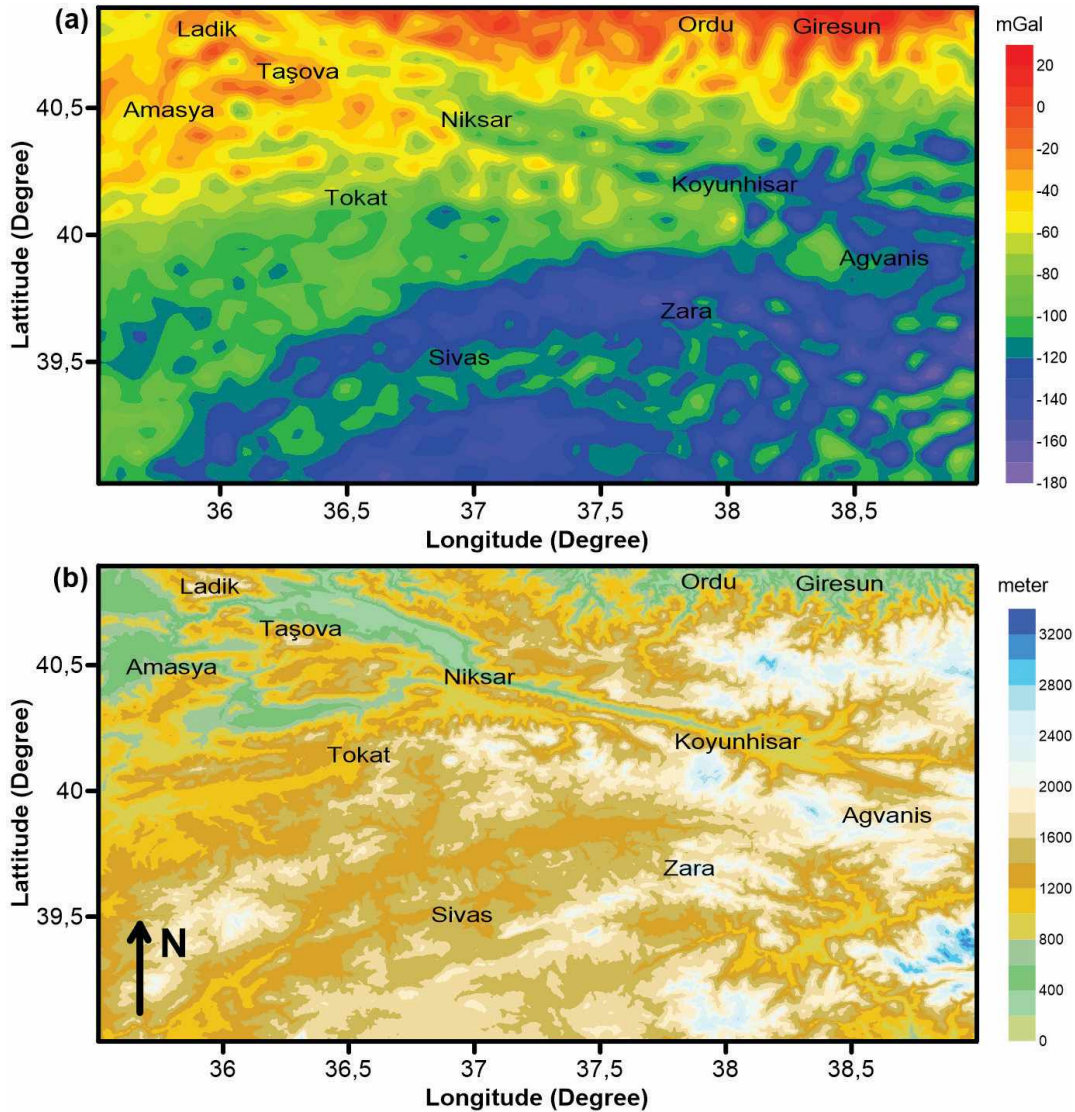


Figure 3. (a) EGM08 Bouguer gravity values, (b) topographic maps of the region.

Şekil 3. Bölgenin (a) EGM08 Bouguer gravite değerleri, (b) topografya haritaları.

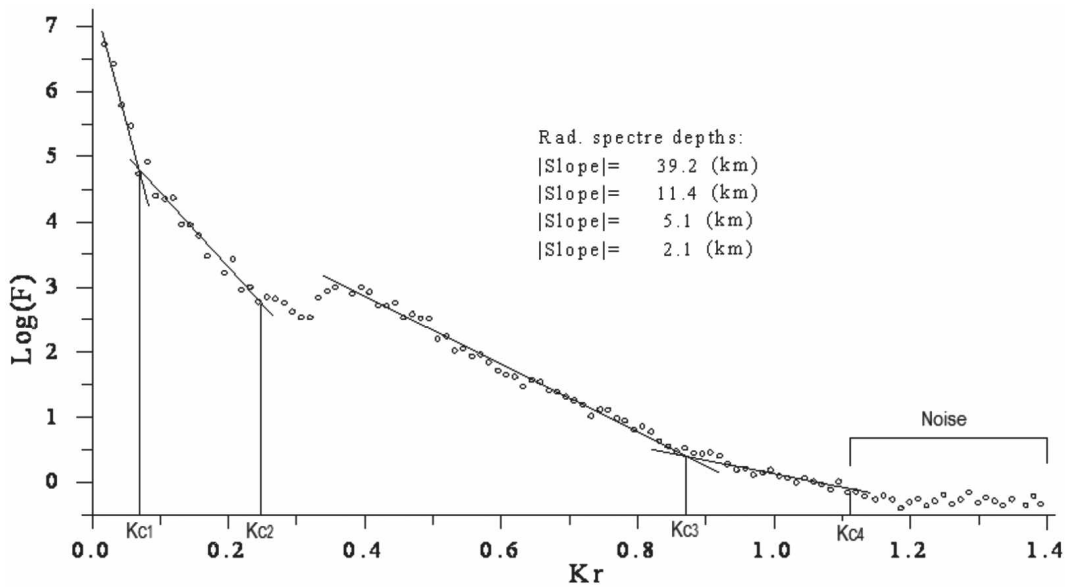


Figure 4. Amplitude spectrum of the gravity data for the study region.

Şekil 4. Çalışma bölgesi için gravite verilerinin genlik spektrumu.

LINEAMENT DETECTION

HG technique was used with gravity values (Altinoğlu et al., 2015). Here, these techniques were used with FVD data. Oruç (2010) was the first to use the TI technique with FVD data in order to find the lineaments due to the density difference. In this study, the above-mentioned techniques were applied to FVD data and lineaments were determined. First of all, filtered data was calculated from Bouguer data with band pass filter using and . The FVD data was then calculated from the filtered data with fast Fourier transform (FFT). The lineaments found using this technique correspond to the boundaries and fault lines of the masses presenting the density difference.

Cordell and Grauch (1985) were the first to introduce the HG technique, which revealed shallow structure boundaries and the formula is written for first vertical derivative data as (Oruç, 2010)

$$H(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}\right)^2} \quad (4)$$

where $\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}$ and $\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}$ are FVD of regional gravity values changes in x- and y- directions. In Equation (4), horizontal derivatives are calculated using finite differences.

Miller and Singh (1994) were the first to introduce the TI technique, which revealed both shallow and deep structure boundaries. The formula of this technique can be written according to FVD data as

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}\right)^2}} \right) \quad (5)$$

where φ represents the TI degree (Oruç 2010).

On the other hand, the Parker-Oldenburg inversion algorithm was used to model the interface topographies using the average depth values found by the amplitude spectrum technique. This algorithm is depended on the connection between the Fourier transform of the interface topography and the Fourier transform of the gravity values. Therefore, this connection is recursively formed from the density difference and determined depth of an interface of geological structure (Parker 1973; Oldenburg 1974). The Fourier transform utilized to compute gravity values of an irregular homogeneous layer is as follows:

$$f[z_1(x)] = -\frac{f[\Delta g(x)]e^{k|z_0|}}{2\pi G\rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{|k|^{n-1}}{n!} f[z_1^n(x)], \quad (6)$$

where $f[\Delta g(x)]$, z_0 , $z_1(x)$, k , G , and ρ are the Fourier transform of the gravity values, average depth, depth under each measurement point, wavenumber, gravitational constant, and the difference of the densities above and below the boundary, respectively. Equation (6) is utilized to compute density interface iteratively utilizing z_0 and $\Delta g(x)$. The first prediction the depth of interface is ensured by inverse Fourier transform. Also, this interface value can be utilized to find the right of Equation (6). For this reason, this cause to be finalizing the second depth reaches findings. When the convergence criterion is reached, iterations are terminated.

RESULTS

Average depths of interfaces found by applying Bouguer gravity values of region to amplitude spectrum are 2.1, 5.1, 11.4, and 39.2 km (Figure 4). These depth values belong to soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho interfaces, respectively. Finding the interface topographies especially of basement

are important to outline the geological units of the region. In respect to geophysical data from the area, we found depth of basement of this region is 4.6 km on previous study (Maden, 2013). Earthquakes usually occur at these depths in this region and it is understood that there is a consistency between depth and seismicity for the depth of basement. The low pass filter was used to obtain filtered gravity anomalies for Moho using Kc1 cut-off wave number. The band pass filter was used to obtain filtered gravity anomalies for Conrad using Kc1-Kc2 cut-off wave numbers, for basement using Kc2-Kc3 cut-off wave numbers, and for soft-hard sediment using Kc3-Kc4 cut-off wave numbers for inversion processes. The filtered gravity anomalies are originated from the soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho interfaces and are given in Figures 5a, 5c, 5e, and 5g, respectively. Looking at the gravity anomaly maps, it can be seen that the wavelength increases from top to bottom.

The inverse solution is made by considering the soft-hard sediment, basement, Conrad, and Moho interfaces. It was used with the 3DINVER and 3D geometries of soft-hard sediment, basement, Conrad, and Moho were iteratively estimated. As initial depths, 2.1, 5.1, 11.4, and 39.2 km are used to derive the interface topographies for soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho, respectively. Average density contrasts have been selected as 0.1 g/cm³ for soft-hard sediment (accepted densities of hard sediment and soft sediment are 2.4 g/cm³ and 2.3 g/cm³, respectively), 0.3 g/cm³ for basement (accepted densities of metamorphic complex and sediment are 2.7 g/cm³ and 2.4 g/cm³, respectively), 2.26 g/cm³ for Conrad (accepted densities of lower crust and upper crust are 2.93 g/cm³ and 2.67 g/cm³, respectively), and 0.5 g/cm³ for Moho (accepted densities of lithospheric mantle and crust are 3.3 g/cm³ and 2.8 g/cm³, respectively).

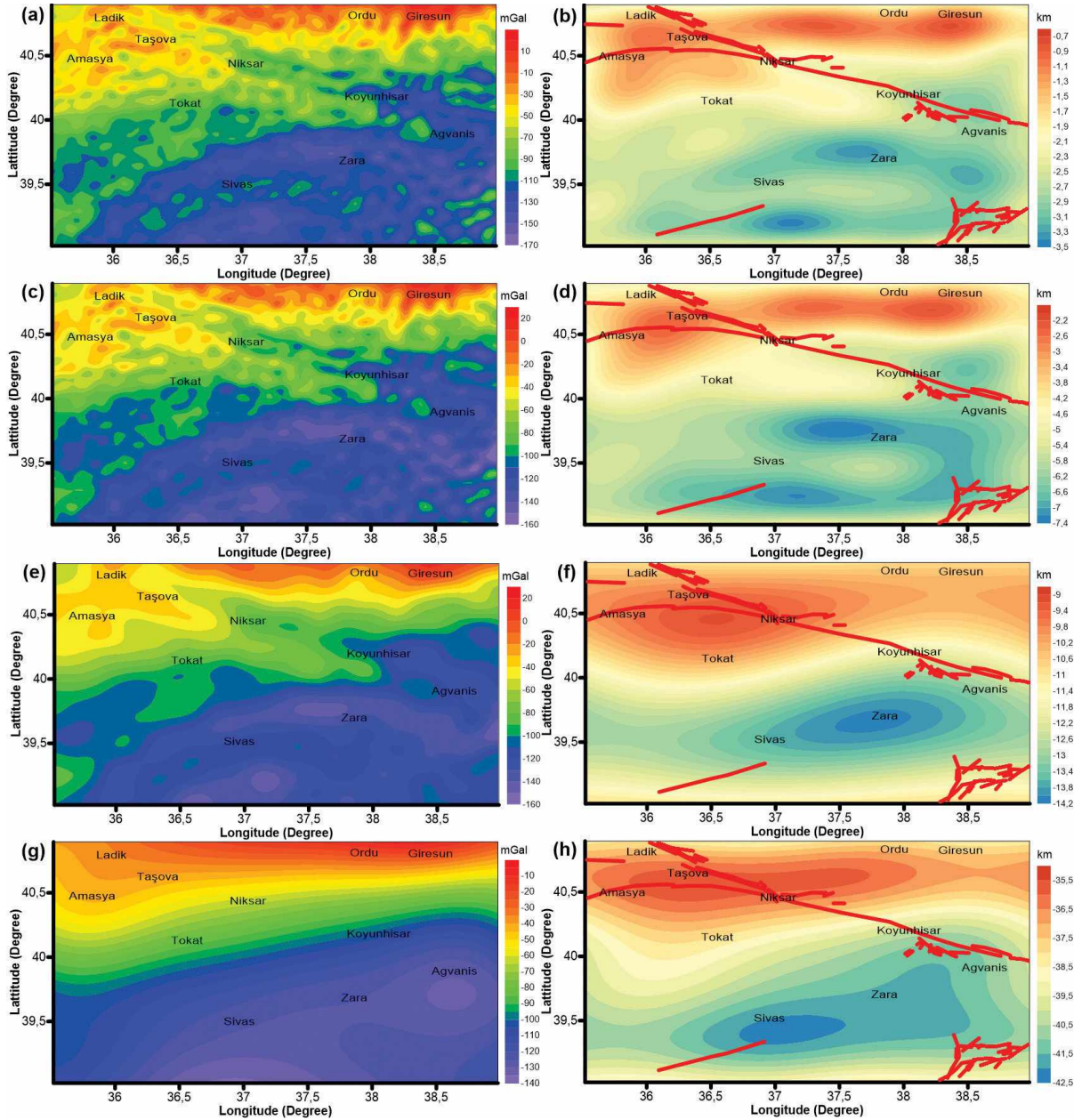


Figure 5. (a) The gravity anomaly map from soft-hard sediment topography, (b) the soft-hard sediment topography map, (c) the gravity anomaly map from basement topography, (d) the basement topography map, (e) the gravity anomaly map from Conrad topography, (f) the Conrad topography map, (g) the gravity anomaly map from Moho topography, (h) the Moho topography map. Known faults are given in red.

Şekil 5. (a) Yumuşak-sert sediment topografyasından gravite anomali haritası, (b) yumuşak-sert sediment topografya haritası, (c) temel kaya topografyasından gravite anomali haritası, (d) temel kaya topografya haritası, (e) Conrad topografyasından gravite anomali haritası, (f) Conrad topografya haritası, (g) Moho topografyasından gravite anomali haritası, (h) Moho topografya haritası. Bilinen faylar kırmızı renkte verilmiştir.

The iteration numbers, and RMS errors are also determined for each inversion. The obtained topography maps, given in Figures 5b, 5d, 5f, and 5h, show that Bouguer data are correlated with the interface topographies. Here, looking at the interface topography maps, the corrugation structure at the borders can be seen from bottom to top. Since the boundaries between descents and elevations of basement are related to lineaments such as faults (Oruç et al. 2013), the found lineaments can be associated with the basement topography. Depth values for soft-hard sediment, basement, Conrad and Moho interface topographies are changed as 0.7-3.5, 2.1-7.4, 9.1-14.2, and 35.1-42.5 km, respectively. In addition to tracking the descending and ascending portions of the interfaces, it is seen that the crust in the working area is thinned from the south to the north by looking at the interface depth values (Figures 5b, 5d, 5f, and 5h). In addition, if we look at the gravity maps and the interface topography maps which are calculated with the inverse solution together, NAFZ may be visually recognized in sediment and basement, especially on the first two gravity map.

The maximum HG values and zero TI values reflect the geological structure boundaries that present the density differences. Some of these boundaries are in line with ICS. From this point of view, it can be said that some of the found lineaments are known faults. The regional gravity anomaly and the FVD of regional gravity of region are given in Figure 6a and 6b. When the gravity and FVD maps are considered, especially NAFZ can be seen. Again, this fault can be clearly seen on HG and TI maps. In addition, when we look at the HG and TI maps, we can clearly see the distribution of the geological structure boundaries offering density differences that are dominant in the region and at the basement levels.

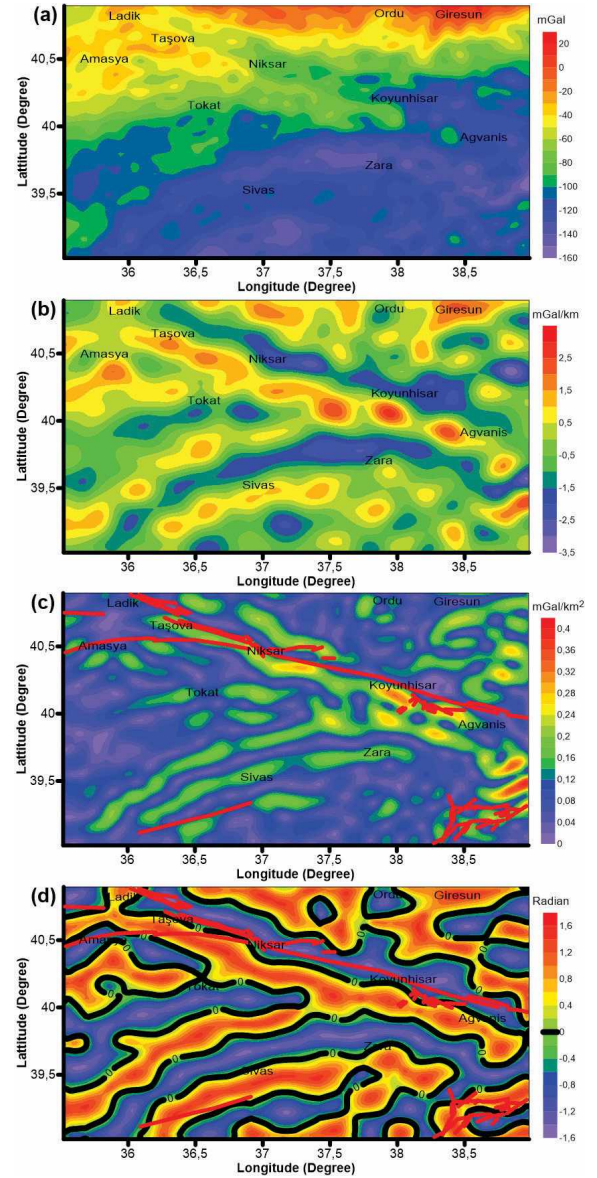


Figure 6. (a) Regional data, (b) FVD data, (c) HG map, (d) TI map. Known faults are plotted in red.

Şekil 6. (a) Bölgesel veriler, (b) FVD verileri, (c) HG haritası, (d) TI haritası. Bilinen faylar kırmızı ile işaretlenmiştir.

The high HG values that are lineaments display mainly E-W, NE-SW, and NW-SE displacive units shown in Figure 6c. We found the zero values of the TI in the lineaments, shown

in Figure 6d. The zero values of TI map displays mainly W–E, SW–NE, and SE–NW displacive tectonic discontinuities shown in Figure 6d. Looking at the results of HG and TI, it is seen that HG gives shallow lineaments, while TI gives both shallow and deep lineaments (Figures 6c and 6d). NAFZ is clearly visible, as well as the positions and extensions of other linearities (Figures 6c and 6d). Distributions of the ore deposits (Figures 7a and 7b) and the epicenter of the earthquake (Figure 7c) in the region support the existing of the newly found lineaments. Since the ore deposits are related to the fault systems, the

distribution of the ore deposits in the region and the distribution of the faults have been evaluated together. In addition, earthquake epicenter distributions were also taken into account in this regard. The ore deposits map was obtained off General Directorate of Minerals Research and Exploration (MTA) of Turkey (URL-2, 2020). The known faults are given in red in Figure 7d. Also, found lineaments given by dotted lines are shown in black in Figure 7d. The distribution comparison between ore deposits, epicenters of the earthquake, faults and lineaments in Figure 7 was made qualitatively.

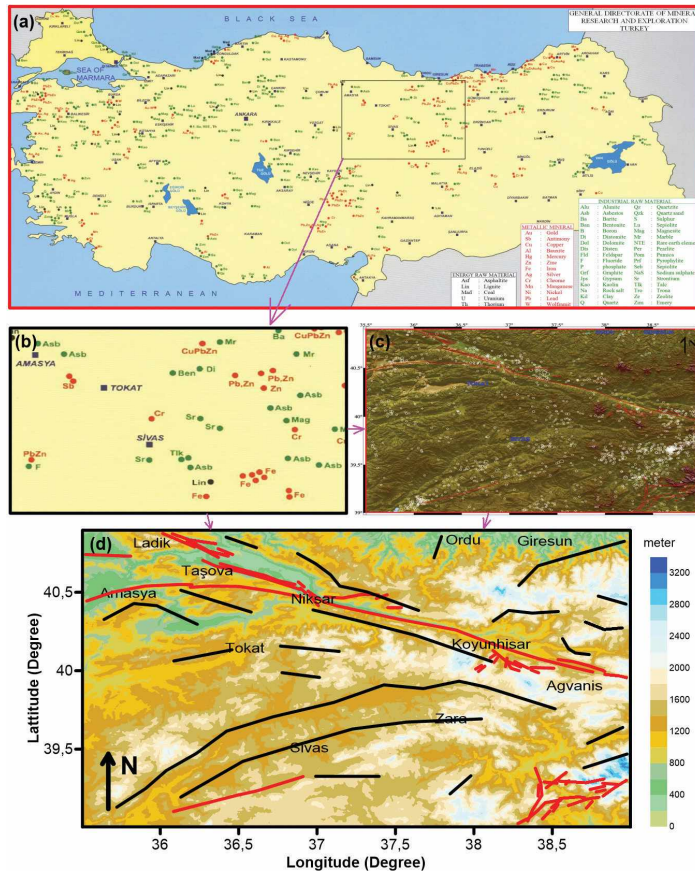


Figure 7. (a) Turkey ore deposits map (URL-2, 2020), (b) ore deposits map of study area, (c) seismicity of the region, (d) known faults have been compiled from ISC (in red) and found lineaments (in black).

Şekil 7. (a) Türkiye maden yatakları haritası (URL-2, 2020), (b) çalışma alanının maden yatakları haritası, (c) bölgenin depremselliği, (d) bilinen faylar ISC'den derlenmiş (kırmızı) ve bulunan çizgisellikler (siyah).

CONCLUSIONS

In this study, by using the maximum HG and zero TI values, lineaments belonging to the region and resulting from density differences were found. The lineaments found are compared with the interface topographies. The main lineaments found in this study are compatible with the works that made by Dewey et al. (1973), Bektaş et al. (1999), Eyüboğlu et al. (2007), Eyuboglu (2010), Eyuboglu et al. (2016). Here, we determined descents and elevations in the interface topography maps (Figures 5b, 5d, 5f and 5e). It is remarked by Dewey et al. (1973), Bektaş et al. (1999), Eyüboğlu et al. (2007), Eyuboglu (2010), Eyuboglu et al. (2016) that there is no lineament about subunits detected by previous studies in this region, except that we have newly found some lineaments (Figure 10d).

The study area is important in terms of ore deposits. On the other hand, the region has experienced many earthquakes since ancient times and faces severe seismic threats. In this study, Moho, Conrad, basement and soft-hard sediment interface topographies were found with inversion. Interface depth values were examined and it was seen that the crust thickness in the study area decreased from south to north (Figures 5b, 5d, 5f and 5e). In addition, as a result of inversion processes, the descents and elevations areas in the interface topographies are revealed. Geological and geophysical studies to be carried out in the region can be directed by considering the location of the ore deposits in the study area, the location of the epicenters and the locations of the geological structure boundaries found. If the results of this study are supported by more detailed studies, it will be easier to identify the ore deposits that are present in the study area, but have not yet been discovered and places where the earthquake risk is high. Because, these are connected to fracture and fault systems.

REFERENCES

- Akın, U., Şerifoğlu, B.İ., Duru, M., 2011. The use of tilt angle in gravity and magnetic methods. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 143(143), 1-12.
- Altınoğlu, F.F., Sarı, M., Aydın, A., 2015. Detection of Lineaments in Denizli Basin of Western Anatolia Region Using Bouguer Gravity Data. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 415–425.
- Angus, D.A., David, C., Wilson, E., Sandvol, E., 2006. Lithospheric structure of the Arabian and Eurasian collision zone in eastern Turkey from S-wave receiver functions. *Geophysical Journal International*, 166, 1335-1346.
- Arısoy, M.Ö., and Dikmen, Ü., 2011. Potensoft: MATLAB-based Software for potential field data processing, modelling and mapping. *Computer and Geosciences*, 37, 935–942.
- Barazangi, M., Sandvol, E., Seber, D., 2006. Structure and tectonic evolution of the Anatolian plateau in eastern Turkey. In: Dilek, Y., Pavlides, S. (Eds.), *Post-collisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia*. Geological Society of America Bulletin, 409, 463-474.
- Bektaş, O., Şen, C., Atıcı, Y., Köprübaşı, N., 1999. Migration of the Upper Cretaceous subduction-related volcanism toward the back-arc basin of the eastern Pontide magmatic arc (NE Turkey). *Geological Journal*, 34, 95–106.
- Bhattacharyya, B.K., 1967. Some general properties of potential fields in space and frequency domain; a review. *Geoexploration*, 5, 127–143.
- Cordell, L., Grauch, V.J.S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, (Ed. Hinze, W. J.) *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Society of Exploration Geophysicists, 181–197.
- Çakır, Ö., Erduran, M., Çınar, H., Yılmaztürk, A., 2000. Forward modeling receiver functions for crustal structure beneath station TBZ (Trabzon, Turkey). *Geophysical Journal International*, 140, 341-356.

- Çakır, Ö., Erduran, M., 2004. Constraining crustal and uppermost structure beneath station TBZ (Trabzon, Turkey) by receiver function and dispersion analyses. *Geophysical Journal International*, 158, 955-971.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N., Altunkaynak, Ş., 2010. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52 (4-6), 536-578.
- Dewey, J.F., Pitman, W.C., Ryan, W.B.F., Bonnin, J., 1973. Plate tectonics and evolution of the Alpine system. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 3137-3180.
- Dogru, F., Pamukcu, O., Ozsoz, I., 2017. Application of tilt angle method to the Bouguer gravity data of Western Anatolia. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 155(155), 213-222.
- Elmas, A., 2018. Kıbrıs adasındaki yapısal süreksizliklerin EGM08 gravite verileri kullanılarak belirlenmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 42, 17-32.
- Elmas, A., 2019. Edge position detection and depth estimation from gravity data with application to mineral exploration. *Carbonates and Evaporites*, 34 (1), 189-196.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30. Ankara- Türkiye.
- Eyuboglu, Y., Bektaş, O., Pul, D., 2007. Mid-Cretaceous olistostromal ophiolitic melange developed in the back-arc basin of the eastern Pontide magmatic arc (NE Turkey). *International Geology Review*, 49 (12), 1103-1126.
- Eyuboglu, Y., Dudas, F.O., Santosh, M., Zhu, D.C., Yi, K., Chatterjee, N., Akaryali, E., Liu, Z., 2016. Cenozoic forearc gabbros from the northern zone of the Eastern Pontides Orogenic Belt, NE Turkey: Implications for slab window magmatism and convergent margin tectonics. *Gondwana Research*, 33, 160-190.
- Eyuboglu, Y., Santosh, M., Dudas, F.O., Chung, S.L., Akaryali, E., 2011. Migrating magmatism in a continental arc: Geodynamics of the Eastern Mediterranean revisited. *Journal of Geodynamics*, 52, 2-15.
- Eyuboglu, Y., 2010. Late Cretaceous high-K volcanism in the eastern Pontides orogenic belt, and its implications for the geodynamic evolution of NE Turkey. *International Geology Review*, 52 (2-3), 142-186.
- Gomez-Ortiz, D., Agarwal, B.N.P., 2005. 3DINVER. M: A MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3-D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm. *Computer Geosciences*, 31, 513-520.
- Karner, G. D., Watts, A. B., 1983. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere at mountain ranges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B12), 10449-10477.
- Maden, N., Gelişli, K., Bektaş, O., Eyuboglu, Y., 2009. Two-and-three-dimensional crust topography of the Eastern Pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 18, 225-238.
- Maden, N., 2013. Geothermal structure of the eastern Black Sea basin and the eastern Pontides orogenic belt: Implications for subduction polarity of Tethys oceanic lithosphere. *Geoscience Frontiers*, 4, 389-398.
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential field tilt -a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Mindevalli, Ö.Y., Mitchell, B.J., 1989. Crustal structure and possible anisotropy in Turkey from seismic surface wave dispersion. *Geophysical Journal International*, 98, 93-106.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517.
- Oldenburg, D.W., 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39, 526-536.

- Oruç, B., Keskinsezer, A., 2007. Normalize tam Gradyent Yöntemi ile petrol sahalarındaki Manyetik Temel Kaya Ondülasyonunun Modellenmesi, IPETGAS.
- Oruç, B., Sertçelik, İ., Kafadar, Ö., Selim, H.H., 2013. Structural interpretation of the Erzurum Basin, Eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 105–113.
- Oruç, B., 2010. Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 168.10, 1769–1780.
- Pamukçu, O.A., Akçığ, Z., Demirbaş, Ş., Zor, E., 2007. Investigation of crustal thickness in eastern Anatolia using gravity, magnetic and topographic data. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 2345–2358.
- Parker, R.L., 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 31, 447–455.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., 2008. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 13–18, 2008. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>, (Accessed 8 Aug 2020).
- Rice, S.P., Roberson, A.H.F., Ustaömer, T., İnan, T., Taşlı, K., 2009. Late Cretaceous–Early Eocene tectonic development of the Tethyan Suture Zone in the Erzincan area, eastern Pontides, Turkey. *Geological Magazine*, 146 (4), 567–590.
- Spector, A., Grant F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293–302.
- URL-1, 2020. <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/>, (Accessed 8 Aug 2020).
- URL-2, 2020. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bolgeler/trabzon>. (Accessed 8 Aug 2020).
- U.S. Geological Survey, Digital Elevation Models GTOPO30, Virginia, 1998. http://webmap.ornl.gov/wcsdown/wcsdown.jsp?dg_id=10003_1, (Accessed 8 Aug 2020).

Araştırma Makalesi / Research Article

Nalbantlar Ovası (Söke, Aydın) Yeraltı Suyu ve Tarım Toprakları İnorganik Kalite Araştırması: Arsenik ve Uranyum Tehlikesi

Inorganic Quality Study of Groundwater and Agricultural Soils on Nalbantlar Plain (Söke, Aydın): Arsenic and Uranium Hazard

Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL¹ , Gültekin TARCAN¹ 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 İzmir

Geliş (Received): 09 Ağustos (August) 2021 / Düzeltme (Revised): 08 Ekim (October) 2021 / Kabul (Accepted): 1 Kasım (November) 2021

ÖZ

Bu çalışma, Batı Anadolu’da Aydın iline bağlı Söke Ovası doğusunda yer alan ovalarda tarım toprağı ve yeraltı suyu kalitelerinin incelenmesi ile insan sağlığı üzerindeki etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. İnceleme alanı ve çevresindeki jeolojik yapının temelini Menderes Masifi kayaçları oluşturmaktadır. Bölgede yüzeylenen gnays, granitoid ve şist metamorfik kayaçları; su ve toprakların kimyasını belirleyen önemli parametrelerdir. Suların içme amaçlı tüketiminde; çözünmüş As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, U ve Zn değerlerinin kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riski hesaplanmıştır. Yeraltı sularının kirlenmesine neden olan antropojenik ve jeojenik girdiler ayırt edilmiştir. Ek olarak, sulara majör iyonlar (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄, HCO₃) ve birçok eser element (Ag, Al, Co, Fe, Ge, Mn, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl ve V) analiz edilmiştir. Tarım topraklarının As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, U ve Zn değerleri analiz edilmiştir. Söke Ovası topraklarının elementçe zenginleşme faktörleri hesaplanarak temel değerler ile karşılaştırılmıştır. Toprakların solunması, yutulması ve deriyle teması yoluyla oluşan kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riski hesaplanmıştır. Bazı yeraltı suları gnays biriminden kaynaklı olduğu belirlenen, ortalamanın çok üzerinde çözünmüş uranyum ve arsenik içermektedir. Ovada, yeraltı suyu kuyularının derinliği arttıkça çözünmüş uranyum miktarında artış söz konusudur. Sınır değerinin (30 µg/L) 3 katı kadar uranyum içeren yeraltı suyu, Karacahayıt bölgesinde içme amaçlı tüketilmektedir. Yeşilköy, Karacahayıt ve Kisir mahallerinde yasal sınırın üzerinde (sırasıyla 23.1, 24.1 ve 61.1 µg/L) arsenik içeren yeraltı suyu, içme amaçlı tüketilmektedir. İçme amaçlı tüketilen yeraltı sularında en yüksek kanser riski arsenik için 2.07E-03 olarak Kisir bölgesinde belirlenmiştir. Tarım topraklarında en yüksek kanser riski arsenik için 2.38E-04 olarak Sayrakçı bölgesinde belirlenmiştir. Sağlık açısından riskli olan suları tüketen ve topraklarda tarım etkinliğinde bulunan yöre halkının sağlık durumu araştırılmalı ve çözüm önerileri uygulanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi, Su Kimyası, Su Kirliliği, Kanser, Toprak Kirliliği, Yeraltı suyu

ABSTRACT

This study includes the investigation of the quality of agricultural soils and groundwater in the plains located in the east of Söke Plain in Aydın province in Western Anatolia and the detection of its effect on human health. The rocks belonging to the Menderes Massif form the basis of the geological structure in the study area and surrounding. Metamorphic rocks composed of gneiss, granitoid and rocks outcropping in the region are essential parameters

determining the water and soils' chemistry. The total carcinogenic and non-carcinogenic health risk values of waters were calculated for dissolved As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, U and Zn. Anthropogenic and geogenic inputs that cause groundwater contamination were distinguished. Also, major ions (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO_4 , HCO_3) and many trace elements (Ag, Al, Co, Fe, Ge, Mn, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl and V) were analyzed. Collected soil samples were analyzed for As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, U and Zn. The elemental enrichment factors of Söke Plain soils were calculated and compared with the background values. Carcinogenic and non-carcinogenic total health risks, which is occurred by inhalation, ingestion and dermal contact of soil, were calculated. Some groundwater contains above-average dissolved uranium and arsenic, which are determined to originate from the gneiss unit. In the plain, the abundance of dissolved uranium increases as the depth of groundwater wells rises. Groundwater containing uranium 3 times the limit value (30 µg/L) is consumed for drinking purposes in the Karacahayıt region. Groundwater containing arsenic above the allowed limit in Yeşilköy, Karacahayıt and Kisir regions (23.1, 24.1 and 61.1 µg/L, respectively) is consumed for drinking purposes. The highest cancer risk for As in groundwater consumed for drinking was found to be $2.07E-03$ in Kisir. The highest cancer risk for As in agricultural soil was found to be $2.38E-04$ in Sayrakçı. The local people health status who work on soil with health risks and consume carcinogenic waters should be investigated, and suggestions for the solution should be implemented.

Keywords: Human Health Risk Assessment, Water Chemistry, Water Contamination, Cancer, Soil Contamination, Groundwater

GİRİŞ

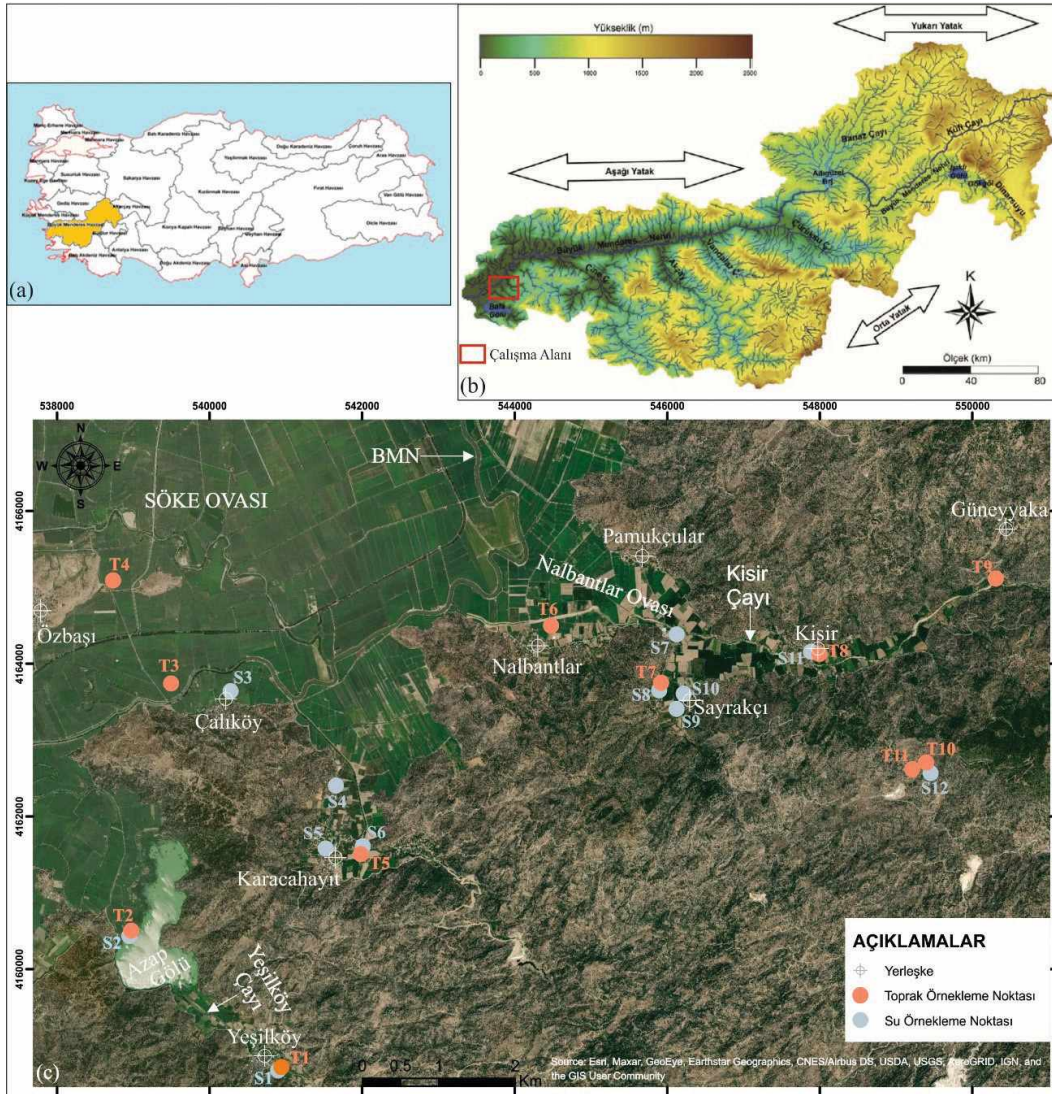
İçme, sulama ve/veya hayvancılık amacıyla kullanılan yüzey ve yeraltı suları ile tarımsal faaliyette kullanılan toprağın korunması insanlığın hayatta kalması için vazgeçilmezdir. Jeojenik ve antropojenik girdiler nedeniyle su ve toprakta, kimyasal elementlerin birikimi gerçekleşmektedir. Jeolojik süreçler engellenemese bile olası etkisinin araştırılması, halk sağlığı ve sürdürülebilir kaynak yönetimi için gerekliliktir.

Çalışma alanı Söke – Koçarlı Ovası 2. Kısım olarak anılan Azap Gölü kuzeydoğusundaki Nalbantlar Ovası, Karacahayıt bölgesi ve güneydoğusundaki Yeşilköy Ovası'nı kapsamaktadır (Şekil 1). Küçüksümbül vd. (2022) tarafından Söke Ovası su ve topraklarının kimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Azap Gölü ve çevresinde gnays biriminden kaynaklı jeojenik kirlenme rapor edilmiştir. Söke Ovası'nın su ve topraklarını kapsayan çalışmanın ardından jeojenik kirlenme beklenen yerleşkelere odaklanılmıştır. İçme, sulama, hayvancılık amaçlı kullanılan yeraltı suları ve tarım yapılan

topraklardan örneklemeler yapılmıştır. Söke Ovası'ndan farklı biçimde Büyük Menderes Nehri (BMN) sularından bağımsız olarak Kisir Çayı ve yağışlı dönem dereleri ile beslenen ovalarda, birçok noktada üretim sağlanan yeraltı suyu kuyuları bulunmaktadır. Kisir, Sayrakçı, Nalbantlar, Karacahayıt, Çalıköy ve Yeşilköy bölgesindeki örneklemeler üzerinden su ve toprak kalitesi araştırılmıştır. Jeolojik etki göz önünde bulundurularak yeraltı suyu ve tarım topraklarının inorganik madde bolluğunun nedenleri ve insan sağlığına uygunluğu değerlendirilmiştir.

YÖNTEM VE MATERYAL

Yerleşim bölgelerinden 9 adet su ve 8 adet toprak örnekleme yapılmıştır. Su ve toprak örnek noktaları literatürden alınanlarla birlikte Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Taze formasyon suyu örneklemeleri, kuyularda 15 dakika süren su çekimi ardından yapılmıştır. Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık değerleri arazide multimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Tüm su örnekleri, yüksek yoğunluklu polietilen şişelere örneklenmiş olup 4 °C'de korunmuştur.



Şekil 1. (a) Büyük Menderes Havzası'nın konumu, (b) Büyük Menderes Havzası ve çalışma alanının havzadaki konumu (Kazancı vd., 2011), (c) Çalışma alanının uydu görüntüsü ve örnekleme noktalarının yeri.

Figure 1. (a) Location of Büyük Menderes Basin, (b) Büyük Menderes Basin and location of the study area in the Basin, (c) Satellite image of the study area and location of the sampling points.

Majör katyon (Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+) analizleri Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeokimya Laboratuvarında Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Majör anyon (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) analizi için volümetrik ve gravimetrik

analiz yöntemleri uygulanmıştır. S1, S6, S8, S10 ve S12 örneklerinin anyon analizlerinde teknik sorunlar yaşanmıştır. İz element analizleri için $0.45 \mu\text{m}$ selüloz filtreler kullanılmış ve örnekler pH değeri 2'ye düşürülene kadar HNO_3 eklenerek asidik hale getirilmiştir.

As, Ag, Al, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl, U, V ve Zn analizleri ICP-MS aracılığıyla S5, S7, S9 ve S11 suları için Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarı'nda; S1, S6, S8, S10 ve S12 suları için ODTÜ Kimyasal Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ortalama ölçüm hatası mg/L (ppm) düzeyindeki derişimler için okunan değerin %5'i, µg/L (ppb) düzeyindeki derişimler için okunan değerin %10'u dolayındadır. S2 Azap Gölü ve S13 Büyük Menderes Nehri yüzey suyu örneklemeleri Küçüksümbül vd. (2020)'den, S3 Çalıköy ve S4 Karacahayıt yeraltı suları analizleri Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır. S13, Büyük Menderes Nehri'nin Söke Ovası havza girişinden örneklenmiştir. Çalışma alanının yaklaşık 10 km kadar kuzeyinde yer almaktadır. Bu nedenle, yer bulduru ve jeoloji haritasında işaretlenmemiştir. Tarım yapılan topraklarda yüzey kirlenmesi giderildikten sonra (5-15 cm), 8 adet örnekleme yapılmıştır. Metal donanım kullanımından kaçınılmıştır. 80 °C'de kurutulan örnekler, Dokuz Eylül Üniversitesi Jeokimya Laboratuvarında saklanmıştır. Toprakların kimyasal içerikleri, Kanada ACME Laboratuvarı'nda ICP-MS kullanılarak belirlenmiştir. Toprak kimyasında As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Sb, Pb, U ve Zn elementlerine odaklanılmıştır. T2 Azap Gölü sedmanı, T3 Çalıköy ve T4 Özbaşı toprak analizleri Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır.

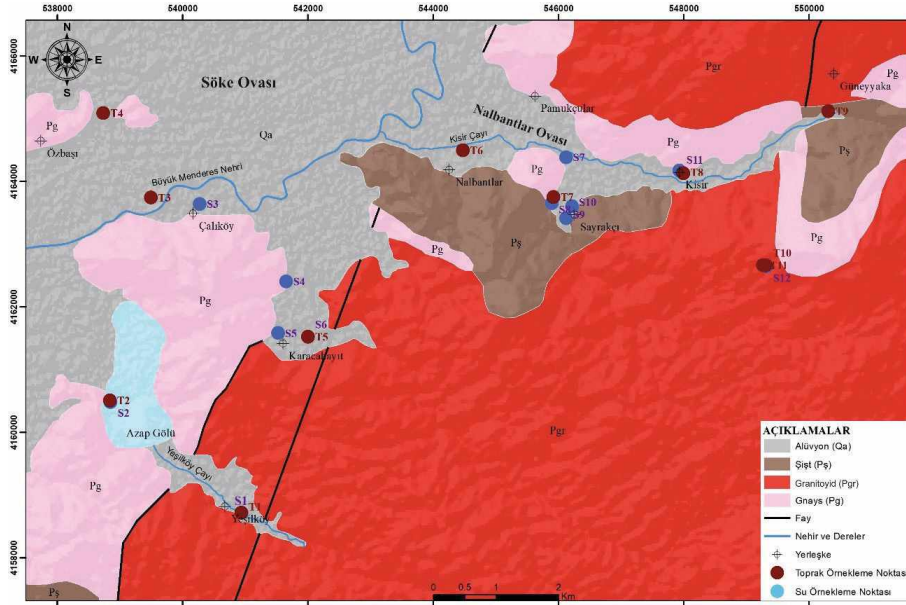
Jeoloji, Hidrokimya, Jeokimya

Çalışma alanı Menderes Masifi içerisinde Söke Grabeni'nin doğu kanadında yer almaktadır. Çalışma alanındaki, en yaşlı kayaç Prekambriyen yaşlı gnayslardır. Gnays birimindeki kuvars damarı ve gnaysa geçişteki kuvarsitlerde aynı yönlü çatlaklarda ikincil uranyum minerallerinin yerleştiği rapor edilmiştir (Öztunalı, 1965). Kisir-Osmankuyu sahasında %0.02-0.03 tenörlü 11.530 ton U_3O_8 , %0.03'den büyük tenörlü

34.365 ton U_3O_8 olmak üzere toplam 45.895 ton muhtemel rezerv rapor edilmiştir (Güney ve Akgül, 2019). Üst Paleozoyik-Prekambriyen yaşlı granitoid ve Paleozoyik yaşlı şişt birimi gnaysları üstlenmektedir (Şekil 2). Gnays, granitoid ve şişt birimleri dokanaklar hariç geçirimsiz olma özelliği gösterirler. Bazı tektonik kökenli çatlaklarda yağışlı dönemde yağmur sularının düşük debide yüzeylendiği gözlenmiştir. Kuvaterner yaşlı alüvyon ise drenaj ağındaki kayaçlar ve dere sedimanları ile beslenmektedir. Alüvyon birimi yüksek geçirimlidir. Söke Ovası'nın aksine birçok sığ ve derin kuyudan yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. Bu sular içme, sulama ve hayvancılık gibi farklı amaçlarla değerlendirilmektedir.

Örnekleme Bilgileri ve Analiz Sonuçları

T1 toprağı granitoid biriminde yer alan alüvyon üzerine kurulu Yeşilköy yerleşkesinin tarım toprağını temsil etmektedir. Aynı bölgede içme ve sulama amaçlı kullanılan 12 metre derinliğindeki S1 kuyu suyu örneklenmiştir. T2 göl sedmanı ve S2 su örnekleme Azap Gölü'nün kimyasal karakterini yansıtmaktadır. T3 ve T4 toprakları Büyük Menderes Nehri ile sulanan topraklardır. S3 kuyusu 18 metre derinliğinde olup Çalıköy bölgesinde içme amaçlı tüketilen yeraltı suyudur. Büyük Menderes Nehriyle (S13) beslenmesi olası yeraltı suyudur. S4, S5 ve S6 kuyu suyu örnekleri ise Karacahayıt bölgesinden alınmıştır. S4 ve S6 kuyuları yaklaşık 10 metre derinliğindedir ve içme amaçlı yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. S5 kuyusu 45 metre derinlikte olup içme, sulama ve hayvancılık amaçlı tüketilmektedir. S4 ve S5 yeraltı suları alüvyon-gnays birimi dokanağında yer almayken, S6 örnekleme doğrudan bölgedeki alüvyon akiferini temsil etmektedir. T5 toprağı Karacahayıt bölgesi tarım arazilerini temsil eden toprak örneklemesidir.



Şekil 2. Çalışma alanının örnek noktaları işaretlenmiş jeoloji haritası (MTA, 2002).

Figure 2. Geological map of the study area with the sample points marked (MTA, 2002).

T6 toprağı Kisir Çayı yakınından Nalbantlar bölgesindeki tarım topraklarından örneklenmiştir. Şişt birimi ve Kisir Çayı sedimanları ile etkileşim halindedir. S7 kuyusu 10 metre derinlikte olup içme ve sulama amaçlı tüketilmektedir. Gnays birimi ile alüvyon dokanağına yakındır ve Kisir Çayı ile etkileşim halindedir. T7 toprağı gnays birimi yakınında, tarım arazisinden örneklenmiştir. S8, S9 ve S10 yeraltı suyu örneklemeleri ve T7 toprağı Sayrakçı bölgesini temsil etmektedir. 40 metre derinliğindeki S8 kuyusundan üretilen yeraltı suyu sulama amaçlı tüketilmekteyken, 10'ar metre derinlikteki S9 ve S10 kuyularından üretilen yeraltı suları içme amaçlı tüketilmektedir. T8 toprak örnekleme Kisir bölgesinin tarım arazilerini temsil etmektedir. S11 yeraltı suyu ise yaklaşık 10 metre derinlikte kuyudan örneklenmiştir. Bölgedeki yaklaşık aynı derinlikteki birçok kuyu suyu içme amaçlı tüketilmektedir. T9 toprağı ovanın en doğusunda şişt birimi yakınında yer almaktadır. Civarda yeraltı suyu üretim

kuyusuna rastlanmamıştır. Kisir Çayı suları, içme ve sulama amaçlı tüketilmektedir. T10 ve T11 toprak örnekleri ise gnays ve granitoid birimleri dokanağı yakınından örneklenmiştir. Bölgede yeraltı su kuyusu bulunmamakta, tarımsal etkinlik ve yerleşik nüfus düzlüklerle sınırlıdır. S12 kaynağı bölgenin içme ve sulama ihtiyacının karşılandığı düşük debili kaynak suyudur. T10 ve T11 örnekleri birbirine çok yakın noktalardan örnekleme yapılmıştır. T10 toprağı S12 kaynağının çıktığı bölgeyi temsil ederken, T11 toprağı yakınındaki tarım arazisinden örneklenmiştir. Toprak örneklerinin bölgeyi en iyi şekilde temsil edebilmesi için ağılardan uzakta, herhangi atık ya da gübrenin depolanmadığı alanlar tercih edilmiştir. Su örneklerinin fiziksel parametreleri, kimyasal analiz sonuçları ve kullanım amaçları Çizelge 1'de listelenmiştir. Majör iyonlar (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄ ve HCO₃) mg/L olarak, diğerleri µg/L olarak verilmiştir. Toprak örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Su örneklerinin kullanım amaçları (İ:İçme, S:Sulama, H:Hayvancılık), kuyu derinliği, bazı fiziksel parametreleri ve kimyasal analiz sonuçları (Major iyonlar mg/L, diğerleri µg/L olarak verilmiştir. En alt satırda yazan değerler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından içme amaçlı tüketilen suların insan sağlığına uygunluğu için önerilen çözünmüş madde bolluklarıdır.)

Table 1. Intended use of water (İ: Drinking, S: Irrigation, H: Livestock), well depth and chemical analysis results with some physical parameters of waters (Major ion value is given in mg/L, others µg/L. The values written on the bottom line are the dissolved element abundances recommended by the World Health Organization (WHO, 2017) for the suitability of drinking water for human health.)

Kod	Amaç	Derinlik	ÖEl	pH	T (°C)	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ⁻²	HCO ₃ ⁻	As	Ag	Al	B	Ba	Cd
S1	İ	12 m	365	6.55	17.7	37.0	10.0	3.6	21.0	*	*	*	23.1	1.4	**	**	23	**
S2 ^(a)	S	-	590	8.92	13.1	50.1	85.6	23.3	54.6	85	61.7	488.0	27.7	**	7.4	197	40.9	0.09
S3 ^(b)	İ	18 m	943	7.16	14.1	214.6	32.0	3.3	1.1	56	117.55	605.12	0.6	**	12.0	44.6	37.9	**
S4 ^(b)	İ	10 m	518	6.8	14.7	108.7	7.9	5.2	1.0	56	110.02	146.4	3.1	**	7.0	84	59.3	**
S5	İ,S,H	45 m	1268	6.52	19.7	87.6	52.4	37.9	58.3	45	108.25	512.4	24.1	**	7.3	148	124	0.19
S6	İ	10 m	415	6.30	18.5	24.0	9.8	7.5	27.0	*	*	*	**	**	**	**	15.2	**
S7	İ,S	10 m	631	8.17	14.0	145.9	8.9	3.5	1.6	45	73.5	305	6.3	**	7.4	48.6	20.5	0.05
S8	S	40 m	943	7.09	19.9	107.0	27.0	40.0	34.0	*	*	*	**	**	**	**	88	**
S9	İ	15 m	484	8.11	15.4	42.4	27.9	21.0	47.1	40	36.9	280.6	1.5	**	9.0	32.6	70.2	0.08
S10	İ	10 m	440	7.39	17.0	69.0	9.5	3.6	14.5	*	*	*	**	**	**	**	28	**
S11	İ	10 m	225	7.72	12.7	13.8	11.9	15.9	42.0	45	43.5	85.4	61.1	**	13.4	26.9	6.57	0.07
S12	İ,S	-	290	6.31	10.0	13.3	5.6	2.4	33.0	*	*	*	**	**	0.16	**	17.2	**
S13 ^(a)	S,H	-	2110	8.25	14.4	87.0	187.0	38.0	101.0	185	486	573	93.1	0.6	1910	3210	2063	0.30
WHO						***	***	***	200	250	250	***	10	***	900	2400	1300	3

Çizelge 1. (devamı)
Table 1. (continued)

Kod	Cr	Cu	Co	Fe	Ge	Li	Mn	Ni	Pb	Pd	Rb	Se	Si	Sr	Ta	Tl	U	V	Zn
S1	**	**	5.6	**	**	0.11	9.8	11.4	3.4	**	4.4	**	7.2	122	**	**	2.8	**	**
S2 ^(a)	0.6	3.5	**	39.6	0.03	12.7	6.3	3.3	2.2	0.2	5.1	0.7	2.4	453	7.3	0.011	3.2	1.9	124
S3 ^(b)	0.4	2.5	**	34.2	0.03	12.5	0.6	14.8	2.1	0.1	21	**	5.9	421	2	0.024	8.6	**	6
S4 ^(b)	0.6	7.7	**	34.2	**	8.1	103.3	2.3	2.6	0.1	4.3	**	5.1	226	1.8	0.012	0.6	0.5	33.6
S5	0.9	6.6	**	35.4	**	19.6	5955	6.3	2.6	0.2	2.9	2.5	3.4	423	2.1	0.01	90	3	81.1
S6	4.6	**	**	**	**	0.28	1	**	1.6	**	2.8	**	17.4	140	**	**	0.1	**	**
S7	0.4	5.3	**	35.4	**	4.5	123.3	1.9	2.2	0.03	0.7	0.8	9.2	236	3.3	0.003	12	0.6	15.4
S8	**	**	**	**	**	0.12	10.5	**	2.5	**	4.7	**	10.2	218	**	**	36	**	**
S9	0.5	7.2	**	35.2	**	3.5	3.5	2.2	2.2	0.03	1.2	1.6	1.9	185	4.1	0.017	23	0.1	97
S10	5.2	**	**	**	**	0.11	0.286	**	5.3	**	*	**	6.6	116	**	**	3.6	**	**
S11	0.2	1.8	**	31.4	0.07	15.5	2	2.6	2.1	**	2.3	**	2.4	56	2.8	0.015	14	0.4	9.6
S12	**	**	5.7	5.7	25	0.12	39	5.1	1.6	**	70	**	15.1	**	**	**	36	**	**
S13 ^(a)	8.4	57.0	**	199	0.4	109	4.6	38.0	38.9	1.7	31.0	**	11.6	16140	16.9	0.114	6.4	4.0	200.1
WHO	50	2000	***	***	***	***	***	70	10	***	***	40	***	***	***	***	30	***	***

^(a): Küçüksimbül vd. 2020, ^(b): Küçüksimbül vd. 2022, *: Teknik aksaklık nedeniyle analiz edilememiştir. **: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. İlgili laboratuvar tarafından alüminyum 40, arsenik 1, bakır 0.5, bor 30, çinko 30, demir 40, germanyum 0.9, gümüş 0.1, kadmium 0.03, kobalt 5, krom 1, nikel 0.1, paladyum 0.2, rubidyum 0.09, selenyum 11, stronsiyum 50, talyum 0.03, tantal 0.03, vanadyum 0.1 µg/L olarak rapor edilmiştir. ***: Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından içme amaçlı tüketim için herhangi limit değeri önerilmediğini ifade etmektedir.

Çizelge 2. Toprak örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (Söke Ovası ve civarı için kullanılan temel değerler (TD) koyu yazılmıştır. Tüm değerler mg/kg olarak verilmiştir.).

Table 2. Chemical analysis results of soil samples (Background values used for Söke Plain and its surroundings are written in bold. All values are given in mg/kg).

Kod	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	Zn
T1	14.9	*	420.9	13.7	3.7	*	8.5	10.5	0.50	4.6	18.0
T2 ^a	36.9	0.03	16.4	54.7	23.9	0.007	20.9	2.7	0.42	1.4	16.7
T3 ^a	9.7	0.13	22.3	561.1	19.2	0.031	274.2	9.1	0.35	0.9	42.9
T4 ^a	14.8	0.18	28.7	355.8	29.6	0.065	305.4	14.3	0.36	1.9	57.2
T5	4.3	*	191.6	20.5	5.2	*	9.3	6.6	0.50	3.4	25.0
T6	29.2	0.19	19.8	61.6	21.7	0.038	24.7	9.7	6.77	2.3	57.7
T7	32.4	0.2	89.3	61.6	23.4	*	25.4	12.4	1.60	3.5	89.0
T8	11.0	0.15	14.0	68.4	20.7	0.056	23.5	10.6	0.59	5.2	55.8
T9	6.1	*	95.0	34.2	10.9	*	14.7	5.1	0.40	2.9	31.0
T10	9.6	*	69.3	27.4	9.1	*	9.5	12.2	0.20	14.7	26.0
T11	2.1	*	94.7	13.7	4.5	*	5.7	6.1	0.10	5.7	15.0
TD^a	7.5	0.12	26	200	22	0.09	150	15	0.35	2.1	40

^a: Küçüksümbül vd. 2022'den alınmıştır.

*: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. Kadmiyum için 0.1 mg/kg, cıva için 0.01 mg/kg olarak rapor edilmiştir.

Toprak Kirliliği Değerlendirme Kriterleri

Metal ve yarı metallerce zengin kayaçların ayrışması, ana jeojenik girdilerin nedeni olarak açıklanabilir. Noktasal olarak herhangi zenginleşme olup olmadığının anlaşılabilmesi için, bölgedeki kayaçların kimyası göz önünde bulundurularak insan etkinliğinin kısıtlı olduğu topraklardan alınan örneklerden temel değer oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada, Söke Ovası drenaj ağındaki kayaçlar (mermer, karbonat, gnays) ve topraklar üzerinden hesaplanan temel değer kullanılmıştır (Küçüksümbül vd., 2022). Topraktaki kirlenici maddelerin üst limit değerleri devletler tarafından yasallaştırılmaktadır. Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) gibi bazı uluslararası kuruluşlar tarafından yapılan çalışmalarla da sınır değerler önerilmektedir. Türkiye (TS, 2010), Finlandiya (MEF, 2007), Kanada (CSQG, 2010) ile Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2007) tarafından kullanılan limit değerler ve literatür taraması

sonucu elde edilen üst kıtasal kabuk ortalama değerleri (Goldschmidt, 1937; Turekian ve Wedepohl, 1961; Wedepohl, 1995; McLennan, 2001; Rudnick vd., 2003), Söke Ovası temel değerleri ile birlikte Çizelge 3'de listelenmiştir.

Zenginleşme Faktörü

Zenginleşme faktörü (ZF), kontaminasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Çevik vd., 2009; Bourennane vd., 2010; Zhao vd., 2015; Sakan vd., 2016; Akinci vd., 2019). ZF, topraktaki metal birikimini matematiksel olarak ifade etmek için kullanılır. Bu yöntem; arsenik (As), kadmiyum (Cd), kobalt (Co), krom (Cr), bakır (Cu), cıva (Hg), nikel (Ni), kurşun (Pb), antimon (Sb), uranyum (U) ve çinko (Zn) olmak üzere 11 element içinde kullanılmıştır. Zenginleşme faktörü değeri, aşağıdaki yer alan eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Sutherland, 2000):

Çizelge 3. Eser elementlerin literatürdeki üst kıtasal kabuk değerleri (a), Söke Ovası temel değeri ve toprak numunelerinin en düşük, en fazla ve ortalama değerleri (b), Türkiye (TS), Finlandiya (MEF), Kanada (CSQG) ve Birleşmiş Milletler (FAO) tarımsal toprak eşik değerleri (c) (Tüm değerler mg/kg olarak verilmiştir).

Table 3. Trace element composition of the upper continental crust in literature (a), background value (TD) suggested in this study and minimum, maximum, average values of metal(loid)s accumulation of soil samples (b), threshold values of agricultural soil quality regulations of Turkey (TS), Finland (MEF), Canada (CSQG), and the United Nations (FAO) (c) (All values are given in mg/kg).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	V	Zn
(a) Goldschmidt (1937)	5	0.5	40	200	100	0.5	100	16	1	4.0	100	40
Turekian ve Wedepohl (1961)	13	0.3	19	90	45	0.4	68	20	1.5	3.7	130	95
Wedepohl (1995)	2	0.102	11.6	35	14.3	0.056	18.6	17	0.31	2.5	53	52
McLennan (2001)	1.5	0.098	17	83	25	-	44	-	0.2	2.8	107	71
Rudnick vd. (2003)	4.8	0.09	17.3	92	28	0.05	47	17	0.4	2.7	97	67
(b) Temel Değer*	7.5	0.12	26	200	22	0.09	150	15	0.35	2.1	45	40
En düşük	2.1	0.03	14	13.7	3.7	<0.01	5.7	2.7	0.10	0.9	12	15
En fazla	36.9	0.20	420.9	561.1	29.6	0.065	305.4	14.3	6.77	14.7	61	89
Ortalama	15.5	-	96.5	115.7	15.6	-	65.6	9.0	1.07	4.2	27.5	39.5
(c) TS (2010)	3	27	5	10	514	3	13	135	2	-	256	6811
MEF (2007)	5	1	20	100	100	0.5	50	60	2	-	100	200
CSQG (2010)	12	1.4	40	64	63	6.6	45	70	20	23	130	250
FAO (2007)	1	1	-	100	200	2	100	200	-	-	-	150

*: Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır.

$$ZF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_{ref}}\right)_{Toprak}}{\left(\frac{B_n}{B_{ref}}\right)_{Temel Değer}} \quad (1)$$

C_n seçilen elementin her topraktaki bolluğu (Çizelge 2), C_{ref} her topraktaki referans elementin bolluğu, B_n hesaplanan temel değeri (Çizelge 3), referans elementin bolluğudur. Çalışma kapsamında referans element olarak alüminyum (Al) seçilmiştir. Sutherland (2000)'e

göre ZF değeri 2'den küçük olduğunda, toprakta minimum zenginleşme veya hiç zenginleşme yok olarak sınıflandırılır. Zhang ve Liu (2002) tarafından yapılan çalışmada 0.5 ile 1.5 arasındaki eser element bolluğu, zenginleşmenin tamamen doğal süreçlerden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle, zenginleşme katsayısı 1.5 ila 2 olan topraklar, düşük kirlenme olarak gruplandırılmıştır. 2 ile 5 arası değerler

kısmen kirlenme, 5 ile 20 arası önemli ölçüde kirlenme, 20 ile 40 arası fazlasıyla kirlenme ve 40'dan büyük değerler ise aşırı derece kirlenme olarak sınıflandırılır (Sutherland, 2000).

Toprakların İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi

Topraktan kaynaklanabilecek kanserojen risk (KR) ve kanserojen olmayan risk katsayısı (RK) soluma, yutma (oral yolla) ve deriyle temas olarak 3 kategoride incelenmektedir (Lim vd., 2008, Wongsosuluk vd., 2014, Peña-Fernández vd., 2014). Kanserojen olmayan toplam risk (TRK) 3 kategorinin toplanması ile elde edilir. 1'den büyük olması riskli kabul edilir (US EPA, 1992). Her kategori için farklı hesaplamalar yapılmaktadır. Günlük kronik alım (GKA) değerinin, oral referans doza (RfD) bölünmesi ile oral yolla ve deri ile temasla gerçekleşebilecek kanserojen olmayan risk hesaplanabilmektedir. GKA değerinin referans konsantrasyona (RfC) bölünmesi ile soluma yoluyla gerçekleşebilecek kanserojen olmayan risk hesaplanabilmektedir. GKA değerinin eğim faktörü (SP) ile çarpılmasıyla ise kanser riski (KR) belirlenebilmektedir (RAIS, 2021a). İlgili eşitlikler aşağıda sıralanmıştır. Eşitliklerdeki kısaltmaların tanımları, birimleri ve değerleri (US EPA, 2004). ile referans doz (RfD), referans konsantrasyon (RfC) ve eğim faktörü (SP) değerleri (US EPA IRIS, 2021). Çizelge 4 ve 5'te listelenmiştir. Cıvanın (Hg) oral referans doz değeri (RfD_{oral}) ile kurşunun (Pb) eğim faktör değeri (SF_{oral}) RAIS (2021b)'den alınmıştır. Kadmiyum (Cd), kobalt (Co), krom (Cr), nikel (Ni) için eğim faktör değerleri (SF_{soluma}) Ferreira-Baptista ve De Miguel (2005)'den ve kurşunun (Pb) oral referans doz değeri (RfD_{oral}) Peña-Fernández vd. (2014)'den alınmıştır. Deriyle temasın referans doz değerinin hesabı için RfD_{oral} değeri ABS_{GI} ile çarpılmış olup deriyle temasta kullanılacak eğim faktörü ise SF_{oral} değerinin

ABS_{GI} değerine bölümü ile bulunabilmektedir (RAIS, 2021a). Çocuklar için; maruz kalma süresi (ED) 6 yıl, vücut ağırlığı (BW) 6 kg, yutma oranı (Oral_R) 100 mg/gün, soluma oranı (Soluma_R) 7.6 m³/gün ve maruz kalan cilt yüzey alanı (SA) 2200 cm² olarak hesaplanmıştır. Deri emilim faktörü (ABS_d) arsenik için 0.03, diğerleri için ise 0.001 olarak alınmıştır (Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005; Luo vd., 2012).

$$GKA_{soluma} = \frac{C \times EF \times Soluma_R \times ED}{PEF \times 24 \times AT_{nc}} \quad (2)$$

$$GKA_{oral} = \frac{C \times Oral_R \times EF \times ED \times CF}{BW \times LT} \quad (3)$$

$$GKA_{deri} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$RK = \frac{GKA}{Rfd} \quad (5)$$

$$TRK = \sum RK_{soluma} + RK_{oral} + RK_{deri} \quad (6)$$

$$KR = GKA \times SF \quad (7)$$

Su Kirliliği Değerlendirme Kriterleri

İçme sularındaki kirletici maddelerin üst limit değerleri devletler tarafından yasallaştırılmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi bazı uluslararası kuruluşlar tarafından yapılan çalışmalarla da kılavuz değerler önerilmektedir. Evrensel olarak kabul gören genel bir standart olmamakla birlikte birçok limit değer konusunda yasalar ve uluslararası kuruluşlar hem fikir olmuş denilebilir. Bu çalışma kapsamında Avrupa Birliği (EU, 2014), Türkiye (TS, 2013), Amerika Birleşik Devletleri (US EPA, 2018) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilen limit değerleri karşılaştırılmıştır. Suların oral referans doz değeri (Pena-Fernandez vd., 2014; US EPA IRIS, 2021) ve eğim faktörleri (Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005; RAIS 2021b; US EPA IRIS, 2021) Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 4. Eşitliklerde kullanılan kısaltmaların tanımı, birimi ve değerleri.

Table 4. Definitions, units and values of abbreviations used in mention equations.

Kısaltma	Tanım	Birim	Değer
ABS _d	Deri emilim faktörü	-	As için 0.03, diğerleri 0.001
AF	Cilde tutunma faktörü	mg/cm ²	0.2
AT _c	Ortalama Zaman	gün	LT
AT _{nc}	Ortalama Zaman	gün	ED
BW	Vücut Ağırlığı	kg	70
C	Madde Bolluğu	mg/kg	Çizelge 2
CF	Dönüşüm Faktörü	-	1.00E-05
ED	Maruz kalma Süresi	yıl	40
EF	Maruz kalma Sıklığı	gün/yıl	313
ET	Maruz kalma Zamanı	sa/gün	24
Oral _R	Yutma Oranı	mg/gün	200
Soluma _R	Soluma Oranı	m ³ /gün	20
LT	Yaşam Süresi	gün	28579
PEF	Partikül Emisyon Faktörü	m ³ /kg	1.36E+09
SA	Maruz kalan cilt yüzey alanı	cm ²	5700
SF	Eğim Faktörü	mg ⁻¹ .gün ⁻¹ .kg	Çizelge 5

Çizelge 5. Eşitliklerde kullanılan referans doz (RfD), referans konsantrasyon (RfC), eğim faktörü (SF) ve absorpsiyon oranı (ABS_{Gl}) değerleri.

Table 5. Reference dose (RfD), reference concentration (RfC), slope factor (SF) and absorption rate (ABS_{Gl}) values used in the equations.

	RfD _{oral}	RfC _{soluma}	RfD _{deri}	ABS _{Gl}	SF _{oral}	SF _{soluma}	SF _{deri}
As	3.00E-04	1.50E-05	3.00E-04	1	1.50E+00	1.51E+00	1.50E+00
Cd	5.00E-04	1.00E-05	1.25E-05	0.025	-	6.30E+00	-
Co	3.00E-04	6.00E-06	3.00E-04	1	-	9.80E+00	-
Cr	3.00E-03	1.00E-04	7.50E-05	0.025	5.00E-01	4.20E+00	2.00E+01
Cu	4.00E-02	-	4.00E-02	1	-	-	-
Hg	1.60E-04	3.00E-04	1.60E-04	1	-	-	-
Ni	2.00E-02	9.00E-05	8.00E-04	0.04	-	8.40E+00	-
Pb	3.50E-03	-	3.50E-03	1	8.50E-03	-	8.50E-03
Sb	4.00E-04	3.00E-04	6.00E-05	0.15	-	-	-
U	2.00E-04	4.00E-05	2.00E-04	1	-	-	-
Zn	3.00E-01	-	3.00E-01	1	-	-	-

Küçüksümbül, Tarcan

Çizelge 6. Elementlerin oral referans doz (mg.gün.kg^{-1}) ve eğim faktörü değerleri ($\text{mg}^{-1}.\text{gün}^{-1}.\text{kg}$) ile içme suyu limit değerleri (mg/L).

Table 6. Oral reference dose (mg.day.kg^{-1}) and slope factor ($\text{mg}^{-1}.\text{day}^{-1}.\text{kg}$) values of elements with limit values of water for drinking purposes (mg/L).

	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn
Oral Referans Doz (RfD)	0.0003	0.2	0.2	0.0005	0.003	0.04 ^(a)	0.02	0.0035 ^(b)	0.0002	0.3
Son revize (RfD)	1991	2004	2005	1989	1998	-	1991	-	1989	2005
Eğim Faktörü (SF)	1.5	-	-	-	0.5 ^(c)	-	-	0.0085 ^(a)	-	-
WHO (2017)	0.01	2.4	1.3	0.003	0.05	2	0.07	0.01	0.03	-
EU (2014)	0.01	1	-	0.005	0.05	2	0.02	0.01	-	-
US EPA (2018)	0.01	-	2	0.005	0.1	1.3	-	0.015	0.03	-
TS (2013)	0.01	1	-	0.005	0.05	2	0.02	0.01	-	-

^(a): RAIS 2021b, ^(b): Peña-Fernández vd., 2014, ^(c): Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005'den alınmıştır.

Çizelge 7. Günlük kronik alımın (GKA) hesabında kullanılan parametrelerin tanımı, birimi ve değerleri.

Table 7. Definition, unit and values of parameters used in the calculation of chronic daily intake (GKA).

Parametreler	Tanım	Birim	Değer
C	Toplam çözünmüş madde miktarı	$\mu\text{g/L}$	Çizelge 1
IR	Günlük su alım miktarı	L/Gün	3.1
EF	Maruz kalma sıklığı	Gün/Yıl	365
ED	Maruz kalma süresi	Yıl	45
BW	Vücut ağırlığı	Kg	70
LT	Ortalama ömür	Gün	28579
10^{-3}	$\mu\text{g/L}$ değerini mg/L 'ye çevirme amaçlı	-	0.001

İçme Sularının İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi

Uygulanan yöntem, içme suyunda analiz edilen elementlerin insan sağlığına olan etkisinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için kullanılmaktadır (Wongsasuluk vd., 2014; Saha vd., 2017; Shil ve Shingh, 2019; Prasad vd., 2020). Denklemin parametreleri ve değerleri Çizelge 7'de ifade edilmiştir. Günlük kronik alım (GKA)

aşağıda yer alan eşitlik ile hesaplanmaktadır (US EPA, 1992):

$$\text{GKA} = \frac{\text{C} \times 10^{-3} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{LT}} \quad (8)$$

Oral referans doz (RfD) değeri, araştırmalar sonucunda belirlenen dozu ifade eder (US EPA IRIS, 2021). Kanserojen olmayan sağlık riski (TRK), her bir çözünmüş madde için tehlike

katsayısı (HQ) cinsinden ifade edilir. Kural olarak, $HQ \leq 1$ çok az endişe kaynağıdır, ancak $HQ \geq 1$ endişe riski taşır (US EPA 1999). Her elementin risk katsayısı (HQ), aşağıdaki verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$HQ = \frac{GKA}{RfD} \quad (9)$$

Kanserojen risk, bireyin arsenik (As) gibi tehlikeli elementlere ömür boyu maruz kalmasından kaynaklanan herhangi bir kanser türü geliştirme olasılığıdır ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$R_{ca} = GKA \times SF \quad (10)$$

10^{-6} 'dan küçük değerler kanserojen risk açısından kabul edilebilir olarak sınıflandırılır. Tolere edilebilir risk 10^{-6} ile 10^{-4} arasında değişmektedir, bu da 1 milyon kişide bir vaka ile 10 bin kişide bir vaka anlamına gelmektedir (Lim vd., 2008). 10^{-4} 'ün üzerindeki değerler kanserojen etkisi nedeniyle zararlı kabul edilir.

BULGULAR

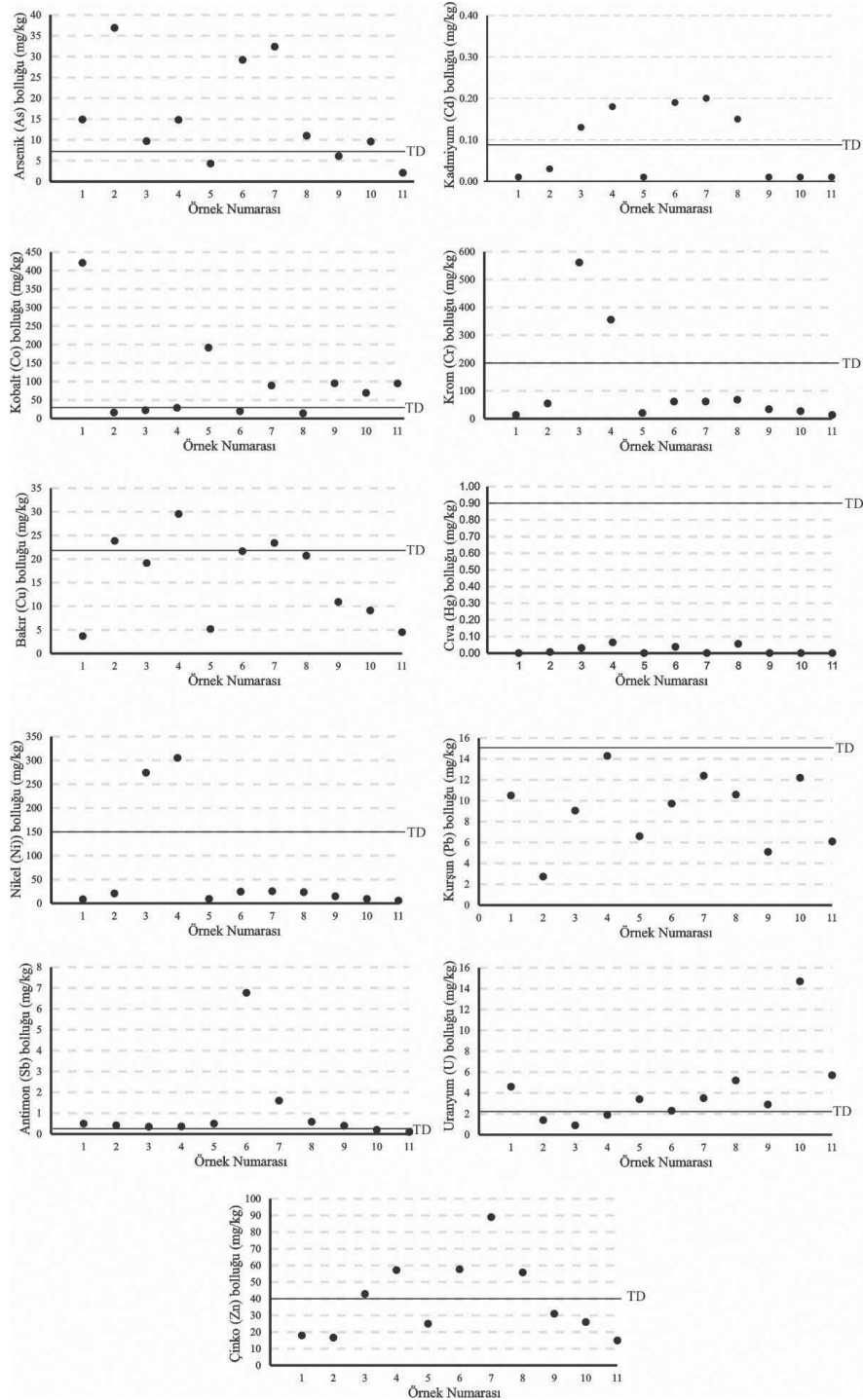
Toprak Kirliliği

Çalışma alanının örnekleme noktaları işaretlenmiş uydu görüntüsü ve jeoloji haritası Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. T3 ve T4 örnekleme noktaları BMN suları ile etkileşim halindeyken, T2 örneği Azap Gölü'nü temsil etmektedir. Diğer tüm topraklar yakınında yer alan kuyudan çekim yapılan yeraltı suyu ile sulanmaktadır. Örneklerin temel değerler ile kıyaslanmış kimyasal analiz sonuçları Şekil 3'de, zenginleşme faktörü sonuçları Çizelge 8'de listelenmiştir. Toprakların çoğunda

As kirlenmesi tespit edilmiştir. T1 ve T3 topraklarında düşük kirlenme, T4, T6 ve T7 topraklarında kısmen kirlenme, T2 toprağında ise önemli ölçüde kirlenme belirlenmiştir. Gnays birimiyle etkileşimde olan topraklar, jeojenik girdi nedenli arsenik kirlenmesi gelişen bölgeler olarak yorumlanmıştır.

Co kirliliği, T1 ve T5 topraklarında önemli ölçüde gelişmiş olup T7, T9, T10 ve T11 topraklarında kısmen kirlenme düzeyindedir. T1 toprağının sulandığı S1 örneği ve T10 ile T11 topraklarının sulandığı S12 kaynağı, eşik değer üzerinde Co tespit edilen yeraltı sularıdır. Diğer sulara Co değerleri $1 \mu\text{g/L}$ 'den düşük olarak analiz edilmişken, bu sulara sırasıyla 5.6 ve $5.7 \mu\text{g/L}$ Co analiz edilmiştir. Bölgedeki mermer ve karbonatlardan alınan örneklerde 3.2 mg/L ile 9.9 mg/L arasında Co bulunmakta iken gnays biriminde 136.2 mg/L seviyesinde Co analiz edilmiştir (Küçüksümbül vd., 2022). Bölgede yoğun olarak görülen Co zenginleşmesi, jeojenik girdiye bağlı olarak yorumlanmıştır.

Cr ve Ni zenginleşmesi yalnızca BMN ile sulanan topraklarda belirlenmiştir. Bu durum Cr ve Ni kirlenmesinin, BMN etkisiyle geliştiğini göstermektedir. Sb zenginleşmesi T6 toprağında fazlasıyla kirlenme, T7 toprağında önemli ölçüde kirlenme düzeyindedir. As ile birlikte Sb zenginleşmesi iki yarı metalin bir arada birikimi ile açıklanabilecekken, bölgede As kirliliği görülen topraklarda Sb zenginliği T6 ve T7 toprakları hariç doğal süreç düzeyindedir. T6 ve T7 topraklarında antropojenik girdiden söz edilebilir. Zn ve Cd kirliliği aynı topraklarda ve yakın seviyelerde olup tarımsal etkinlikten kaynaklanan antropojenik girdi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Tarım topraklarının temel değer (TD) işaretli kimyasal analiz sonuçları.

Figure 3. Chemical analysis results of agricultural soils with the background value (TD) marked.

U kirliliği T5, T7 ve T8 topraklarında düşük, T1 ve T11 topraklarında kısmen, T10 toprağında ise önemli ölçüde kirlilik seviyesindedir. Yüksek düzeyde U analiz edilen yeraltı suları S7 ve S12 sırasıyla T8 ve T10 toprakları ile etkileşim halindedir. Jeojenik kaynaklı gelişen kirlenme, alüvyon ile dokanağı olan bölgelerdeki yeraltı suyu ve toprakta artış göstermektedir. Cu, Hg ve Pb için herhangi kirlenme söz konusu değildir. Çalışma alanında doğal seviyesindedir ve herhangi antropojenik ya da jeojenik girdi söz konusu değildir.

dolayı yüksek çıkmış olması olasıdır. Yutma ve deriyle temas yoluyla Co alımı nedeniyle T3 ve T4 toprakları risklidir. İki toprakta BMN ile etkileşimdedir. As için kanserojen risk barındıran topraklar büyükten küçüğe T2, T7, T6, T1 ve T4 olarak sıralanmaktadır. T2 örneği Azap Gölü'nü temsil etmektedir, yakınlarda yerleşim bulunmamaktadır. T7 toprağı Sayrakçı, T6 toprağı Nalbantlar, T1 toprağı Yeşilköy, T4 toprağı ise Özbaşı yerleşkelerini temsil etmektedir. Yerleşke yakınındaki tarım topraklarında As için kanserojen olan toplam sağlık riski T7,

Çizelge 8. Tarım topraklarının zenginleşme faktörü sonuçları (Jeojenik ve/veya antropojenik girdi olması muhtemel olan topraklar koyu yazılmıştır).

Table 8. Results of the enrichment factor of agricultural soils (Soils that are likely to be geogenic and/or anthropogenic inputs were marked in bold).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	Zn
T1	1.86	*	15.15	0.06	0.16	*	0.05	0.66	1.34	2.05	0.42
T2	6.04	0.31	0.77	0.34	1.33	0.10	0.17	0.22	1.47	0.82	0.51
T3	1.60	1.34	1.06	3.47	1.08	0.43	2.26	0.75	1.24	0.53	1.33
T4	2.16	1.64	1.21	1.95	1.47	0.79	2.23	1.04	1.12	0.99	1.56
T5	0.62	*	7.98	0.11	0.26	*	0.07	0.48	1.55	1.75	0.68
T6	4.26	1.73	0.83	0.34	1.08	0.46	0.18	0.71	21.19	1.20	1.58
T7	4.70	1.81	3.74	0.33	1.16	*	0.18	0.90	4.97	1.81	2.42
T8	1.09	0.93	0.40	0.25	0.70	0.46	0.12	0.53	1.25	1.84	1.04
T9	0.68	*	3.08	0.14	0.42	*	0.08	0.29	0.96	1.16	0.65
T10	1.20	*	2.49	0.13	0.39	*	0.06	0.76	0.53	6.55	0.61
T11	0.27	*	3.51	0.07	0.20	*	0.04	0.39	0.28	2.62	0.36

*: Analiz limiti altında kaldığı için hesaplanamamıştır. Herhangi antropojenik ya da jeojenik girdi olmadığı kabul edilebilir.

Maruz kalma biçimine göre (yutma, soluma, deriyle temas) toprakların kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riskleri; en yüksek, ortalama ve en düşük değerleriyle birlikte Çizelge 9'da listelenmiştir. Kanserojen olmayan ancak risk barındıran kirlilik parametreleri Co ve Cr olarak belirlenmiştir. Co ve Cr için yutma yoluyla meydana gelebilecek kanserojen olmayan sağlık riski en yüksek topraklar sırasıyla T1 ve T3'tür. Cr için tüm çözülmüş maddenin Cr (VI) olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımdan

T6, T1 ve T4 için sırasıyla 2.38E-04, 2.14E-04, 1.21E-04 ve 1.09E-04 olarak hesaplanmıştır. Diğer topraklar ve analiz edilen elementler için kanserojen olan ya da olmayan sağlık riski söz konusu değildir (Çizelge 9). Kimyasal analizlerde ortalama ölçüm hatasının yüzde 10 olma durumu göz önünde bulundurularak her toprak ve elementin kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riskleri tekrar hesaplanmıştır. Ölçüm hatasının göz ardı edildiği sonuçlar ile karşılaştırıldığında ise zararlı olarak kabul edilen

toplam kanserojen sağlık riski için 10^{-4} ve toplam kanserojen olmayan sağlık riski için 1 değerini

aşan farklı bir toprak örneği tespit edilmemiştir.

Çizelge 9. Toprağa maruz kalma biçimine göre (yutma, soluma, deriyle temas) elementlerin kanserojen olmayan ve toplam kanser riskleri (En yüksek, ortalama ve en düşük değerler verilmiştir. Sınır değeri aşanlar koyu yazılmıştır).

Table 9. Non-carcinogenic risks of the elements by way of exposure to the soil (ingestion, inhalation and dermal) and total cancer risk (The highest, average and lowest values are given. Those exceeding the limit values are marked in bold).

	RK _{oral}		RK _{soluma}		RK _{deri}		Kanser Riski	
	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin
As	5.90E-01	3.37E-01	6.59E-04	4.96E-04	3.14E-02	5.76E-02	2.71E-04	1.78E-04
	2.48E-01	1.42E-01	2.78E-04	2.09E-04	7.35E-03	2.43E-02	1.15E-04	7.48E-05
	3.36E-02	1.92E-02	3.75E-05	2.82E-05	6.65E-04	3.28E-03	1.54E-05	1.01E-05
Cd	3.84E-03	5.48E-04	5.36E-06	4.03E-06	1.52E-03	7.50E-03	3.38E-10	2.54E-10
	*	*	*	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*	*	*	*
Co	1.35E+01	1.92E+00	1.88E-02	1.41E-02	8.88E-01	6.57E-01	**	**
	3.09E+00	4.41E-01	4.31E-03	3.24E-03	2.04E-01	1.51E-01	**	**
	4.47E-01	6.39E-02	6.25E-04	4.70E-04	2.95E-02	2.19E-02	**	**
Cr	1.79E+00	2.56E-01	1.50E-03	1.13E-03	4.74E+00	3.51E+00	9.79E-03	5.64E-03
	3.70E-01	5.28E-02	3.10E-04	2.33E-04	9.76E-01	7.23E-01	2.02E-03	1.16E-03
	4.37E-02	6.25E-03	3.67E-05	2.76E-05	1.15E-01	8.55E-02	2.39E-04	1.38E-04
Cu	9.45E-02	1.35E-02	**	**	4.68E-04	3.46E-04	**	**
	4.89E-02	6.99E-03	**	**	2.47E-04	1.83E-04	**	**
	8.87E-04	1.27E-04	**	**	5.85E-05	4.33E-05	**	**
Hg	3.90E-03	5.57E-04	5.81E-08	4.36E-08	2.57E-04	1.90E-04	**	**
	*	*	*	*	*	*	**	**
	*	*	*	*	*	*	**	**
Ni	1.46E-01	2.09E-02	9.09E-04	6.84E-04	2.42E-01	1.79E-01	6.87E-07	5.17E-07
	3.15E-02	4.49E-03	1.95E-04	1.47E-04	5.19E-02	3.84E-02	1.48E-07	1.11E-07
	2.73E-03	3.90E-04	1.70E-05	1.28E-05	4.51E-03	3.34E-03	1.28E-08	9.65E-09
Pb	3.92E-02	5.59E-03	**	**	2.58E-03	1.91E-03	1.24E-06	2.23E-07
	2.55E-02	3.65E-03	**	**	1.69E-03	1.25E-03	7.84E-07	1.39E-07
	7.48E-03	1.07E-03	**	**	4.94E-04	3.65E-04	2.37E-07	4.27E-08
Sb	1.62E-01	2.32E-02	6.05E-06	3.41E-05	7.14E-02	5.29E-02	**	**
	2.57E-02	3.67E-03	9.57E-07	5.40E-06	1.13E-02	8.37E-03	**	**
	2.40E-03	3.42E-04	8.93E-08	5.04E-07	1.05E-03	7.81E-04	**	**
U	7.05E-01	1.01E-01	9.85E-05	7.40E-05	4.65E-02	3.44E-02	**	**
	2.03E-01	2.90E-02	2.83E-05	2.13E-05	1.34E-02	9.90E-03	**	**
	4.32E-02	6.16E-03	6.03E-06	4.53E-06	2.85E-03	2.11E-03	**	**
Zn	2.84E-03	4.06E-04	**	**	1.88E-04	1.39E-04	**	**
	1.26E-03	1.80E-04	**	**	8.33E-05	6.17E-05	**	**
	4.79E-04	6.85E-05	**	**	3.16E-05	2.34E-05	**	**

*: Bazı topraklardaki analiz sonuçları tayin limiti altında kaldığı için hesaplanamamıştır.

**: Referans konsantrasyon (RfC_i) değeri veya eğim faktörü (SF) önerilmediği için hesaplanamamıştır.

Su Kirliliği

Çalışma alanındaki yeraltı suları 225 ile 1268 $\mu\text{S/cm}$ arasında elektriksel iletkenlik ve 6.31 ile 8.17 arasında değişen pH değerlerine sahiptir. Örneklenen suların kullanım amaçları, kuyuların derinliği, bazı fiziksel parametreler ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Avrupa Birliği (EU, 2014) ve Türk Standartlarında (TS, 2013) uranyum için herhangi eşik değer belirlenmediği için Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA, 2018) tarafından uygun görülen 30 $\mu\text{g/L}$ değeri kullanılmıştır. S2 ve S8 hariç tüm kaynak ve kuyu suları içme amaçlı tüketilmektedir. Suların kanserojen olan ve olmayan riskleri sadece yetişkinler için hesaplanmıştır. İçme amaçlı tüketilen sularda limit değerın üzerinde analiz edilen kirlilik parametreleri As ve U olarak öne çıkmaktadır.

Arsenik sağlık riski büyükten küçüğe sırayla S13, S11, S2, S5 ve S1 sularında belirlenmiştir. İçme amaçlı tüketilmemesi karşın, Büyük Menderes Nehri suları As açısından toplam kanserojen riski en yüksek örneklemedir. Limit değerin 6 katından fazla arsenik içeren S11 kuyusu, Kısır bölgesinde içme amaçlı tüketilen onlarca kuyudan birisidir. Hemen hemen aynı derinlikte ve birbirine çok yakın noktalarda açılan kuyuları temsil eden örnekleme, yüksek kanserojen riski nedeniyle dikkat çekmektedir. (Çizelge 10). Sadece sudaki arsenikten kaynaklı

bölge halkında 500 kişiden 1’inin kanser olması beklenir. Bu oran tolere edilebilecek değerin yaklaşık 20 katına karşılık gelmektedir. Karacahayıt bölgesinde yüzeye yakın kuyu sularında (S6) arsenik riski bulunmazken gnays birimine yakın ve 10 metreden yüksek sondajlar (S5) arsenik açısından risk barındırmaktadır. Yine Azap Gölü yüzey suyu örneği ve Yeşilköy kuyu suları sınır değerin üzerinde arsenik içermektedir.

Uranyum kirliliği büyükten küçüğe sırasıyla S5, S8 ve S12 sularında belirlenmiştir. S12 kaynağı gnays ile dokanağı olan bölgenin yakınında yaklaşık 1 L/sn debiyle yüzeylenmektedir. Diğer sular ise 40 ve 45 metre derinliğindeki kuyulardan üretilmektedir. S5 ve S8 sırasıyla Karacahayıt ve Sayrakçı bölgelerini temsil etmektedir. S5 kuyu suyu limit değerin 3 katı kadar uranyum bulundurmaktadır. Bölgede kuyuların derinliği arttıkça suda çözünmüş uranyum miktarı artış göstermektedir. Söke Ovası alüvyon akiferlerinde uranyum taşınımının, potasyum ve mangan zenginleşmesiyle birlikte geliştiği belirlenmiştir (Küçüksümbül, 2018). Benzer durum çalışma alanında da geçerlidir. En yüksek çözünmüş uranyum belirlenen S5 örneği aynı zamanda en yüksek çözünmüş potasyum değerine sahiptir. Alüvyondaki örneklemelerin (S1, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11) K-U bolluk bağıntısı 0.7 olarak hesaplanmıştır. İyonların bolluğu arasındaki bağıntı, kuvvetli olarak tanımlanabilir.

Çizelge 10. Suların kanserojen ve kanserojen olmayan risk sonuçları (Tolere edilebilir değeri aşanlar koyu yazılmıştır).
 Table 10. Results of cancer and non-carcinogenic risk of waters (Values with higher than tolerable marked in bold).

Kod	Kanserojen Olmayan Toplam Risk										Kanserojen Toplam Risk		
	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn	As	Cr	Pb
S1	1.74	*	0.003	*	*	*	0.013	0.02	0.32	*	7.84E-04	**	6.54E-07
S2 ^(a)	2.09	0.02	0.005	0.004	0.005	0.002	0.004	0.01	0.36	0.009	9.40E-04	6.79E-06	4.23E-07
S3 ^(b)	0.05	0.01	0.004	*	0.003	0.001	0.017	0.01	0.97	0.000	2.04E-05	4.52E-06	4.04E-07
S4 ^(b)	0.23	0.01	0.007	*	0.005	0.004	0.003	0.02	0.07	0.003	1.05E-04	6.79E-06	5.00E-07
S5	1.82	0.02	0.014	0.009	0.007	0.004	0.007	0.02	10.2	0.006	8.18E-04	1.02E-05	5.00E-07
S6	*	*	0.002	*	0.035	*	*	0.01	0.01	*	**	5.20E-05	3.08E-07
S7	0.48	0.01	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.01	1.36	0.001	2.14E-04	4.52E-06	4.23E-07
S8	*	*	0.010	*	*	*	*	0.02	4.07	*	**	**	4.81E-07
S9	0.11	0.004	0.008	0.004	0.004	0.004	0.002	0.01	2.64	0.007	5.09E-05	5.66E-06	4.23E-07
S10	*	*	0.003	*	0.039	*	*	0.03	0.41	*	**	5.88E-05	1.02E-06
S11	4.61	0.00	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	0.01	1.62	0.001	2.07E-03	2.15E-06	4.04E-07
S12	*	*	0.002	*	*	*	0.006	0.01	4.07	*	**	**	3.08E-07
S13	7.02	0.36	0.233	0.01	0.06	0.03	0.04	0.25	0.72	0.015	3.16E-03	9.50E-05	7.48E-06

^(a): Küçüksümbül vd. 2020,

^(b): Küçüksümbül vd. 2022,

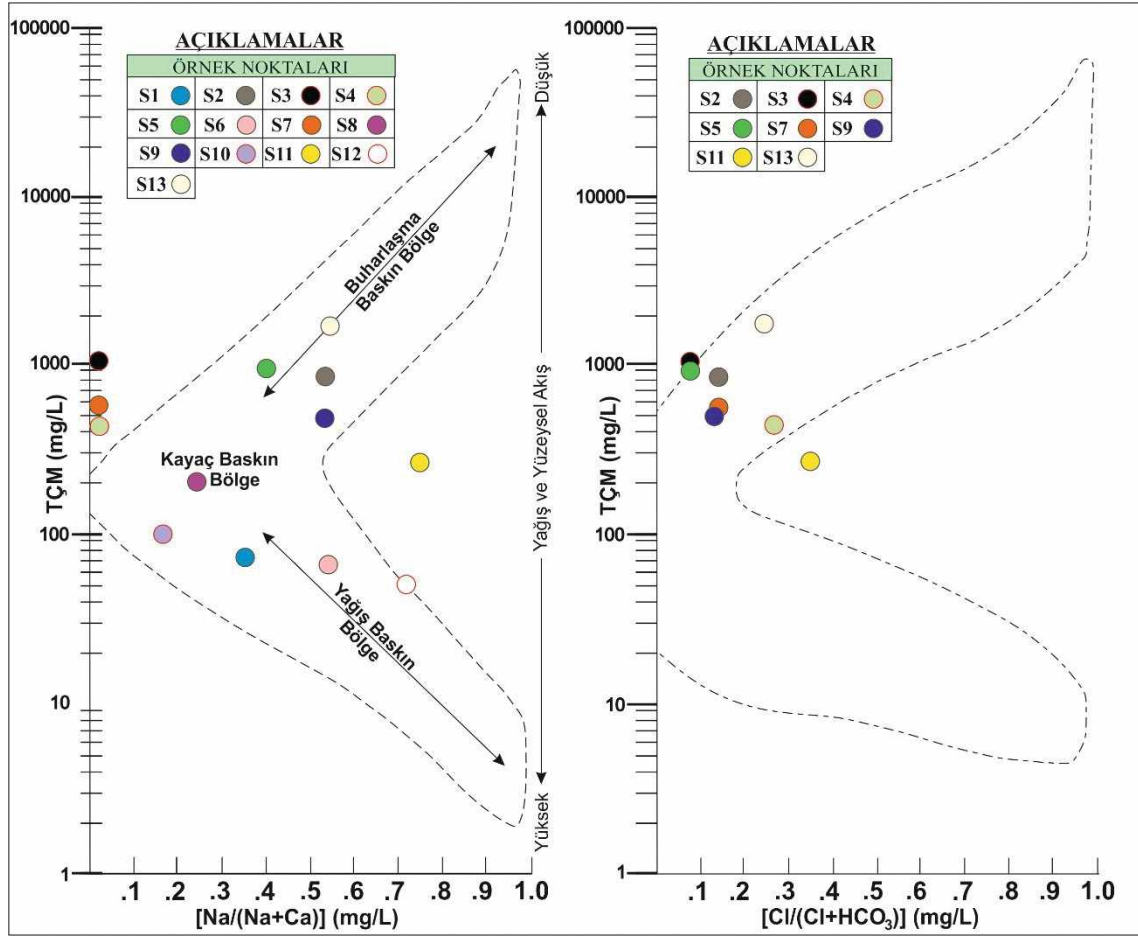
*: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. İlgili laboratuvar tarafından arsenik 1 µg/L, bor 30 µg/L, kadmiyum 0.03 µg/L, krom 1 µg/L, bakır 0.5 µg/L, çinko 30 µg/L olarak rapor edilmiştir.

** : Analiz limiti altında kalan değerler nedeniyle hesaplanamamıştır, suların ilgili element nedeniyle herhangi bir sağlık riski barındırmadığını ifade eder.

Çalışma alanının hidrojeokimyasal süreçleri ve mekanizmaları belirlemek için majör iyon veri seti yorumlanmıştır. S2 Azap Gölü suyu için baskın katyon Mg iken, yeraltı sularının çoğunda (S3, S4, S6, S7, S8 ve S10) baskın katyon Ca olarak belirlenmiştir. S1 suyu için Ca-Na-Mg, S5 suyu için Ca-Mg-Na, S9 için Mg-Ca-Na olarak belirlenmiştir. Arsenik kirliliğinin en yüksek olduğu Kısır bölgesini temsil eden kuyu suyu (S11) ve uranyum kirliliğinin en yüksek olduğu S12 kaynağında ise sırasıyla baskın katyon Na-Mg ve Na-Ca olarak belirlenmiştir. S13 nehir suyunda ise baskın katyon Mg olarak bulunmuştur. Anyon analizi sorunsuzca tamamlanan (S1, S6, S8, S10 ve S12 harici) suların çoğunda (S3, S5, S7 ve S9) baskın anyon HCO₃ olarak belirlenmiştir. Baskın anyonlar; S2 suyu için HCO₃-Cl, S4 suyu için HCO₃-SO₄-Cl,

S11 suyu için HCO₃-Cl olarak belirlenmiştir. S13 nehir suyu ise SO₄ + HCO₃ olarak bulunmuştur. Gibbs diyagramına göre sulardan S3, S4, S7, S8, S10 kayaç baskın bölge civarında ve S1, S2, S5, S6, S9, S12 ve S13 ise buharlaşma etkisinin düşük ve orta düzeyde olduğu bölgede yer almaktadır (Şekil 4). Azap Gölü (S2) ve Büyük Menderes Nehri (S13) için buharlaşma etkisinden kaynaklı Na⁺ ve Cl⁻ zenginleşmesi beklenir.

Bölgede, arsenik ve uranyum tehlikesi gösteren sularda bu iki kirlilik parametresi arasında herhangi bağıntı belirlenememiştir. Arsenik kirliliği gneys biriminden kaynaklı olarak gerçekleşmektedir. Uranyum zenginleşmesi ise muhtemelen kuvars damarlarında meydana gelmektedir. İçme amaçlı tüketilen suların insan sağlığını olumsuz etkileyecek niteliğe dönüşmesinde jeojenik girdiler etkindir.



Şekil 4. Suların Gibbs (1970) diyagramında gösterimi.

Figure 4. Waters plotted in Gibbs (1970) diagram.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gnays biriminden kaynaklanan jeojenik girdi olarak yorumlanan topraktaki As kirlenmesi, özellikle Sayrakçı ve Nalbantlar bölge halkında kanser riski oluşturmaktadır. As nedeniyle kanserojen risk barındıran topraklar büyükten küçüğe T2, T7, T6, T1 ve T4 olarak sıralanmaktadır (Çizelge 9). Tarım topraklarında en yüksek kanser riski arsenik için $2.38E-04$ olarak Sayrakçı bölgesinde belirlenmiştir. Sb zenginleşmesi bazı topraklarda çok yüksek düzeydedir. As ile birlikte Sb zenginleşmesi

iki yarı metalin bir arada birikimi ile açıklanabileceken, bölgede As kirliliği görülen topraklarda Sb zenginliği T6 ve T7 toprakları hariç doğal süreç düzeyindedir. T6 ve T7 topraklarında Sb için antropojenik girdiden söz edilebilir. Cu, Hg ve Pb için herhangi kirlenme söz konusu değildir. Bölge topraklarında yoğun olarak görülen Co zenginleşmesi, jeojenik girdiye bağlı olarak gelişmiş olarak yorumlanmıştır. Cr ve Ni zenginleşmesinin nehirle sulanan topraklarda belirlenmesi, Cr ve Ni kirlenmesinin BMN etkisiyle geliştiğini göstermektedir. Zn ve Cd

kirliliği aynı topraklarda ve yakın seviyelerdedir. Tarımsal etkinlikten kaynaklı antropojenik girdi olarak değerlendirilmiştir. U kirliliği T5, T7 ve T8 topraklarında düşük, T1 ve T11 topraklarında kısmen, T10 toprağında ise önemli ölçüde kirlilik seviyesindedir.

Yüksek düzeyde U analiz edilen yeraltı suları S7 ve S12 sırasıyla T8 ve T10 toprakları ile etkileşim halindedir. Jeojenik kaynaklı gelişen uranyum kirlenmesi, yeraltı suyu ve toprakta bolluğa neden olmaktadır. En yüksek uranyum düzeyinin gözlemlendiği örneklemeler ise yüksek kotlarda gnays ile şist dokanağında hem kaynak suyunda hem de toprakta analiz edilmiştir. Karacahayıt bölgesi kuyu sularında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen limit değerin 3 katı, Sayrakçı bölgesi kuyu sularında ise limit değerin üzerinde uranyum kirliliği tespit edilmiştir. Kuyu derinliği arttıkça sulara uranyum bolluğu artış göstermektedir. Derin dolaşımda olmayan ve düşük elektriksel iletkenliğe sahip S12 kaynağındaki yüksek uranyum, civarda uranyumca zenginleşme gösteren kayaçların olduğunu işaret etmektedir. Bölgenin uranyum potansiyeli ve jeolojisinin detaylı araştırılması gerekmektedir. Yeraltı sularında en yüksek kanser riski arsenik için $2.07E-03$ olarak Kisir bölgesinde belirlenmiştir. Büyük Menderes Nehir suyu içme amaçlı tüketimde en yüksek kanser riski barındıran örneklemidir. Nehir suları yakınında içme amaçlı kuyu açılmaması önerilir. Türk Standartlarında uranyum için herhangi limit değeri belirlenmemiş olup ilgili mevzuatın güncellenmesi önerilir. Bölgede açılan ya da açılması planlanan kuyuların kayıt altına alınması, sulara uranyum ve arsenik için kimyasal analizler yapıldıktan sonra kullanım izni verilmesi gerekmektedir. Sayrakçı ve Kisir bölgeleri başta olmak üzere, Karacahayıt ve Nalbantlar bölgesinde kanser vakası görülme sıklığının araştırılması ve sağlık önlemlerinin alınması önerilir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi 2017.KB.FEN.014 numaralı projeden sağlanan ödenek yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yazarlar; Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Serdar BAYARI ve Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Ünsal GEMİCİ'ye bilimsel değerlendirmelerinden, dergi hakemlerine makaleye önemli katkılarından ötürü teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akinci, G., Gök, G., Bilgin, M., 2019. Heavy metals bioconcentration and translocation in plants: the influence of a thermal power site. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(8), 1625-1637.
- Bourennane, H., Douay, F., Sterckeman, T., Villanneau, E., Ciesielski, H., King, D., Baize, D., 2010. Mapping of anthropogenic trace elements inputs in agricultural topsoil from Northern France using enrichment factors. *Geoderma*, 157(3-4), 165-174.
- CSQG (Çevre ve İnsan Sağlığının Korunması için Kanada Toprak Kalitesi Yönergeleri), 2010. Tarımsal toprak kalitesi sınır değerleri kılavuzu. <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html> (14.02.2021).
- Çevik, F., Göksu, M. Z. L., Derici, O. B., Fındık, Ö., 2009. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1), 309-317.
- EU (Avrupa Birliği), 2014. Drinking Water Regulations, S.I. No. 122 of 2014.
- FAO (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü), 2007. Çevre Yönetimi (Toprak Kalitesi Standartları) Düzenlemeleri. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/tan151538.pdf> (14.02.2021).

- Ferreira-Baptista, L., De Miguel, E., 2005. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric environment*, 39(25), 4501-4512.
- Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962), 1088-1090.
- Goldschmidt, V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 655-673.
- Güney, A., Akgül, E., 2019. Aydın'da Madencilik: Potansiyeli ve Değerlendirilmesi. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 277.
- Kazancı, N., Gürbüz, A., Boyraz, S., 2011. Geology and evolution of the river Büyük Menderes, western Anatolia, Turkey. *Geol. Bull. Turkey*, 54, 25-56.
- Küçüksümbül, A., 2018. Söke Ovası ve Bafa Gölü çevresinin hidrojeolojik incelenmesi: Jeotermal Potansiyeli, Toprak ve Su Kirliliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi.
- Küçüksümbül, A., Akar A. T., Tarcan, G., 2020. Bafa Gölü'nün hidrokimyasal ve hidrojeolojik incelenmesi: sürdürülebilir su kaynak yönetimi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 197-224. doi.org/10.24232/jmd.826954.
- Küçüksümbül, A., Akar A. T., Tarcan, G., 2022. Source, degree and potential health risk of metal(loid)s contamination on the water and soil in the Söke Basin, Western Anatolia, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 6. doi.org/10.1007/s10661-021-09670-2.
- Lim, H. S., Lee, J. S., Chon, H. T., Sager, M., 2008. Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2-3), 223-230.
- Luo, X. S., Ding, J., Xu, B., Wang, Y. J., Li, H. B., Yu, S., 2021. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils. *Science of the Total Environment*, 424, 88-96.
- McLennan, S. M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4).
- MEF (Finlandiya Çevre Bakanlığı), 2007. Toprak Kirliliği ve İyileştirme İhtiyaçlarının Değerlendirilmesine Dair Hükümet Kararı. <https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2007/en20070214.pdf> (14.02.2021).
- MTA (Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü), 2002. 1:500000 Ölçekli Aydın, Denizli, Muğla Bölgesi Jeoloji Haritası. Ankara. Türkiye.
- Öztunalı, Ö., 1965. Demirtepe-Çavdar, Osmankuyu-Kisir (Çine Masifi) Uranyum Zuhurlarının Petrografileri ve Oluşumları. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*.
- Peña-Fernández, A., González-Muñoz, M. J., Lobo-Bedmar, M. C., 2014. Establishing the importance of human health risk assessment for metals and metalloids in urban environments. *Environment International*, 72, 176-185.
- Prasad, S., Saluja, R., Joshi, V., Garg, J. K., 2020. Heavy metal pollution in surface water of the Upper Ganga River, India: human health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 1-15.
- RAIS (Risk Değerlendirme Bilgi Sistemi), 2021a. <https://rais.ornl.gov/tutorials/toxvals.html#1> (14.02.2021).
- RAIS (Risk Değerlendirme Bilgi Sistemi), 2021b. https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX_search?select=chemtox (14.02.2021).
- Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., Turekian, K. K., 2003. Composition of the continental crust. *The Crust*, 3, 1-64.
- Saha, N., Rahman, M. S., Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., 2017. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *Journal of Environmental Management*, 185, 70-78.

- Sakan, S., Popović, A., Anđelković, I., Đorđević, D., 2016. Aquatic sediments pollution estimate using the metal fractionation, secondary phase enrichment factor calculation, and used statistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(3), 855-867.
- Shil, S., Singh, U. K., 2019. Health risk assessment and spatial variations of dissolved heavy metals and metalloids in a tropical river basin system. *Ecological Indicators*, 106, 105455.
- Sutherland, R. A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6), 611-627.
- TS (Türk Standardları). (2010.08.06). Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik. Resmi Gazete (27605). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100608-3.htm> (14.02.2021).
- TS (Türk Standardları). (2013.03.07). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete (28580). <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/03/20130307-7.htm> (14.02.2021).
- Turekian, K. K., Wedepohl, K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175-192.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 1992. Definitions and General Principles for Exposure Assessment. Guidelines for exposure assessment. Washington, DC, USA: Office of Pesticide Programs.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 1999. Guidance for Performing Aggregate Exposure and Risk Assessments. Washington, DC, USA: Office of Pesticide Programs.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 2004. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). EPA/540/R/99/005. Washington, DC.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 2018. Drinking Water Standards and Health Advisories Tables. Washington, DC, USA: Office of Water.
- US EPA IRIS (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'nın Entegre Risk Bilgi Sistemi), 2021. <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/drafts/atoz.cfm> (14.02.2021).
- Wedepohl, K. H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232.
- WHO (Dünya Sağlık Örgütü), 2017. Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Schweiz. 1-542.
- Wongsasuluk, P., Chotpantarat, S., Siritwong, W., Robson, M., 2014. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani province, Thailand. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(1), 169-182.
- Zhang, J., & Liu, C. L., 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(6), 1051-1070.
- Zhao, D., Wan, S., Yu, Z., Huang, J., 2015. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of Hainan Island rivers, China. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5097-5110.

Şişen Zeminlerin Kireç Kolonu İle İyileştirilmesinde Kür Süresinin Belirlenmesine Yönelik Bir Yaklaşım

An Approach to Determination of Curing Time in Stabilization of Swelling Soils with Lime Column

Derya TOKSÖZ HOZATLIOĞLU

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas

Geliş (Received): 20 Kasım (November) 2020 / Düzeltme (Revised): 03 Mart (March) 2021 / Kabul (Accepted): 04 Mart (March) 2021

ÖZ

Şişen zeminler jeoteknik açıdan sorunlu zeminler olup bu zeminlerin inşaat öncesi çalışmalarda belirlenmesi ve uygun önlemlerin alınması gerekmektedir. Alınacak önlemler arasında en sık başvurulanan yöntem zeminin yerinde yapılan işlemlerle iyileştirilmesidir. En yaygın olarak kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biri ise kireç kolonu tekniğidir. Şişen bir zemin kireç kolonu ile iyileştirilmeden önce laboratuvar ortamında kireç kolonunun söz konusu zemin için uygun olup olmadığı araştırılır. Bu ise arazinin küçük ölçekli bir modelinin laboratuvar ortamında oluşturulması ile yapılır. Oluşturulan modeller iyileşmenin sağlanabilmesi için belirli bir kür süresine bırakılır. Uygun kür süresinin belirlenmesi kireç kolonunun performansı için önemlidir. Bu çalışmanın amacı kireç kolonu performansının belirlenmesine yönelik oluşturulan laboratuvar modellerinde kür süresinin kolay ve ekonomik bir yöntemle belirlenebilirliğinin araştırılmasıdır. Söz konusu yöntem, iyon göçü mesafesinin bir asit baz indikatörü olan fenolftalein ile ölçülmesine dayanır. Çalışmanın amacına yönelik olarak bir Na-bentonit kili için laboratuvar ortamında küçük ölçekli bir model hazırlanmıştır. Oluşturulan modelde kireç kolonundan itibaren olan iyon göçü mesafesi değişik kür sürelerinde fenolftalein yardımı ile ölçülmüş ve iyon göçü sabitleşmeye başladığında ölçümlere son verilmiştir. İyon göçünün sabitleşmeye başladığı süre kür süresi olarak alınmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kireç kolonunun laboratuvar uygulamalarında kür süresi belirlenirken fenolftaleinin iyi bir araç olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Şişen Zemin, Kireç Kolonu, İyon Göçü, Laboratuvar Modeli, Kür Süresi

ABSTRACT

Swelling soils which are problematic in terms of geotechnics should be determined in preliminary works and appropriate cautions should be taken. The most frequently used method among the cautions to be taken is to stabilize soil with in-situ operations. One of the most widely used stabilization methods is lime column technique. Before stabilizing a swelling soil with lime column technique, it is investigated if the lime column works for the soil. This is done by creating a small-scale model of the land in the laboratory. The created models are left for a specific curing time to ensure the stabilization. Determination of the appropriate curing time is important for the performance of lime column. The aim of this study is to determine the curing time for the laboratory models, which are designed for investigating lime column performance, with an easy and economic method. The method is based on measuring the ion migration distance by using phenolphthalein which is an acid base indicator. In the scope of the study, a small scale laboratory model was designed for a Na-bentonite clay. The ion migration distance from the lime column in the

model was measured by using phenolphthalein in various curing times and the measurements were stopped when the ion migration distance reached a constant value. The time in which the ion migration distance started not to change was taken as the cure time. The results obtained in this study showed that phenolphthalein can be a useful tool for determination of curing time in the laboratory applications of lime column.

Keywords: Swelling Soil, Lime Column, Ion Migration, Laboratory Model, Curing Time

GİRİŞ

Killi zeminler karmaşık bir yapıya sahip olup, geoteknik mühendisleri için genellikle problem oluşturmaktadırlar. Bu durum killerin plastisitesi, boşluk suyu basıncına sebep olan düşük geçirimsizliği, su içeriğine bağlı hacim değiştirme özelliği, kimyası ve mineralojisinden kaynaklanmaktadır (Rogers ve Glendinning, 1997). Killi zeminlerde uygulamada karşılaşılan en yaygın sorunlardan biri şişme problemidir. Şişen zeminler bünyelerine su aldıklarında şişen ve kuruduklarında büzülen zeminler olarak tanımlanır. Bu zeminlerin, örneğin sadece Amerika’da binalara, hava alanlarına ve diğer tesislere verdiği zarar yılda yaklaşık 9 milyar dolardır. Bu miktar taşkınların, kasırgaların, depremlerin ve hortumların sebep olduğu hasarın yaklaşık iki katıdır (Jones ve Holtz, 1973; Jones ve Jones, 1987). Şişen zeminlerde zemin hareketlerinin çok yavaş olmasından dolayı hasar uzun süre içinde oluşmaktadır, dolayısıyla sonuçlar depremler ve kasırgalardaki kadar zararlı olmaz ve yalnızca hasara sebep olurlar. Bununla beraber ekonomik kayıp fazla olup, bu kayıpların önemli bir kısmından sorunun tasarım ve inşaat çalışmalarında tespit edilmesi ve uygun önlemlerin alınmasıyla kaçınılabilmektedir (Yılmaz, 2007). Alınacak önlemler arasında, şişen zeminin özelliklerinin daha iyi bir zeminle değiştirilmesi, yapı elemanlarının boyutlarının zeminin özelliklerine uygun olarak seçilmesi ya da zemin özelliklerinin istenilen yönde değiştirilmesi gibi yaklaşımlar sayılabilir. Birinci yol oldukça pahalı olup çok az sayıda uygulama görmüştür. İkinci yolun uygulanmasıyla ilgili

örnekler olmakla birlikte bu yöntem de bazen pahalıdır. Bu teknikler içinde en çok kullanılan yöntem zeminin yerinde yapılan işlemlerle sağlamlaştırılmasıdır (Tüdeş, 1996). Şişen zeminler için çeşitli iyileştirme yöntemleri olmasına karşın bunlar arasında en sık başvurulana kimyasal katkı maddeleri ile yapılan iyileştirmedir. Kimyasal iyileştirmede amaç zemini çeşitli katkı maddeleri ile karıştırarak özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesidir. Kimyasal iyileştirmenin uygulandığı projelerde en sık olarak kullanılan katkı maddeleri başta kireç olmak üzere uçucu kül, çimento ve bitümlü malzemelerdir (Van Impe, 1989). Bunlar arasında uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan ve performansı konusunda hemen hemen görüş birliği olmuş olan katkı maddesi ise kireçtir.

Kireç ile iyileştirilmiş bir zemin elde etmek için en sık olarak kullanılan iki yöntem vardır; zemin içerisinde kireç kolonları oluşturulur veya kireç arazideki zemin ile karıştırılır. Kireç ile zeminin karıştırılması yöntemi fazla derinlere inilmeden yüzeysel olarak uygulanmakta olup, bu yöntemde zemin kazılarak çıkartılır, belirli oranlarda kireç uygun su içeriğinde karıştırılır ve tekrar yerine serilerek sıkıştırılır. Kolon tekniğinde ise zemin içerisinde yaklaşık 0.5 m çapında, 10 m derinlikte delikler açılır ve kireç zeminle karıştırılmaksızın deliklere doldurulur (Abiodun ve Nalbantoğlu, 2015). Kolon tekniğinin iyileştirme mekanizması kirecin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu sonucu kil ile kireç arasında oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Bu reaksiyonlar kirecin içerdiği pozitif iki değerlikli iyonlar ve negatif

olarak yüklü kil mineralleri arasında meydana gelir ve iyileştirme mekanizmasının temelini oluşturur. Killi zemin ile kireç arasında ilk olarak kilin kirece olan kimyasal afinitesinden dolayı katyon değişimi reaksiyonu meydana gelir. Kil minerallerinin katmanları arası kalsiyumla doyurulduktan sonra puzzolonik reaksiyonlar oluşmaya başlar (Bell, 1996). Kirecin içerdiği iyonların kolonu çevreleyen zemine olan göçü bu reaksiyonların ve dolayısıyla iyileşmenin oluşabilmesi için en önemli süreçtir. İyon göçünün oluşabilmesi için ise zamana ihtiyaç vardır. Bu yüzden kireç kolonu uygulamalarında kür süresi kolon performansı için önemli bir faktördür.

Sorunlu bir zemin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmeden önce laboratuvar ortamında arazinin modeli oluşturularak kireç kolonunun söz konusu zemin için performansı araştırılır. Oluşturulan modeller belirli bir kür süresine bırakılır. Genel olarak kür süresi arttıkça kolon performansı da artmaktadır. Kireç kolonu tekniği ile ilgili olarak yapılan önceki araştırmalar kür süresinin 28 gün ve 2 yıl arasında olması gerektiğini önermişlerdir (Ruenkairergsa ve Pimsarn, 1982; Rogers ve Bruce, 1991; Rogers ve Glendinning, 1997). Ancak bu iki süre arasında oldukça büyük bir fark vardır ve kür süresinin belirlenmesi için genellikle ek bir çalışmaya gerek duyulmaktadır. Kireç kolonu uygulamalarında kür süresi belirlenirken genellikle laboratuvar da aynı özelliklere sahip birden fazla arazi modeli oluşturulur ve bu modeller değişik kür sürelerine bırakılır. Kür süreleri sonunda kireç kolonlarından belirli mesafelerde alınan örnekler üzerinde serbest basınç dayanımı veya serbest şişme deneyleri uygulanarak en iyi iyileştirmenin ve en uzun mesafede göçün hangi kür süresinde olduğuna karar verilir. Ancak iyon göçü mesafesini belirlemek amacıyla yapılan deneyler, özellikle serbest şişme deneyi, zaman

ve maliyet gerektiren deneylerdir. Bu çalışmanın amacı kireç kolonu performansını belirlemeye yönelik oluşturulan laboratuvar modellerinde kür süresinin daha kolay ve ekonomik bir yöntemle belirlenebilirliğini araştırmaktır. Söz konusu yöntem iyon göçü mesafesinin bir asit baz indikatörü olan fenolftalein ile ölçülmesine dayanır. Fenolftalein toz halinde beyaz renkli bir bileşik olup asitli ve nötral ortamda renksiz iken bazik ortamda pembe renklidir. Kireç içerdiği hidroksil iyonlarından dolayı yüksek oranda alkalın (bazik) özellik göstermektedir (Glendinning ve Rogers, 1996; Tono vd., 2003). Dolayısıyla fenolftalein ile temas halinde pembe bir renk almaktadır. Fenolftalein daha önce kireç kolonu ile ilgili olarak yapılan birkaç çalışmada iyon göçü mesafesini belirlemek için kullanılmıştır. Örneğin, Rogers ve Glendinning (1994), nem içeriğindeki artışın iyon göçü üzerindeki etkisini araştırmak için fenolftalein ile karıştırılmış killeri farklı nem içeriklerinde olmak üzere 32 mm çapındaki perpeks tüplere doldurmuşlardır. Her tüpün merkezine 6 mm çapında sönmemiş kireç kolonu oluşturulmuş ve kirecin renk değişiminden faydalanarak iyonların tüpün ucuna ulaşması için gereken zaman ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda, nem içeriğindeki artışın iyon göçünü artırdığı sonucuna varılmıştır. Toksöz ve Yılmaz (2020) ise yaptıkları çalışmada şişen kil oranının iyon göçü üzerindeki etkisini araştırmak için değişik oranlarda Na-bentonit içeren zeminleri fenolftalein ile karıştırarak 152 mm çapındaki kompaksiyon kalıplarına sıkıştırmış ve tüplerin merkezinde 20 mm çapında kireç kolonları oluşturmuşlardır. Belirli bir küresi sonunda kolonlardan itibaren oluşan renk değişimlerini gözlemleyerek iyon göçü mesafelerini saptamışlardır. Dolayısıyla değişik amaçlara yönelik olarak iyon göçü mesafesi belirlenirken fenolftalein oldukça pratik bir çözüm olarak

karşımıza çıkmaktadır. Mevcut çalışmada iyon göçünü fenolftalein ile belirlemedeki amaç ise laboratuvar ortamında yapılan kireç kolonu uygulamalarında kür süresine karar verebilmektir. Çalışmanın amacı kapsamında laboratuvar ölçeğinde bir arazi modeli oluşturulmuş, bu model üzerinden ölçümler alınarak yorumlanmış, elde edilen bulgular ise çalışmanın sonunda sunulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Çalışmanın amacı doğrultusunda ilk olarak laboratuvar modelinde kullanılacak zeminin özellikleri belirlenmiştir. Kullanılan zemin, önemli miktarda Na-montmorillonit içeren bir bentonit olup oldukça yüksek bir şişme potansiyeline sahiptir. Zeminin özellikleri belirlendikten sonra, kür süresini belirlemek amacıyla bir adet küçük ölçekli laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Zeminde oluşan iyon göçü mesafesi fenolftalein yardımıyla her haftanın sonunda ölçülmüş ve ölçümler iyon göçü mesafesi sabitleşinceye kadar sürdürülmüştür. İyon göçünün sabitleşmeye başladığı süre ise kür süresi olarak alınmıştır.

Bentonit ve Kirecin Özellikleri

Araştırma kapsamında kullanılan bentonit Reşadiye (Tokat)' de bulunan ve Samaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından elde edilmiştir. Kireç ise sönmüş kireç olup Niksar (Tokat)'da bulunan bir kireç ocağından alınmıştır. Söz konusu bentonit Toksöz ve Yılmaz (2020) tarafından yürütülen bir çalışmada kullanılan bentonit ile aynıdır. Dolayısıyla bentonitin özellikleri söz konusu çalışmadan alınmıştır (Çizelge 1). XRD tüm kayaç çekim ve kil çekim difraktogramları Şekil 1' de sunulmuştur. XRD tüm kayaç çekim difraktogramı incelendiğinde bentonitte mevcut olan minerallerin kil, kuvars,

kalsit ve feldispat olduğu görülmektedir. Karakteristik XRD kil çekim difraktogramından görüldüğü üzere bentonitin ortalama yarı niceliksel Na-Smektit içeriği %89 olarak bulunmuştur. Bentonitin diğer fiziksel özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir. Kullanılan bentonit oldukça yüksek bir şişme potansiyeline sahip olup Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre CH olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca Skempton (1953) tarafından önerilen sınıflamaya göre aktif kil sınıfına düşmektedir (Toksöz ve Yılmaz, 2020).

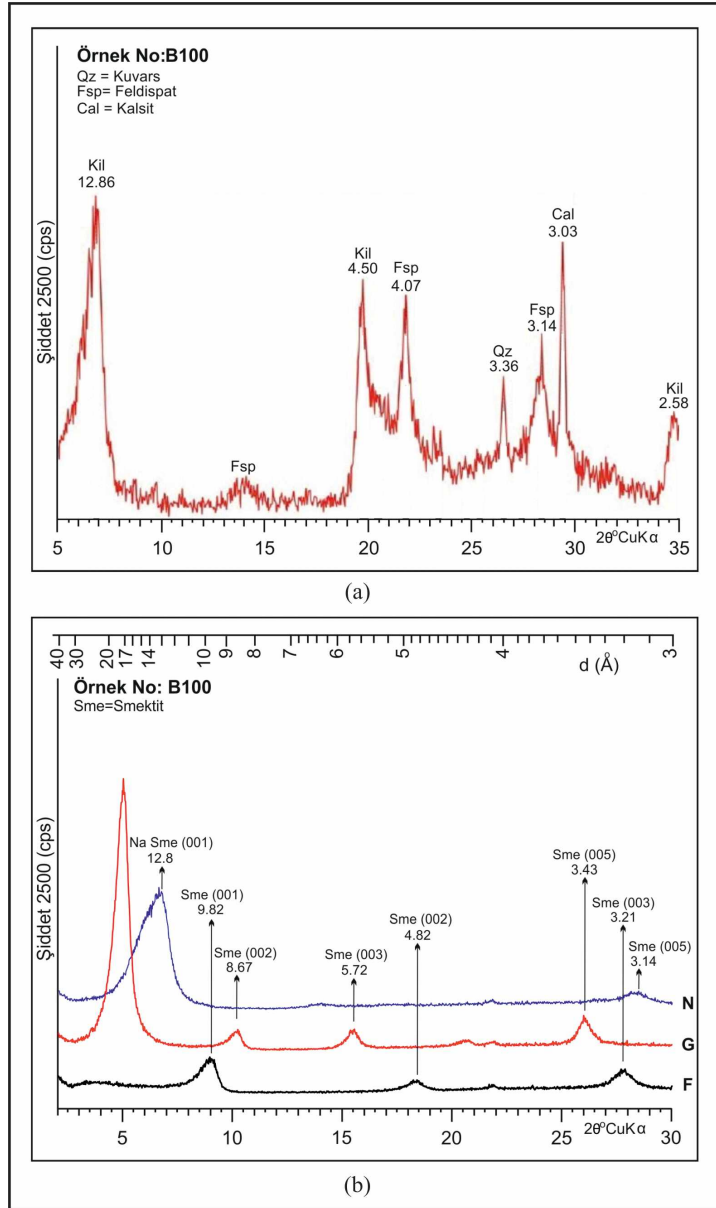
Çizelge 1. Kullanılan bentonitin özellikleri (Toksöz ve Yılmaz, 2020).

Table 1. The properties of the used bentonite (Toksöz ve Yılmaz, 2020).

Özellik	Değer
Likit limit (%)	269
Plastik limit (%)	34.72
Plastisite indeksi (%)	234.28
Zemin sınıfı (USCS)	CH
Kil yüzdesi (%)	100
Aktivite	2.34
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	10.98
Optimum su içeriği (%)	42

Laboratuvar Modelinin Oluşturulması

Kireç içerisindeki iyonların kolondan zemin içerisine olan göç mesafesini ölçebilmek için bir asit baz indikatörü olan fenolftalein kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, asitli ve nötral ortamda renksiz olan fenolftalein bazik ortamda pembe renge döner. İçerdiği hidroksil iyonları kirece yüksek oranda alkalın (bazik) özellik kazandırmakta (Glendinning ve Rogers, 1996; Tonoş vd., 2003) ve bu ise fenolftalein ile temas etmesi durumunda kirecin pembe bir renk almasına neden olmaktadır (Rogers ve Glendinning, 1994).



Şekil 1. Bentonite ait XRD difraktogramları: (a) Tüm kayaç; (b) Kil çekim (Toksöz ve Yılmaz, 2020).

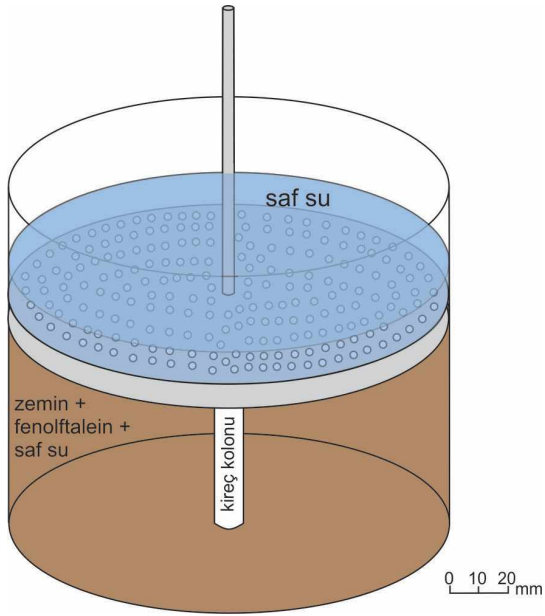
Figure 1. XRD diffractograms of bentonite. (a) a bulk (whole) sample; (b) clay fraction (Toksöz and Yılmaz, 2020).

Fenolftalein ile iyon göçünü belirleyebilmek için öncelikle fenolftalein çözeltisi hazırlanmalıdır. Fenolftalein çözeltisini hazırlamak için 1 gr fenolftalein 50 ml etil alkolde çözülür ve hacim 100 ml'ye tamamlanacak şekilde etil alkol ilave edilir. Eğer bir çökelti

oluşursa süzgeç kâğıdı yardımıyla süzülür (Dölen, 2002).

Laboratuvar modelini oluşturmak için öncelikle zemin örneği optimum su içeriğinde ve bir miktar (50 ml) fenolftalein çözeltisi ile

karıştırılmıştır. Zemin örneği 152 mm çapında 115 mm yüksekliğindeki bir kompaksiyon kalıbına optimum su içeriğinde ve kompaksiyon çekici kullanılarak standart sıkıştırma enerjisinde sıkıştırılmıştır. Ardından bir örnek çıkarıcı kullanılarak tüpün merkezinde 10 mm çapında bir delik açılmış ve açılan delik sönmüş kireç ile doldurulmuştur. Kireç kolonu oluşturulduktan sonra, modelin üstüne arada filtre kâğıdı olacak şekilde delikli bir plaka yerleştirilmiştir. Ardından iyon göçüne yardım etmesi amacıyla modelin üst tarafından su girişi sağlanmıştır. Oluşturulan modelin kesiti Şekil 2’de verilmiştir.

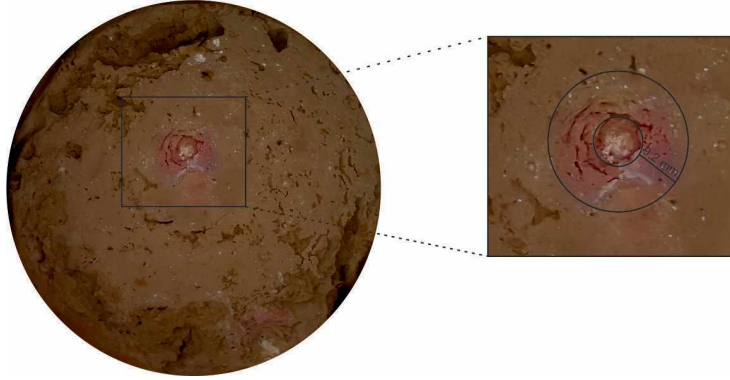


Şekil 2. Oluşturulan modelin kesiti.

Figure 2. Cross section of the created model.

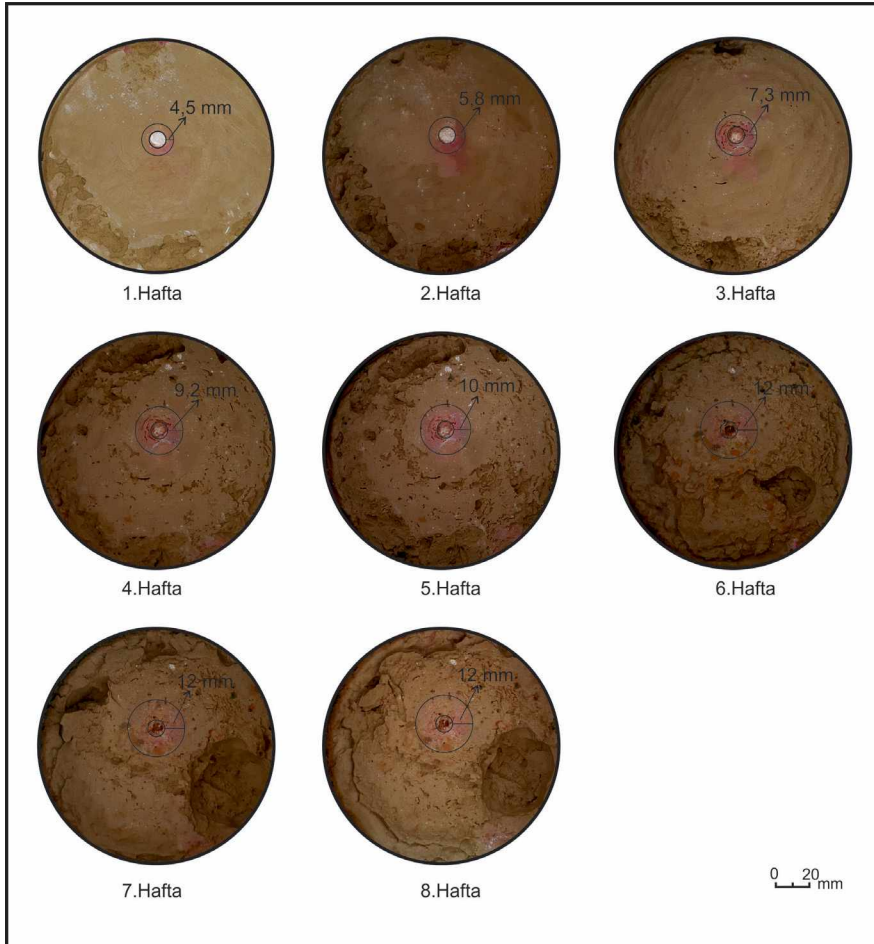
BULGULAR

Oluşturulan model küre bırakılmıştır. Geçen süre içerisinde, her haftanın sonunda modeldeki su boşaltılıp, demir plaka ve filtre kâğıdı kaldırılıp kolondan itibaren olan göç mesafesi ölçülmüş ve fotoğraflanmıştır. Demir plaka kaldırıldığında kireç kolonu etrafında pembe renkli radyal bir zonun varlığı gözlenmiştir. Bu renk zemin içerisindeki fenolftaleinin kireç ile temas etmesi sonucu oluşmuştur. Bu renkli zonun sınırları milimetre ölçeğinde ölçülerek kaydedilmiştir. Mesafe ölçümleri kolonun dış kenarından itibaren alınmıştır. Bu işlemler iyon göçü mesafesi sabitleşinceye kadar sürdürülmüştür. 6. haftadan itibaren iyon göçü mesafesinin değişmediği görülmüş ve 8. haftada ölçüm alımı sonlandırılmıştır. Örnek oluşturması amacıyla Şekil 3’te 4. haftada alınan mesafe ölçümü gösterilmiştir. Diğer haftalar için ölçülen göç mesafeleri Şekil 4, iyon göçü mesafesinin zamana bağlı olarak değişimi ise Şekil 5’te sunulmuştur. Şekil 4 ve 5’te görüldüğü üzere kolondan itibaren olan iyon göçü mesafesi 6. haftaya kadar artmış ancak bu haftadan sonra sabitleşmiştir. Dolayısıyla aynı zemin için oluşturulacak daha büyük ölçekli laboratuvar modellerinde 6 haftalık bir kür süresi dikkate alınabilir. Maksimum iyon göçü mesafesi ise 12 mm olarak ölçülmüştür. Diğer bir ifadeyle, kolon çapının 1.2 katı kadar bir iyileştirme mesafesi elde edilmiştir.



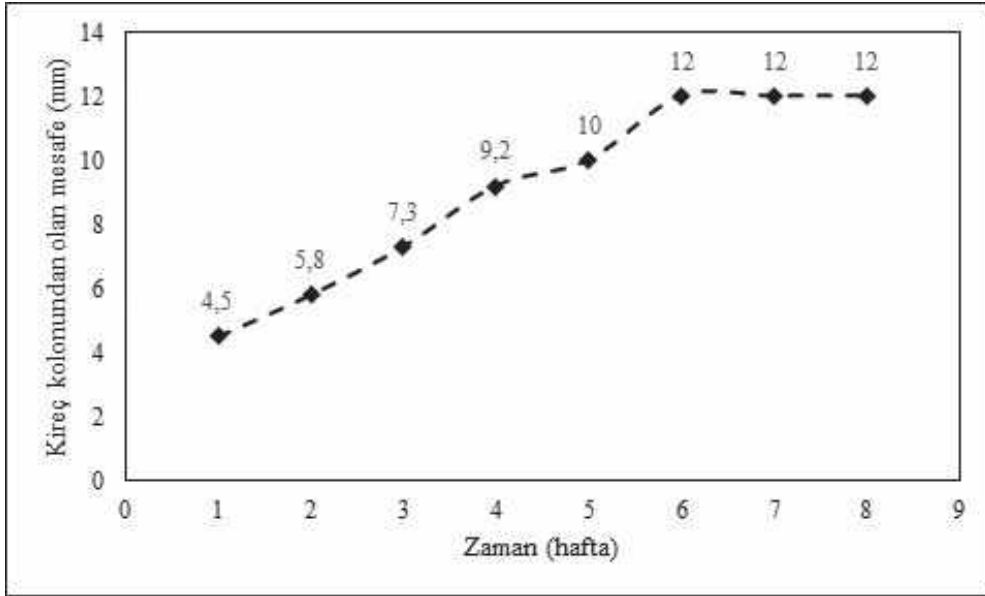
Şekil 3. 4. haftanın sonunda gözlenen iyon göçü mesafesi.

Figure 3. Ion migration distance observed at the end of the 4th week.



Şekil 4. Kür süreleri boyunca gözlenen iyon göçü mesafeleri.

Figure 4. Ion migration distances during curing times.



Şekil 5. İyon göçü mesafesinin zamana bağlı olarak değişimi.

Figure 5. Variation of ion migration distance with time.

Elde edilen bulgular konu ile ilgili yapılan daha önceki çalışmaların sonuçlarıyla yaklaşık olarak uyumludur. Toksöz ve Yılmaz (2020) şişen kil oranının iyon göçü üzerindeki etkisini araştırırken fenolftaleinden faydalanmışlar ve %100 bentonit içeren zeminde kolon çapının 1.5 katı kadar bir mesafede iyon göçü saptamışlardır. Bu mesafe mevcut çalışmada elde edilen iyon göçü mesafesinden 1.25 kat daha büyüktür. Ancak bu farklılık iki çalışmada yapılan sulama tekniklerinin farklı olmasından kaynaklanıyor olabilir. Toksöz ve Yılmaz (2020) hazırladıkları modellere kireç kolonundan su vermişlerdir. Oysa mevcut çalışmada modelin üst kısmından su verilmiştir. Suyun kireç kolonundan verilmesi iyon göçünü hidrolik iletkenlikten dolayı arttıracaktır. Toksöz ve Yılmaz (2019b) yapmış oldukları başka bir çalışmada kireç kolonunun Na-bentonit kilini iyileştirmedeki performansını araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan bentonit

mevcut çalışmada kullanılan bentonit ile aynı özelliklere sahiptir. Araştırmacılar bentoniti 20x30x45 cm boyutunda metal bir kasaya 15 cm yüksekliğinde olacak şekilde standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırmışlar ve kasanın köşesine 5 cm çapında bir kireç kolonu oluşturmuşlardır. 2 aylık bir kür süresi sonunda kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan örnekler üzerinde serbest şişme deneyi yapmışlar ve kolonun 1 katı kadar bir mesafede iyileşme gözlemlemişlerdir. Bu mesafe bu çalışmada fenolftalein kullanılarak elde edilen iyon göçü mesafesi ile yaklaşık olarak aynıdır. Dolayısıyla fenolftalein ile elde edilen iyon göçü mesafesinin klasik yöntemlerle elde edilen iyon göçü mesafesini yaklaşık olarak yansıttığı söylenebilir. Ayrıca daha büyük ölçekli modellerde yaklaşık eşit miktarda iyon göçü mesafesinin saptanması ölçek etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada kireç kolonu tekniğinin şişen zeminleri iyileştirmedeki performansını belirlemeye yönelik oluşturulan laboratuvar modellerinde kür süresinin daha kolay ve ekonomik bir yöntemle belirlenebilirliği araştırılmıştır. Söz konusu yöntem kireç göçünün zeminde oluşturduğu renk değişiminin sınırlarının ölçülmesine dayanmaktadır. Bu renk değişimi zemin içerisine katılan bir asit baz indikatörü olan fenolftalein ile sağlanmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda laboratuvar ortamında bir model çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirli bir süre sonra, modeldeki kireç kolonu etrafında pembe renkli radyal bir zonun olduğu gözlenmiştir. Bu zonun radyal şeklinde olması, renk değişiminin kirecin zemin içerisine olan göçünden kaynaklandığını göstermektedir. Düzenli aralıklarla iyon göçü mesafesindeki değişimler ölçülmüş, iyon göçü mesafesi sabitleştikten bir süre sonra ise ölçümlere son verilmiştir. Elde edilen ölçümler incelendiğinde iyon göçünün ilk 6 haftaya kadar arttığı, bu haftadan sonra ise sabitleştiği görülmüştür. Maksimum iyon göçü mesafesi ise 12 mm olarak ölçülmüştür. Bu durum bu zemin için elde edilen iyileştirme mesafesinin kolon çapının 1.2 katı kadar olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla laboratuvarda oluşturulacak daha büyük ölçekli modellerde kolonlar arasındaki mesafe kolon çapının 1.2 katı kadar ve kür süresi ise 6 hafta olarak seçilebilir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile kireç kolonu uygulamalarında kür süresi birden fazla laboratuvar modeli oluşturmaksızın belirlenebilecektir. Ayrıca birden fazla kireç kolonu içeren laboratuvar modellerinin oluşturulması gerektiği durumlarda, araştırmacılar kolonlar arasında bırakılacak mesafeye zor ve karmaşık laboratuvar deneylerine

gerek kalmaksızın karar verebileceklerdir. Elbette ki zeminde oluşan iyileşmenin miktarını belirleyebilmek için serbest şişme ya da serbest basınç gibi deneylerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım bir ön laboratuvar çalışması yöntemi olarak kabul edilip sadece iyon göçü mesafesi ve kür süresine karar vermek için kullanılmalıdır. Bu yöntem ile elde edilen kür süresi dikkate alınarak oluşturulan daha büyük ölçekli bir modelde kireç kolonu tekniğinin iyileştirme performansı şişme ve dayanım deneyleri ile belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- Abiodun, A.A., Nalbantoglu, Z., 2015. Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (6), 760-768.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Dölen, E., 2002. Analitik Kimyaya Giriş Sulu Çözeltilerde Denge. Marmara Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Glendinning, S., Rogers, C.D.F., 1996. Deep Stabilisation Using Lime, In: Rogers, C.D.F., Glendinning, S and Dixon, N. (Editors). *Lime Stabilisation: Proceedings Seminar on Lime Stabilisation*, Loughborough University, Thomas Telford, London, pp. 127-138.
- Jones, D.E., Holtz, W.G., 1973. Expansive soils – the hidden disaster. *ASCE, Civil Engineering*, 43, 87-89.
- Jones, D.E., Jones, K.A., 1987. Treating expansive soils. *Civil Engineering*, 57 (8), 62-65.
- Reunkrairergsa, T., Pimsarn, T., 1982. Deep hole lime stabilisation for unstable clay shale embankment. *Proceedings of the 7th SE Asia Geotechnics Conference*, Hong Kong, 631-645.
- Rogers, C.D.F., Bruce, C.J., 1991. *Slope Stability Engineering*. Thomas Telford, London, p 443.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1994. *Deep Slope Stabilisation Using Lime*. Transportation

- Research Record 1440, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA, 63-70.
- Rogers, C.D.F., Glendining, S., 1997. Improvement of clay soils in situ using lime piles in the UK. *Engineering Geology*, 47, 243–257.
- Skempton, A.W., 1953. The colloidal activity of clays. In: *Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering*. Zurich, Switzerland, ICOSOMEF, pp 57-61.
- Toksoz, D., Yılmaz, I., 2019a. Influence of swelling clay content on ion migration and column performance in lime column treated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 813-832.
- Toksoz D., Yılmaz, I., 2019b. A study on the performance of lime column technique for treatment of a Na-bentonite clay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 221 (012018).
- Tonoç, M.C., Gökçeoğlu, C., Ulusay, R., 2003. A laboratory – scale experimental investigation on the performance of lime columns in expensive Ankara (Turkey) Clay. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment*, 62, 91 –106.
- Tüdeş, E., 1996. Zeminlerin Kireç ve Çimento Katkısı ile Stabilizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Van Impe, W.F., 1989. *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. A.A. Balkema Rotterdam Brookfield.
- Yılmaz, I., 2007. *Mühendislik Jeolojisi – İlkeler ve Temel Kavramlar*, Teknik Yayınevi, Ankara.



Derleme / Review Paper

Şişen Zeminlerdeki Kireç Kolonu Uygulamalarında İyon Göçü Mekanizması Ion Migration Mechanism in Lime Column Applications in Swelling Soils

Derya TOKSÖZ HOZATLIOĞLU^{1*} , Işık YILMAZ¹ 

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, 58140

Geliş (Received): 02 Ekim (October) 2021 / Düzeltme (Revised): 20 Ekim (October) 2021 / Kabul (Accepted): 01 Kasım (November) 2021

ÖZ

Şişen zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi çok uzun yıllardır araştırılmakta olup, literatürde bu konu ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardaki yaygın görüş kireç kolonu tekniğinin iyileştirme mekanizmasının kireç içerisindeki Ca^{+2} ve OH^- iyonlarının kolonu çevreleyen zemine göç etmesi sonucu oluşan fiziko-kimyasal reaksiyonlara dayandığıdır. Buna rağmen çok az sayıda çalışmada iyileştirmenin temelini oluşturan iyon göçünden ve iyon göçünü etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir. Bu çalışma derleme türü bir çalışma olup çalışmanın amacı kireç kolonu uygulamalarında iyon göçü mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır. Çalışma kapsamında öncelikle iyonların genel olarak zemin ortamındaki hareketinden bahsedilmiştir. Ardından zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında oluşan iyon göçü mekanizması ve son olarak iyon göçünü etkileyen faktörler bu konuda yapılan çalışmalara değinilerek açıklanmıştır. Çalışma sonucunda literatürde iyon göçünü açıklayan tek ve kesin bir mekanizmanın bulunmadığı görülmüştür. Ancak yapılan çalışmalardan yola çıkılarak kireç içerisindeki iyonların zemin içerisine olan göçünün genel olarak iyon difüzyonu ve su akışına bağlı kütle iletiminin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Şişen Zeminler, Kireç Kolonu, İyileştirme, İyon Göçü

ABSTRACT

Stabilisation of swelling soils by using lime column technique has been investigated for many years and there have been numerous studies on this topic in the literature. The common view in these studies is that stabilisation mechanism of lime column technique is based on physico-chemical reactions occurred as a result of migration of Ca^{2+} and OH^- ions from lime column to the surrounding soil. In spite of this, ion migration which is the basis of stabilisation, and the factors affecting ion migration have been mentioned in very few studies. This study is a review type study and the purpose of the study is to provide a better understanding of the mechanism of ion migration in lime column applications. In the scope of the study, firstly, movement of ions in soil medium in general is explained. Afterwards, ion migration mechanism that occurs during the stabilisation of swelling soils with lime column technique, and finally the factors affecting ion migration mechanism are explained by referring to the studies on this topic. In the result of the study, it was seen that in the literature there is no a single and precise mechanism that explain ion migration. However, it can be said that the migration of ions into the soil is a function of ion diffusion and mass transport depending on water flow.

Keywords: Swelling Soils, Lime Column, Stabilisation, Ion Migration

GİRİŞ

İnsanoğlu varoluşundan beri barınma ve savunma gibi ihtiyaçları için gerekli olan yapıları zemin üzerinde inşa etmekte veya zemini çeşitli toprak yapıların (toprak dolgu barajı, yol temeli gibi) oluşturulmasında kullanmaktadır. İnşa edilecek yapıların güvenli ve ekonomik olabilmesi için kullanılacak zeminin özelliklerinin jeolojik ve jeoteknik yönden incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bazı zemin koşulları sorunlu olup, tasarımdan önce ek iyileştirmeler istemektedir. Bunlara sorunlu zeminler denilmektedir. En yaygın olarak karşılaşılan sorunlu zeminler ise şişen zeminlerdir.

Şişen zeminler ıslanma veya kuruma sonucunda hacim değişikliğine uğrayan killi zeminlerdir. Zemin şişmelerinin neden olduğu hasarlar özellikle hafif yapılar (tek katlı binalar), park alanları, yollar ve tretuvarlar, havaalanları, altyapı tesisleri, sulama kanalları, bahçe duvarları ve tüneller gibi yapılarda daha fazla oluşmaktadır. Zemin yüzeyinde oluşacak kabarma ve büzülmenin miktarı çoğunlukla bir yapının altındaki alan içerisinde dahi farklılıklar gösterebilir. Bunun sonucu olarak, temel sisteminin farklı noktalarında değişik miktarlarda hareketler oluşabilir.

Şişen zeminlerin neden olduğu problemlerin büyük bir kısmından sorunun inşaat öncesi çalışmalarda teşhis edilmesi ve uygun koruyucu önlemlerin alınması ile kaçınılabilmektedir. Şişen zeminlerden kaynaklanan problemlerden kaçınmak için en sık başvuru yöntem zeminin yerinde yapılan işlemlerle iyileştirilmesidir. Zemin iyileştirmesi zeminlerin istenmeyen özelliklerinin yapılması planlanan bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal yöntemler kullanılarak istenilen yönde değiştirilmesi olarak tanımlanabilir. Şişen zeminler için en yaygın olarak kullanılan

iyileştirme yöntemi çeşitli katkı maddeleri ile yapılan kimyasal iyileştirme. Kimyasal iyileştirme kil ile katkı maddeleri arasında gerçekleşen fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Literatürde en yaygın olarak kullanılan katkı maddesi ise kireçtir (Snethen, 1979).

Kireç ile iyileştirilmiş bir zemin elde etmek için kullanılan başlıca iki metot vardır; bunlar yüzeysel karıştırma ve kolon teknikleridir. Yüzeysel karıştırma tekniğinde zemin özel bir araçla gevşetilir, üzerine belirli miktarda kireç serilir ve killi malzeme ile kireç uygun su içeriğinde karıştırılır ve son olarak sıkıştırılır. Bu yöntemde iyileştirme fazla derinlere inilmeden yapılır. Kolon tekniğinde ise zemin içerisinde belirli aralıklarla gerekli derinlik ve çaplarda delikler açılır ve bu delikler kireç ile doldurulur. Kolonlar oluşturulduktan sonra zaman içerisinde kireç içerisindeki iyonlar kolonu çevreleyen zemine göç etmeye başlar. Bunun sonucu olarak kirecin içerdiği pozitif iki değerlikli iyonlar ile negatif yüklü kil mineralleri arasında fizikokimyasal reaksiyonlar gerçekleşir.

Kireç kolonu uygulamalarında kirecin içerdiği iyonların zemine olan göçü iyileşmenin oluşabilmesi için en önemli süreçtir (Rogers ve Glendinning, 1994). Dolayısıyla, iyon göçü mekanizmasının anlaşılması, iyon göçünü etkileyen faktörlerin bilinmesi ve uygulamaların bu faktörler dikkate alınarak yapılması iyileştirme performansı açısından önemlidir. Literatürde kireç kolonu tekniği ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen bunların çok az bir kısmında iyon göçü mekanizmasından bahsedilmiştir. Özellikle ulusal literatürde iyon göçü mekanizmasının açıklandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalarda çoğunlukla bir kireç kolonu oluşturulur ve kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan örnekler üzerinde serbest basınç ya da şişme deneyleri yapılarak

iyileştirmenin ne boyutta ve hangi mesafelerde olduğuna bakılır. Ancak iyileştirmenin temelini oluşturan iyon göçünden çok az söz edilir. Bu çalışma derleme türü bir çalışma olup, çalışmanın amacı şişen zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi sırasında oluşan iyon göçü mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır. Çalışma kapsamında öncelikle genel olarak iyonların zemin ortamındaki hareketinden ve bu konu ile ilgili olarak yapılan önceki çalışmalardan bahsedilmiştir. Ardından, zeminlerin kireç kolonu tekniği ile stabilizasyonu sırasındaki iyon göçü ve son olarak iyon göçünü etkileyen faktörler bu konuda yapılan çalışmalara değinilerek açıklanmıştır.

KİLLİ ZEMİNLERDE İYON GÖÇÜ

İyon göçü kimyasal zemin iyileştirme çalışmalarının yanı sıra bazı ziraat ve çevre mühendisliği uygulamalarının da temelini oluşturmaktadır. Ziraat mühendisliğinde iyon göçü toprak-su sistemi için oldukça önemlidir. Toprağa eklenen gübreler toprak içerisinde çözünür ve bitki besin elementleri iyon göçü mekanizmasıyla bitki kök bölgesine taşınırlar (Öztaş, 1997). Çevre mühendisliğinde ise katı atık depolama sahalarındaki kirleticilerin geçişinin incelenmesinde iyon göçü mekanizmasının anlaşılması önemlidir. Kirleticilerin geçirimsizlik tabakasından doğal zemine geçişi iyon göçü mekanizması tarafından kontrol edilmektedir (Adar, 2013). Dolayısıyla killi zeminlerde oluşan iyon göçü ile ilgili bilgilere değişik disiplinlerde rastlanabilmektedir. Aşağıda bu çalışmalardan derlenen bilgiler sunulmuştur.

Killi zeminlerde iyon göçünü sağlayan başlıca iki mekanizma vardır. Bunlar adveksiyon ve difüzyondur. Advektif geçiş iyon göçünün kil boyunca su akımıyla gerçekleşmesi olarak tanımlanabilir (Edil, 2003). Difüzyon geçişinde ise

iyonlar yüksek konsantrasyonda bulundukları bir bölgeden düşük konsantrasyonda bulundukları bölgeye hareket ederler. Rogers ve Glendinning (1996), difüzyon sürecinin iyon değişimiyle kontrol edildiğini belirtmişlerdir. Yüksek plastisiteli zeminlerde iyonların hareketinde difüzyon mekanizması etkindir. Adveksiyon mekanizması ise zeminin geçirimsizliği oranında etkili olabilmektedir. Dolayısıyla düşük plastisiteli ya da önemli oranda iri bileşen içeren zeminlerde iyonların iletiminde adveksiyon mekanizması daha etkilidir denilebilir (Mitchell ve Soga, 2005).

Elektriksel ve magnetik alanlar gibi değişik tipteki kuvvetlerin varlığı da iyonların hareketini etkileyebilir. Her iyonun bir difüzyon katsayısı vardır, ancak iyonlar iyon çifti olarak bulunduklarında kendi difüzyon hızlarında hareket etmezler. Bunun nedeni elektriksel kuvvetlerdir. Elektriksel kuvvetler hızlı iyonu yavaşlatmaya yavaş iyonu ise hızlandırmaya eğilimlidirler. Böylece iyon çifti iyon hızlarının ağırlıklı ortalamasında hareket eder. Ancak eğer iyonlar ve kil arasında herhangi bir reaksiyon söz konusu olursa, örneğin iyonlardan birinin kilin yapısındaki herhangi bir iyonla yer değiştirmesi söz konusuysa, bu durumda difüzyon sadece iyon çiftine değil, ayrıca kilin ve kildeki değişebilir iyonun türüne de bağlıdır (Jungnickel vd., 2004).

Zeminlerdeki iyon göçü sıvı çözeltilerde oluşan iyon göçünden daha komplekstir. Mitchell (2005) bunun başlıca nedenlerini şöyle açıklamıştır:

1. Gözenekli ortamdaki partiküller nedeniyle difüzyon yolları lineer değildir.
2. Kil partiküllerinin elektriksel alanı difüze olan iyonların göç yollarını etkileyebilir.
3. Bazı iyonların gecikmesinin nedeni kil mineralleri üzerine adsorpsiyonu ve iyon değişimidir.

Toksöz Hozatlıoğlu, Yılmaz

Bir akışkan içerisindeki toplam konsantrasyon sabit ise moleküler difüzyon Fick'in birinci kanununa göre aşağıdaki gibi yazılır (Öztaş, 1997):

$$F = dQ_c / dt = -DA(dC/dx) \quad (1)$$

Burada;

Q_c : difüze olan iyon miktarı, g mol⁻¹

t : zaman, s

D : difüzyon katsayısı, cm² s⁻¹

A : kesit alanı, cm²

C : konsantrasyon, g cm⁻³

x : difüze olan iyonun hareket yönündeki mesafe, cm.

Fick'in kanunu sıvı veya gaz gibi uniform ortamlardaki difüzyonu tanımlamak amacıyla üretilmiştir. Zemin ise kompleks ve değişken bir ortamdır. Zemin içerisindeki iyonların difüzyonunu açıklamak için zeminin farklı fiziksel, kimyasal ve geometrik karakteristiklerini dikkate almak ve onu düzensiz paketlenmiş, elektrik yüklü, kompleks gözenekli bir malzeme olarak düşünmek gerekmektedir (Öztaş, 1997). Dolayısıyla zemindeki iyonların difüzyon katsayılarında değişikliklere neden olan etkilerin tanımlanması ve difüzyon eşitliğine eklenmesi gereklidir. Bu etkilerden bazıları; akış yolunun pürüzlülüğü, suyun nispi akışkanlığı, elektrostatik sınırlama ve kesit alanının azalması olarak sayılabilir. Zemindeki difüzyonu tanımlamak için bu faktörlerden ilk üçü bir araya getirilerek "azaltıcı faktör" (f) ismi altında difüzyon eşitliğine eklenmektedir. Azaltıcı faktör, daima 1 'den küçük bir değer almakta olup zemindeki nem içeriği, agregatlaşma ve sıkışma tarafından etkilenmektedir (Öztaş, 1997).

$$f = (L/Le)^2 rf \quad (2)$$

Burada;

Le : iyonların bir noktadan diğer bir noktaya giderken izlediği yol

L : iki nokta arasındaki izafi mesafe

rf : suyun nispi akışkanlığından kaynaklanan değişim

Zeminlerde oluşan iyon göçü sadece difüzyon (kimyasal gradyan) tarafından kontrol edilmemektedir. Ortamdaki elektriksel, hidrolik ya da termal gradyanların varlığı da iyon göçünü etkilemektedir. Bir ortamda herhangi bir gradyan yüzünden oluşan iyon göçü hem itici kuvvetin (ortam boyunca olan gradyanın magnitudü) hem de akış katsayısının (ortamın akışkana karşı olan direncinin tersi) bir fonksiyonudur (Barker vd., 2007). 4 ana akış türü Barker vd. (2007) tarafından aşağıdaki şekilde açıklanmıştır.

Kimyasal akış: Diğer bir ismi difüzyondur. Kimyasal türlerin konsantrasyondaki gradyan yüzünden iletimidir. Zemin boyunca oluşan difüzyon, akımın azalan kesit alanı, akım yolunun eğrilik katsayısının artması ve farklı kimyasal türler ve boşluk suyu arasındaki etkileşim yüzünden azalır.

Elektriksel akış: Bir ortam boyunca uygulanan elektriksel potansiyel yüzünden oluşan iyon iletimidir. Ohm kanunu ile tanımlanır. Bu kanuna göre bir ortamda elektriksel alan oluştuğunda elektronlar hızlanır ve kinetik enerji kazanır. Bu elektronlar atomlarla çarpışır ve kinetik enerjiyi transfer ederler. Elektriksel iletkenlik yoğunluktan ve ortam içindeki yük taşıyıcılarının serbestliğinden etkilenir. Zemin içerisindeki elektriksel iletkenlik su içeriği, iyonik dayanım, boşluk sıvısı içerisindeki konsantrasyon, zeta potansiyeli ve zemin sıcaklığının bir fonksiyonudur.

Hidrolik akış: Hidrolik gradyan yüzünden oluşan sıvı iletimidir. Darcy kanunu ile tanımlanır. Bu kanuna göre sıvıların ve gazların akmaya olan dayanımı viskoziteye bağlıdır. Zemin içindeki sıvı akışı doygunluk derecesinin, partikül boyutunun, paketlenme düzeninin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.

Termal akış: Sıcaklık gradyanı yüzünden iç enerjinin iletkenlik, konveksiyon ve ışıınım ile iletilmesidir (Fourier kanunu). İç enerji atomların denge pozisyonları civarında titreterek sahip oldukları enerjidir. Zemin içindeki termal akış doygunluk derecesinin bir fonksiyonudur.

Zemin boyunca iyonların akış katsayısını ölçmek zeminin heterojen olması ve bağlaışık akışların oluşmasından dolayı karışıktır. Bir zemin sistemi boyunca pek çok akış tipinin oluşması karışık analiz metotlarını gerektirir. Barker vd. (2007) çalışmasında bu karışık analiz metotlarından bazılarını açıklamıştır. Mevcut çalışmada bu karışık analiz metotlarına değinilmemiş olup kireç kolonu uygulamalarında oluşan iyon göçü mekanizması açıklanmıştır.

KİREÇ KOLONU UYGULAMALARINDA İYON GÖÇÜ MEKANİZMASI

Kireç kolonu tekniğinin iyileştirme mekanizması kireç içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemine zamanla göçü sonucu kil ile kireç arasında oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayanır. Bu reaksiyonlar kirecin içerdiği pozitif iki değerlikli iyonlar ve negatif olarak yüklü kil mineralleri arasında meydana gelir ve iyileştirme mekanizmasının temelini oluşturur. İyon göçünün oluşabilmesi için zeminin yeterli nem içeriğine sahip olması gerekir. Bu yüzden Ruenkraiters ve Pimsarn (1982), göçün gerçekleşebilmesi için kireç kolonlarının yağmurlu mevsimlerden önce

inşa edilmesi gerektiğini önermişlerdir. Kireç içerisindeki iyonların zemin içerisine olan göçünden hemen sonra meydana gelen reaksiyon kation değişimidir. Kireç kolonundan zemin içerisine difüze olan Ca^{+2} iyonları kil içerisinde mevcut olan tek değerlikli Na^{+} iyonlarıyla yer değiştirir. Ca^{+2} iyonlarının yanı sıra kireçteki hidroksil (OH^{-}) iyonları da zemin içerisine göç eder. Hidroksil iyonları zeminin alkalitesini artırır. Yüksek alkalın koşullar silika ve alümina bileşenlerinin kil minerallerinden ayrışmasına sebep olur. Ayrışan bu bileşenler kireçten gelen Ca^{+2} iyonlarıyla reaksiyona girerek kalsiyum silika hidrat (CSH) ve kalsiyum alümina hidrat (CAH) gibi zeminin çimentolaşmasını sağlayan puzolanik bileşenler oluşturur. Bu puzolanik reaksiyonlar uzun bir süre içerisinde gerçekleşir ve zeminin dayanımını artırır.

İyileşmenin gerçekleşebilmesi için her iki iyonun da zemin içerisine göç etmesi gerekir. Zeminin Ca^{+2} iyonlarıyla doygunluğu kil minerallerinin mevcut değişim yerlerindeki maksimum kation değişimi için gereklidir. OH^{-} iyonları kalsiyum silika hidrat (CSH) ve kalsiyum alümina hidrat (CAH) oluşturmak üzere silika ve alüminanın çözülmesi için gereken yüksek alkalın şartları ($pH > 12,4$) oluşturur (Rogers ve Glendinning, 1996). Dolayısıyla kireç kolonu uygulamalarında tam bir iyileştirme OH^{-} iyon göçünün genişliğine bağımlı kalır. Çünkü reaksiyonların gerçekleşebilmesi için yüksek pH değerleri gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle stabilizasyon için OH^{-} iyonları tarafından üretilen yüksek pH şartlarına ihtiyaç vardır, ancak modifikasyon için sadece iyon değişimi yeterlidir (Rogers ve Glendinning, 1996).

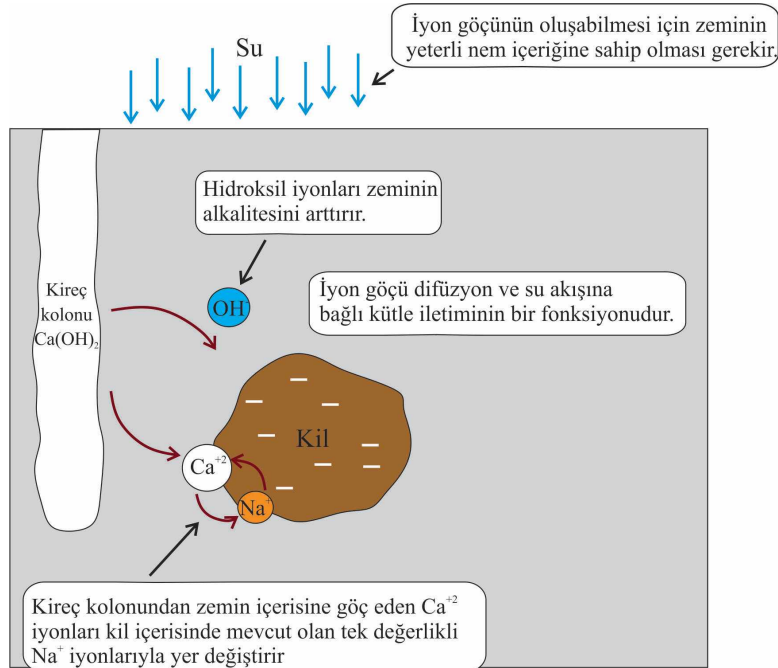
Ca^{+2} ve OH^{-} iyonlarının difüzyon sabitleri benzerdir ancak uzun dönemde Ca^{+2} iyonu OH^{-} iyonuna göre daha hızlı ve daha geniş mesafelere göç eder (Davidson vd., 1965). Bu

durum kirecin kil içerisinde advektif sistemde umulduğu gibi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iyon çifti halinde göç etmediğini gösterir. Rogers ve Glendinning (1996), OH^- iyonunun Ca^{+2} iyonundan daha yavaş ve daha dar mesafelere göç etmesinin OH^- iyonlarının alümina silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Başka bir ifadeyle OH^- iyonlarının göç mesafesi kil minerallerinin varlığı ile sınırlanır. Ancak, suya doygun bir zeminde boşluk suyu moleküler hareketi tetikleyen termal iletkenliği artırır ve bu olay OH^- iyonlarının difüzyon hızının ve oranının önemli ölçüde artmasına neden olur (Barker vd., 2007). Beetham vd. (2014) ise Ca^{+2} katyon değişim sürecinin flokülasyona sebep olarak kil partiküllerinin yüzey alanını azalttığını ve bu durumun onların OH^- iyonlarıyla olan etkileşimini azaltarak OH^- iyonunun daha geniş mesafelere göç etmesini sağlayacağını belirtmişlerdir. Kireç kolonu

uygulamalarında iyon göçü oluşumunun genel bir gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur.

Kireç Kolonu Uygulamalarında İyon Göçü ile İlgili Önceki Çalışmalar

Kireç kolonu uygulamalarında iyon göçü ile ilgili çalışmalara genellikle uluslararası literatürde rastlanmaktadır. Noble ve Anday (1967), mineralojisi bilinmeyen 150 mm çapındaki sıkıştırılmış kil örneklerinin içerisine 25 mm çapında kireç kolonları oluşturmuştur. Zemin örneklerinin asitle özütlenmesi ve akabinde EDTA (Etilen Diamin Tetra Asetik Asit) ile titre edilmesiyle serbest kalsiyum miktarı saptanarak iyon göçü mesafesi tanımlanmıştır. İyonların 44 günde 45 mm göç ettiği ve daha kısa mesafelerde 99 gün sonra iyon konsantrasyonlarının arttığı görülmüştür.



Şekil 1. Kireç kolonu uygulamalarında iyon göçü oluşumunun genel bir gösterimi.

Figure 1. A general illustration of the formation of ion migration in lime column applications.

Katti ve Gupta (1970), vertisol toprak olarak bilinen Black Cotton Soil ($LL=80$, $PL=40$)’de kireç göçünü bulmak için zemin içerisinde sönmemiş kireç kolonları ve kireç içerisinde zemin kolonları oluşturmuşlardır. Kirecin göç mesafesini ölçmek için tek eksenli sıkışma dayanımını ve büzülme limitini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, kirecin 150 mm çapındaki zemin örneğinin merkezine 120 gün sonra ulaştığı görülmüştür.

Fosh ve Kinter (1972), küçük bloklar halindeki montmorillonitik ve kaolinitik killeri iyileştirmek için yüksek kalsiyum hidratlı kireci kullanarak bir laboratuvar deneyi uygulamışlardır. Kirecin göç mesafesini bulmak amacıyla, zemindeki serbest kalsiyum miktarı EDTA titrasyonu olarak adlandırılan bir asit baz titrasyonu ile saptanmıştır. Kirecin zemin içerisindeki göç mesafesi 180 gün sonra 40 mm’den daha az olarak ölçülmüştür. Yazarlar, su hareketi ve iyon göçünün ayrı süreçler olduğunu, kil su içeriğinden bağımsız bir zemine en çok kireç katkısının en yoğun kireç çözeltisiyle sağlanabileceğini vurgulamışlardır.

Lutenegger ve Dickson (1984), orta-batı Amerika’da kireç kolonlarının kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar, hem kil-kireç reaksiyonlarında hem de iyonların difüzyon oranlarında zemin mineralojisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Sadece montmorillonitik killerin kireç ile iyileştirmede uygun olduğu belirtilmiştir. Ancak, diğer killerin kireç iyileştirmesi için uygun olup olmadığını gösteren bir delil sunmamışlardır.

Rogers ve Glendinning (1994), kireç kolonu uygulamasının çalışma mekanizması konusunda bir araştırma programı yürütmüşlerdir. Araştırmacılar kireç kolonu uygulamasındaki en önemli iyileştirme sürecinin kireçteki kalsiyum iyonlarının kolon çevresindeki zemin

içerisine göç etmesi ve akabindeki kil kireç reaksiyonlarının olduğunu vurgulamışlardır. Araştırma kapsamında iyileştirme mekanizmasını etkileyen her bir süreç için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Kireç göçünün etkisini saptamak için, $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ m boyutlarındaki rijit bir kutuya killi bir zemin uygun su içeriğinde sıkıştırılmış ve akabinde kutunun merkezinde 50 mm çapında sönmemiş bir kireç kolonu oluşturulmuştur. 8 hafta sonra kolondan itibaren çeşitli mesafelerde zemin örnekleri alınarak, örneklerin serbest kalsiyum iyon içerikleri saptanmıştır. Testler sonucunda kireç göçünün istenilen mesafede olmadığı görülmüştür. Kirecin göç mesafesini saptamak için, ayrıca kilin yüzeyi bir asit baz indikatörü olan fenofaleine boyanmıştır (kireç alkaline olduğu için fenofalein ile temas edince pembe renk alır). Fakat sadece 20 mm’lik bir göç mesafesi saptanmıştır.

Aynı araştırmacılar iyileştirme sürecini etkileyen bir diğer faktör olan nem içeriğinin iyileştirme üzerindeki etkisini araştırmak için, asit baz indikatörü ile karıştırılmış killeri farklı nem içeriklerinde, 32 mm çapındaki perpeks tüplere doldurmuşlardır. Her tüpün merkezine 6 mm çapında sönmemiş kireç kolonu oluşturulmuş ve kirecin renk değişiminden faydalanarak iyonların tüpün ucuna ulaşması için gereken zaman ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda, nem içeriğindeki artışın iyon göçünü artırdığı sonucuna varılmıştır.

Rogers ve Glendinning (1996), kolon uygulamasında kireç göçü mesafesi ile ilgili literatürü gözden geçirmişler ve kireç göçü mekanizmasını tanımlamak için sönmemiş kireç kolonlarını kullanarak bir araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, örselenmemiş doğal kilde difüzyon süreciyle meydana gelen OH^- iyon göçünün yaklaşık 20-30 mm ile sınırlı olduğu görülmüştür. Ancak kil kütleindeki dehidrasyon

çatlağı ya da diğer süreksizlikler aracılığıyla artan hidrolik iletkenliğin daha büyük mesafelerde göçe yol açtığı vurgulanmıştır. Ayrıca, Ca^{+2} iyon göçünün 10 yıl içerisinde 1 m'den daha büyük mesafelerde olabileceği tahmin edilmiştir.

Barker vd. (2006), bir dizi laboratuvar deneyi aracılığıyla, Londra kilinde kireç kolonundan olan iyon göçünün sebep olduğu fiziksel ve kimyasal olayları incelemişlerdir. Çalışmada, iyon göçünün üç etmenin (kimyasal, elektriksel ve hidrolik eğim) etkisi altında meydana geldiği görülmüştür.

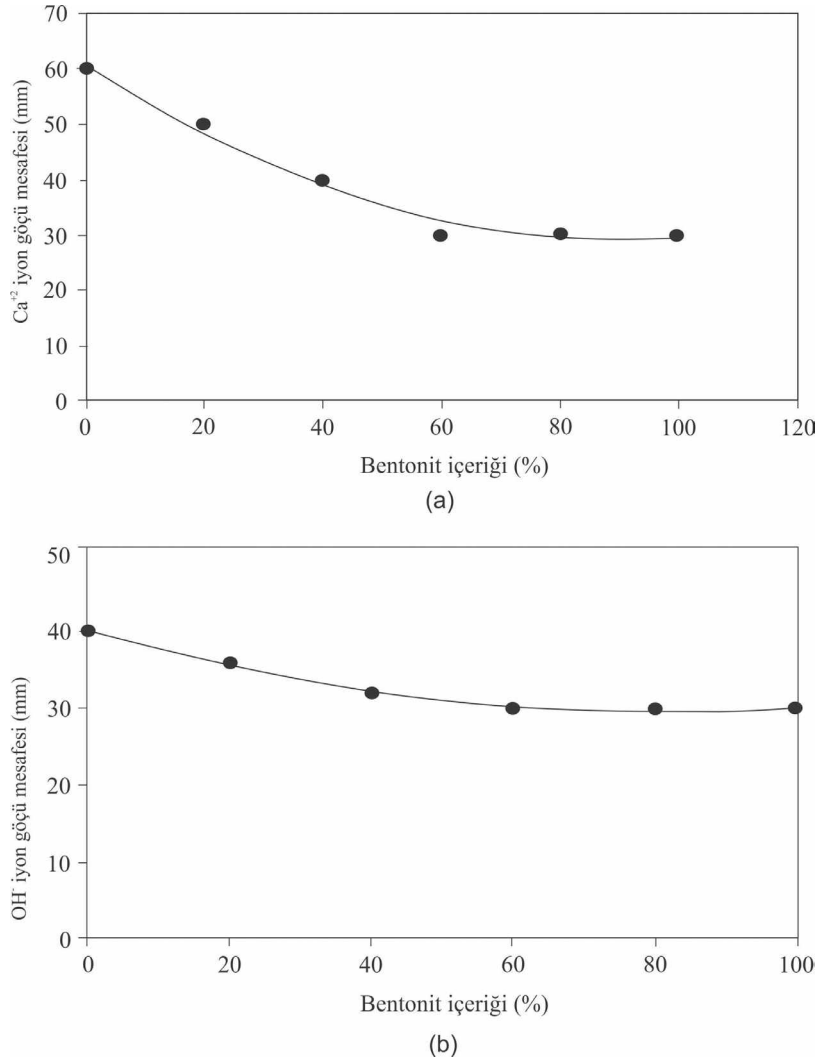
Toksöz ve Yılmaz (2020), şişen zeminlerin kireç kolonu ile iyileştirilmesinde zemin içerisindeki şişen kil içeriğinin iyon göçü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar amaca yönelik olarak ağırlıkça %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında bentonit içeren zemin örnekleri hazırlamış olup her zemin örneği için laboratuvarında modeller oluşturmuşlardır. Modellerde oluşan Ca^{+2} iyon göçü mesafesini belirlemek amacıyla kolondan itibaren belirli mesafelerde alınan numunelerin Ca^{+2} iyon içerikleri EDTA analizi ile saptanmıştır. OH^- iyon göçü mesafesini belirlemek için ise bir asit baz indikatörü olan fenofalein kullanılmıştır. 2 aylık kür süresi sonunda hem Ca^{+2} hem OH^- iyon göçü mesafesinin zeminlerdeki bentonit oranı arttıkça azaldığı görülmüştür (Şekil 2). Araştırmacılar Ca^{+2} iyon göçü mesafesinin şişen kil oranının artmasıyla azalmasının sebebinin katyon değişimi reaksiyonları olabileceğini belirtmişlerdir. Killi bir zemine kireç eklendiği zaman öncelikle katyon değişimi reaksiyonları gerçekleşir ve kireç içerisindeki Ca^{+2} iyonları kilin içerisindeki Na^+ iyonları ile yer değiştirir. Bu iyon değişimi reaksiyonları Ca^{+2} iyonunun zemin içerisindeki göçünü yavaşlatabilir. OH^- iyon göçü mesafesinin şişen kil oranının artmasıyla azalmasının sebebinin ise OH^- iyonlarının alümina silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesi

olduğunu ifade etmişlerdir. Montmorillonit kil minerali oldukça büyük bir yüzey alanına sahiptir. Dolayısıyla, %100 bentonit içeren zemin numunesinde OH^- iyonunun kil mineralleriyle olan etkileşimi artmakta ve bu durum iyonun hareketini kısıtlamaktadır. %0 bentonit içeren zemin numunesine doğru hem montmorillonit miktarı hem de kil mineral içeriği azalmaktadır. Dolayısıyla OH^- iyonunun hareketi daha kolay olmakta ve iyon daha büyük mesafelere kadar göç edebilmektedir. OH^- ve Ca^{+2} iyonlarının göçleri kıyaslandığında ise Ca^{+2} iyonunun OH^- iyonuna göre daha büyük mesafelere kadar göç ettiği gözlenmiştir. Bu durumun ise yine OH^- iyonunun silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. OH^- iyonunun göçü bütün kil mineral içeriğiyle kısıtlanmakta iken Ca^{+2} iyonunun göçü Na-montmorillonit içeriği ile kısıtlanmaktadır. Dolayısıyla Ca^{+2} iyonu OH^- iyonuna göre daha büyük mesafelere kadar göç edebilmektedir.

Konu ile ilgili yapılan önceki çalışmalardan görüleceği üzere kireç kolonu uygulamalarında oluşan iyon göçü kısa mesafelerle sınırlıdır. Bunun başlıca nedeni zeminin heterojen bir ortam olması ve iyon göçünün pek çok faktörün etkisi altında bulunmasıdır. Kireçteki iyonların zemin içerisine göç etmesini etkileyen bu faktörlerden bazıları bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

Kireç Kolonu Uygulamalarında İyon Göçünü Etkileyen Faktörler

Kireçteki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesini etkileyen pek çok faktör söz konusudur. Bu faktörler zeminin su içeriği, gözenekliliği, geçirimsizliği, zemin içerisindeki kayma düzlemleri, kil mineralojisi, osmotik basınç, zeminin emme kuvveti, kür zamanı, kür sıcaklığı olarak sayılabilir (Mitchell ve Hooper, 1961; Rogers ve Glendinning, 1994).



Şekil 2. Ca^{+2} ve OH^- iyon göçü mesafeleri ile zemin içerisindeki bentonit oranı arasındaki ilişki (Toksöz ve Yılmaz, 2020' den değiştirilmiş).

Figure 2. The relationship between the Ca^{+2} and OH^- ion migration distances and the bentonite ratio in the soil (modified from Toksöz and Yılmaz, 2020).

Zeminin su içeriği

Bazı araştırmacılar zeminin su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığını savunurken (Ruenkrairergsa ve Pimsarn, 1982; Lutenege ve Dickson, 1984; Shanker vd., 1989; Rogers ve Glendinning, 1996) diğer araştırmacılar su içeriğindeki artışın iyon göçü üzerinde bir etkisi olmadığını savunmuşlardır (Katti ve Gupta, 1970;

Fosh ve Kinter, 1972). Katti ve Gupta (1970), yaptıkları çalışmada iyon göçünün düşük su içerikleri ve yüksek yoğunluklar ile sağlandığını ve kapileritenin göçü kontrol eden faktör olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak Rogers ve Glendinning (1996), yaptıkları deneylerde su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığını bulmuşlardır (Şekil 3). Pek çok araştırmacı zemin

içerisinde gözlenebilir bir su hareketi olmasa bile suyun varlığını iyon göçü için gerekli görmüştür (Barker vd., 2007). Zeminin su içeriğinin iyon göçü üzerindeki etkisi hakkında literatürde kesin bir görüş birliği olmamasına rağmen gözlemlerin çoğu su içeriğindeki artışın iyon göçünü arttırdığı ve bu yüzden kireç kolonlarının yağmurlu mevsimlerden önce inşa edilmesi gerektiği yönündedir.

Hidrolik gradyan

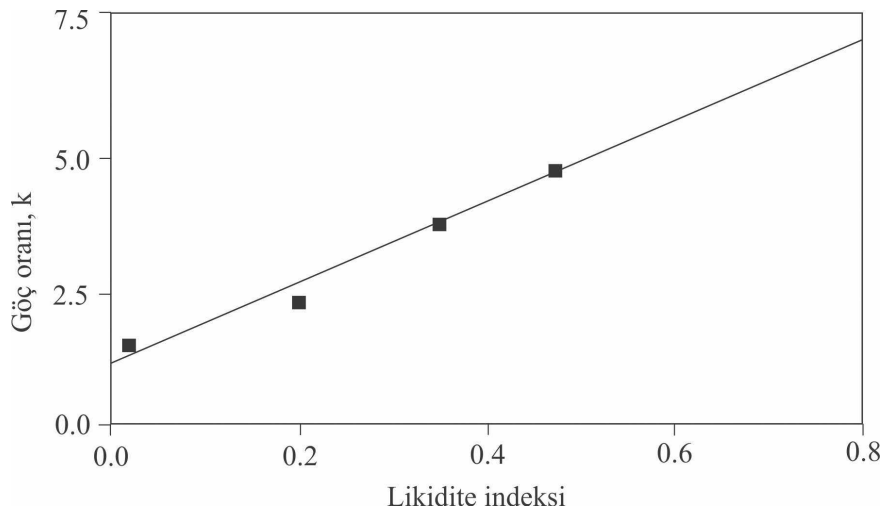
Hidrolik gradyan ve iyon göçü arasındaki ilişkiyi araştıran çok az çalışma mevcuttur. Farklı arazi gözlemlerinden iyon göçünün yeraltı suyu tablasının altındaki seviyelerde arttığı anlaşılmaktadır (Handy ve Williams, 1967). Ancak bu durumun yer altı suyunun hareketinden mi yoksa zeminin doygun olmasından mı kaynaklandığı hakkında kesin bir sonuca varılamamıştır.

Lutenegger ve Dickson (1984) tarafından kireç kolonu tekniği ile ilgili yapılan bir

derlemede Ca^{+2} iyonlarının göçünün zeminde suyun varlığı ile sağlandığı vurgulanmıştır. Araştırmacılar Katti ve Gupta (1970)'nin en büyük iyon göçünün suyun akış yönünde olduğunu gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Dolayısıyla kireçteki iyonların tercihen suyun akış yönünde göç ettikleri oldukça olasıdır.

Geçirimsizlik

Brandl (1981), kireç kolonu uygulaması için en uygun zeminlerin gevşek paketlenmiş ve düşük plastisiteli zeminler olduğunu ve bunun nedeninin bu zeminlerin yüksek geçirimsizliğe sahip olduklarından kaynaklandığını vurgulamıştır. Araştırmacı yüksek geçirimsizliğin kirecin daha fazla difüzyonunu engelleyen çabuk çimentolaşma reaksiyonlarının önüne geçtiğini belirtmiştir. Ayrıca, zeminin geçirimsizliği hidrolik iletkenliği arttıracığından iyon göçünü de arttıracaktır (Rogers ve Glendinning, 1996).



Şekil 3. Su içeriği (likidite indeksi) ve göç oranı arasındaki ilişki (Rogers ve Glendinning, 1996'dan değiştirilmiş).

Figure 3. Relationship between water content (liquidity index) and migration rate (modified from Rogers ve Glendinning, 1996).

Gözeneklilik ve kayma düzlemleri

Rogers ve Glendinning (1996), farklı kil türleri üzerinde yapmış olduğu çalışmada yüksek gözenekliliğe sahip olan zemin türünde daha fazla iyon göçü mesafeleri saptamışlardır. Bunun nedeninin artan gözenekliliğe bağlı olarak su içeriğindeki artış olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, iyon göçünün tercihen zemin içerisindeki en az dayanımlı yollar, diğer bir deyişle kayma düzlemleri boyunca olacağını vurgulamışlardır. Bunun nedeni yine kayma düzlemlerinin geçirimsizliği arttırmasıdır.

Mineraloji

Killi zeminler geniş bir mineralojik bileşim aralığına sahiptirler. Bu zeminler farklı oranlarda kil türleri içerebilirler. Bu kil mineralleri başlıca kaolinit, illit, karışık katmanlı killer ve montmorillonittir. Kil olmayan minerallerden ise kuvars, kalsit ve organik madde içerebilirler. Belirli kil minerallerinin küçük bir miktarı killi bir zeminin fiziksel özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir (Bell, 1996).

Kireç stabilizasyonu ile ilgili bugüne kadar yapılan araştırmalara göre zeminin mineralojisi kireç-kil-su reaksiyonunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Fosh ve Kinter (1972) montmorillonit kil mineralinin baskın olarak bulunduğu killi balçık (killi kum) bir zemindeki kalsiyum iyonu göç mesafesinin kaolin kil mineralinin baskın olduğu killi bir zemindekinden daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeninin killi balçık zeminin daha büyük partikül boyutlarına sahip olduğundan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Ancak 80 günden az bir kür süresinde kireç kolonundan itibaren 8-14 mm'lik bir bölgede kaolinitik kilin daha yüksek seviyede kalsiyum içeriğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ise kesin olmadığını belirtmişlerdir.

Lutenegger ve Dickson (1984) zeminin mineralojisinin hem iyileştirme reaksiyonlarının gerçekleşmesinde hem de iyonların difüzyon oranında etkili olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar sadece montmorillonit zeminlerin kireç kolonu tekniğiyle iyileştirmek için uygun olduklarını savunmuşlardır. Ancak diğer zeminlerin kireç kolonuyla iyileştirilemeyeceğini gösteren bir delil sunmamışlardır.

Diamond ve Kinter (1966), montmorillonit ve kaolinit kil minerallerinin Ca(OH)_2 adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Adsorpsiyonun kilin dış yüzeyleriyle sınırlı olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar elde ettikleri verilerden yaptıkları gözlemden montmorillonitin tüm dış yüzeyinin Ca(OH)_2 ile kaplandığını kaolinitin ise sadece yarısının Ca(OH)_2 ile diğer yarısının su ile kaplandığı sonucunu çıkarmışlardır. Bunun nedeninin iki kil mineralinin düzlemsel yüzeylerinin bileşimindeki farklılık olabileceği vurgulanmıştır. Montmorillonitin düzlemsel yüzeyleri silika tabakasına bağlı oksijenlerden oluşur. Kaolinitin ise sadece yarısı bu tiptir, diğer yarısı alümina tabakasına bağlı hidroksil iyonlarından oluşur. Şekil 4'te montmorillonit ve kaolinit killeri gözlenen adsorpsiyon eğrileri sunulmuştur.

Kür zamanı ve kür sıcaklığı

Barker vd. (2007) iyon göçünün başlangıç su içeriğine, kür zamanına, zemin mineralojisine ve kimyasal, elektriksel, hidrolik ve termal gradyanların varlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kireç içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesi zaman içerisinde gerçekleşir. İyonların zemin içerisinde belli bir mesafe boyunca göç etmeleri için gerekli zaman tahmin edilebilseydi en uygun

kür süresine karar verilebilirdi. Davidson vd. (1965) tarafından önerilen eşitliğe göre difüzyon mesafesi zamanın karaköküyle orantılıdır.

$$L = k.t^{0.5} \quad (3)$$

Burada;

L = difüzyon mesafesi,

t = zaman,

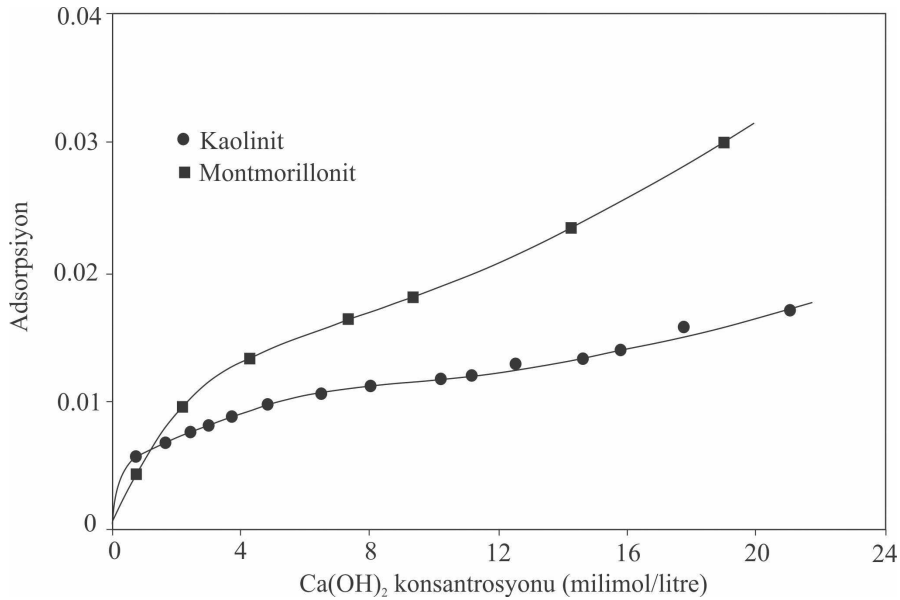
k = kil türüne bağlı katsayı (kil içeriği, kil mineralojisi, yoğunluk, adsorbe edilen kanyonlar ve sıcaklığın bir fonksiyonudur).

Davidson vd. (1965) bu eşitliğin kil-kireç reaksiyon oranının kireç göçü oranından büyük olduğu durumlarda geçerli olduğunu ve bu yüzden su hareketinin çok fazla olduğu durumlarda uygulanmaması gerektiğini belirtmişlerdir.

Zemin içerisindeki iyonların göçünü etkileyen faktörlerden biri de sıcaklıktır. Sıcaklık iyon göçünü sağlayan elektriksel, hidrolik ve

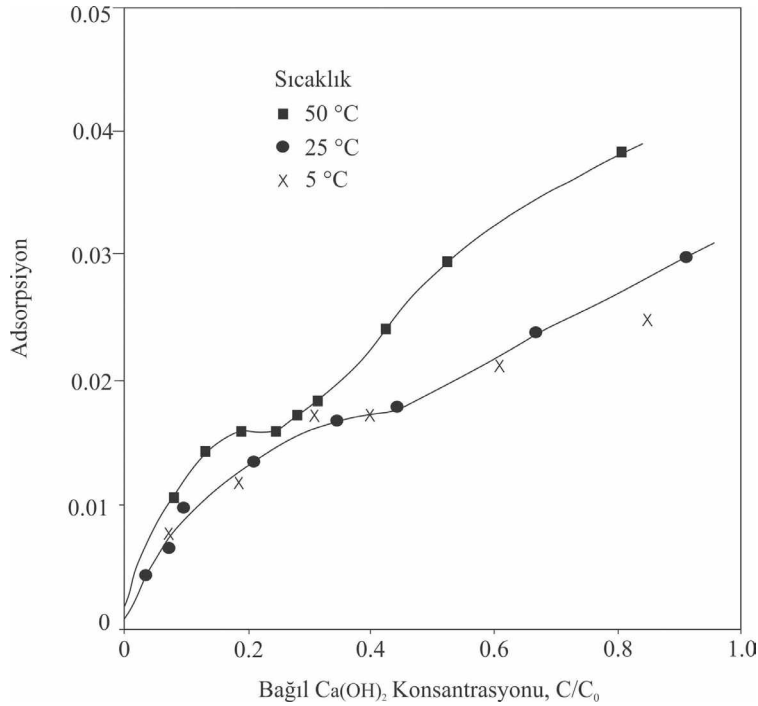
termal gradyanların varlığına sebep olan etmenler arasındadır (Barker vd., 2007). Sıcaklığın artması ile birlikte iyonların kinetik enerjisi artmakta ve difüzyon hızlanmaktadır.

Diamond ve Kinter (1966), sıcaklığın montmorillonitin Ca(OH)_2 'i adsorblaması üzerindeki etkisini araştırmak için 5 °C, 25 °C ve 50 °C sıcaklıklardaki adsorpsiyon oranlarını karşılaştırmışlardır. Deney sonucunda, 5 °C ve 25 °C sıcaklıklardaki Ca(OH)_2 adsorpsiyonunun yaklaşık eşit oranlarda olduğu gözlenirken sıcaklığın 50 °C'ye çıkması ile adsorpsiyon oranının önemli bir şekilde arttığı görülmüştür (Şekil 5). Yazarlar, bunun sebebini Ca(OH)_2 'in çözünabilirliğinin sıcaklıkla birlikte artmasına bağlamışlardır. Ayrıca, Ca(OH)_2 adsorpsiyonunun yaklaşık oda sıcaklığında fiziksel olabileceği, ancak daha yüksek sıcaklıklarda kemisorpsiyonun etkin olabileceği belirtilmiştir.



Şekil 4. 25 °C sıcaklıkta montmorillonit ve kaolinit killlerinde gözlenen Ca(OH)_2 adsorpsiyon eğrileri (Diamond ve Kinter 1966' den değiştirilmiş).

Figure 4. The Ca(OH)_2 adsorption curves observed in montmorillonite and kaolinite clays at 25 °C (modified from Diamond and Kinter, 1996).



Şekil 5. 5 °, 25 ° ve 50 °C sıcaklıklarda montmorillonit kilinde gözlenen Ca(OH)_2 adsorpsiyon eğrileri, (Diamond ve Kinter, 1966' dan değiştirilmiştir).

Figure 5. The Ca(OH)_2 adsorption curves observed in montmorillonite and kaolinite clays at 5°, 25° and 50 °C (modified from Diamond and Kinter, 1966).

SONUÇLAR

Şişen zeminlerin kireç kolonu tekniği ile iyileştirilmesi ile ilgili olarak ulusal ve uluslararası literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kireç kolonu tekniğinin iyileştirme mekanizmasının kireçteki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesiyle oluşan fizikokimyasal reaksiyonlara dayandığı belirtilmiştir. Ancak oluşan bu iyon göçünün mekanizmasından çok az sayıda çalışmada bahsedilmiştir. Söz konusu çalışmalar ise çoğunlukla uluslararası literatürde olup ulusal literatürde konu ile ilgili bir çalışma neredeyse yok gibidir. Dolayısıyla mevcut çalışma ulusal literatürdeki bu eksikliği gidermek ve kireç kolonu uygulamalarında iyon göçü

mekanizmasının daha iyi anlaşılması amacıyla hazırlanmıştır.

Konu ile ilgili çalışmalar göstermektedir ki zeminlerde oluşan iyon göçü sıvı bir çözeltide oluşan iyon göçünden çok daha karmaşıktır. Bunun nedeni zemin içerisindeki göç yollarının lineer olmayışı, zeminin heterojen bir yapıya sahip olması ve iyon göçünü etkileyen pek çok faktörün bulunmasıdır. Dolayısıyla literatürde iyon göçünü açıklayan tek ve kesin bir mekanizma bulunmamaktadır. Ancak yapılan çalışmalardan yola çıkılarak kireç içerisindeki iyonların zemin içerisine olan göçünün genel olarak iyon difüzyonu ve su akışına bağlı kütle iletiminin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir.

Yine yapılan çalışmalar göstermektedir ki Ca^{+2} iyonu OH^- iyonuna göre daha hızlı ve geniş mesafelere kadar göç edebilmektedir. Araştırmacılar bunun nedeninin OH^- iyonlarının alümina silikatların yüzeyiyle olan yüksek reaktivitesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Zeminin su içeriği, gözenekliliği, geçirirliiliği, zemin içerisindeki kayma düzlemleri, kil mineralojisi, osmotik basınç, zeminin emme kuvveti, kür zamanı ve sıcaklığı kireçteki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine göç etmesini etkileyen faktörler arasındadır. Kireç kolonu uygulamalarının söz konusu faktörler dikkate alınarak yapılması kolon performansı açısından önemlidir.

Kireç kolonu uygulamalarında iyon göçü mekanizmasının anlaşılması laboratuvar ve arazi uygulamalarının daha sağlıklı bir şekilde yapılmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca iyon göçü mesafelerinin ön laboratuvar çalışmalarında saptanması daha sonra oluşturulacak büyük ölçekli modellerde kolonlar arası bırakılacak mesafeye karar vermede ya da kür süresin belirlenmesinde yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adar, E., 2013. Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Alternatif Taban Sistemlerinden Sızıntı Suyu Kirlenmelerinin Geçişinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Barker, J.E., Rogers, C.D.F., Boardman, D.I., 2006. Physio-chemical changes in clay caused by ion migration from lime piles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18, 182–189.
- Barker, J.E., Rogers, C.D.F., Boardman, D.I., 2007. Ion Migration Associated with Lime Piles: A Review. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 11(2):87-98.
- Beetham, P., Dijkstra, T.A., Dixon, N., 2014. Lime Diffusion and Implications for Lime Stabilization Practice. *Compendium of papers from the Transportation Research Board 93rd annual meeting*, Washington DC. TRB, USA.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Brandl, H., 1981. Stabilization of slippage-prone slopes by lime piles. *Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, USSR, pp 300-301.
- Davidson, L.K., Demeril, T., Handy, R.L., 1965. Soil pulverization and lime migration in soil lime stabilization. *Highways Research Board Record*, 92, 103-126.
- Diamond, S., Kinter, E.B., 1966. Adsorption of calcium hydroxide by montmorillonite and kaolinite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 22(3), 240-249.
- Edil, T.B., 2003. A review of aqueous-phase VOC transport in modern landfill liners. *Waste Management*, 23, 561-571.
- Fohs, D.G., Kinter, C.B., 1972. Migration of lime in compacted soil. *Public Roads*, 37 (1), 1-8.
- Handy, R.L., Williams, N.W., 1967. Chemical stabilization of an active landslide. *Civil Engineering*, 37 (8), 62-65.
- Jungnickel C, Smith D., Fityus S., 2004. Coupled multi-ion electrodiffusion analysis for clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2), 287-298.
- Katti, R. K., Gupta, A. K., 1970. Studies on the diffusion of lime in expansive soil. *Proceedings 2nd S E Asian Conference on Soil Engineering*, 611–619.
- Lutenegger, A.J., Dickson, J.R., 1984. Experiences with drilled lime stabilisation in the mid-west USA. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Landslides*, 289-293.
- Mitchell, J.K., Hooper, D.R., 1961. Influence of time between mixing and compaction on properties of lime stabilized expansive clay. *Highway Research Board Bulletin*, 304, 14–31.

- Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. Fundamentals of Soil Behavior. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Hoboken, 592 pages.
- Noble, D.F., Anday, M.C., 1967. Migration of lime deposited in drill holes. Virginia Highway Research Council Publication.
- Rogers, C.D.F., Glendining, S., 1994. Deep Slope Stabilisation Using Lime. Transportation Research Record 1440, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA, p.63-70.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1996. The role of lime migration in lime pile stabilisation of slopes. Quarterly Journal of Engineering Geology, 29 (4), 276-284.
- Ruenkrairergsa, T., Pimsarn, T., 1982. Deep hole lime stabilisation for unstable clay shale embankment. Proceedings of the 7th SE Asia Geotechnics Conference, Hong Kong, 22-26th November, 1982, p.631-645.
- Shanker, N., Babu N., Maruti, G., 1989. Use of lime soil piles for in-situ stabilisation of Black Cotton soils. Indian Geotechnical Conference, Visakhapatnam, 1, 149-153.
- Snethen, D.R., 1979. Technical Guidelines for Expansive Soils in Highway Subgrades. Department of Transportation, U.S.A., Final Report No. FHWA-RD-79-51.
- Öztaş, T., 1997. Topraklarda Difüzyon ve Dispersiyon Arasındaki İlişki. Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Dergisi, 28 (1), 153-160.
- Toksoz, D., Yılmaz, I., 2020. Influence of swelling clay content on ion migration and column performance in lime column treated soils. Geotechnical and Geological Engineering, 38(1), 813-832.

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ ve KAPSAM:

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, yerbilimlerinin uygulamaya yönelik alanlarında ulusal ve uluslararası araştırmaların/çalışmaların yayımlandığı bir dergidir. Bu kapsamda;

- İnsanların yaşamını etkileyen jeolojik süreçler ile mühendislik yapıları ve bunlara ilişkin sorunlar ve çözümler
- Jeolojik kaynakların yönetimi ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi
- Doğal afetler ve etkilerinin incelenmesi
- Doğal ve yapay kirleticiler ve ekosisteme etkileri
- Hidrojeolojik sorunlar ve çözümlere yönelik yaklaşımları
- Uygulamalı jeofizik çalışmaları ile etkilerin ortaya çıkarılması
- Mühendislik jeolojisi, zemin ve/veya kaya mekaniği prensiplerinin uygulandığı araştırma ve çözümleri
- Jeolojik anıtların korunması
- Madencilik uygulamaları, sorunları ve çözümleri
- Jeolojik sorunların çözümüne katkıda bulunan arazi ve laboratuvar yöntemlerinin ve tekniklerinin geliştirilmesi

ile ilgili kuramsal ve uygulamalı çalışmaları kapsayan çalışmalar dergide yayımlanır. Yayınlar; araştırma makalesi, teknik not, eleştirel inceleme, araştırma notu ve görüş-yorum ve yanıtlardan oluşabilir.

Akademisyenlerin, endüstri, sanayi ve proje uygulayıcıları ile yer bilimleri ve mühendisliği konusunda karar vericilere yönelik bir dergi olan Jeoloji Mühendisliği Dergisi, hakemli bir dergidir. Çalışmaya konu olan sorunun, kullanılan teknik ne olursa olsun, bilimsel yöntemlerle ele alınması ve jeolojinin uygulama alanlarına ilişkin olması aranan temel nitelikler arasındadır.

En az 2 hakemin değerlendirmesi sonucu kabul edilen yayınlar dergide basılır. Çalışmanın daha önce yayımlanmamış olması gerekmektedir.

YAZIM KURALLARI

Yazıların Hazırlanması

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nin yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir. Makale başlığı, öz, anahtar kelimeler, şekil ve çizelge başlıkları Türkçe ve İngilizce verilmelidir. Yazarların ana dillerinin Türkçe olmaması durumunda, yazıların başlığı ve özeti ile çizelge ve şekillerin başlıkları Editörlükçe Türkçe'ye çevrilir. Ana dili İngilizce olmayan yazarlara, yazılarını Editörlüğe göndermeden önce, gramer ve üslup açısından, ana dili İngilizce olan bir kişiden katkı almaları özellikle önerilir. Hazırlanan makaleler orijinal ve daha önce basılmamış araştırma, yorum ya da her ikisine ait sentezi içermeli, veya teknik not niteliğinde olmalıdır.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde beş tür yazı yayımlanmaktadır:

1. ELEŞTİREL İNCELEME: Editörün daveti üzerine veya bilgisi dahilinde hazırlanan, Jeoloji Mühendisliği'nin herhangi bir alanında halen kullanılmakta olan teknik, yöntem ve yaklaşımları günümüz teknolojik gelişmeleri ve

kendi deneyimleri ışığında inceleyen, bu açıdan öneriler geliştiren yazıdır. Yazı uzunluğu konuya bağlı olarak değişebilir. Yayın Kurulu incelemesi zorunluluğu yoktur.

2. ARAŞTIRMAMAKALESİ: Özgün bir çalışmanın sunulduğu yazıdır. Kuramsal temel, yeterli miktar ve nitelikte veriye dayalı bulgu ve sonuçların ayrıntılarıyla değerlendirildiği bölümleri içermelidir. Yazının toplam uzunluğu 6000 sözcük eşdeğerini (10 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
3. TEKNİK NOT: Herhangi bir süreci veya tekniği, kuramsal temel, yeterli veri ve ayrıntılı değerlendirmeye dayanmadan sunan ve amacı, bu süreci veya teknikleri kullanabilecek yerbilimcilere duyurmak olan özgün yazıdır. Yazının uzunluğu 5000 sözcük eşdeğerini (5 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
4. ARAŞTIRMA NOTU: Henüz tamamlanmamış, eksik veri ve bulgularla yüzeysel değerlendirmelere dayalı, kendi içinde tutarlı, özgün, deneysel, uygulamalı veya kuramsal araştırmaların önsonuçlarının veya bulgularının sunulduğu yazıdır. Amaç, okuyucuya güncel bir konuya ilişkin bir çalışmanın ön bulgu ve sonuçlarını duyurarak konu üzerinde tartışma ortamı yaratmak, konunun gelişmesine diğer araştırmacıların katkılarını sağlamaktır. Yazı uzunluğu 5000 sözcük eşdeğerini (5 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
5. GÖRÜŞ-YORUM VE YANITLAR: Dergide yayımlanan yazılar hakkında her türlü görüş, yorum ve bunlara ilişkin yanıtları içerir. Editörün uygun gördüğü uzunlukta yayımlanır.

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ, YAYINA KABUL İLKELERİ VE ETİK BİLDİRİMİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ Editörlüğü'ne (topal@metu.edu.tr) 2 satır aralığında 12 punto harflerle yazılmış ve 1 nüsha halinde *.doc veya *.docx formatında hazırlanarak e-posta ile gönderilen yazılar, öncelikle içerik, sunum, yayım kuralları, vd. yönlerden Editörlük tarafından incelenir ve daha sonra değerlendirilmek üzere en az iki Yayın Kurulu üyesine ve/veya Kurul dışından seçilecek uzmanlara gönderilir. Yayın Kurulu üyelerinden gelecek görüşler doğrultusunda yazının doğrudan kabulüne, küçük veya önemli düzeltmelerden sonra kabulüne veya reddine Editörce karar verilir ve sonuç yazarlara e-posta ile bildirilir.

Yayın Kurulu üyelerinin birbiriyle çelişen görüş bildirmeleri durumunda, Editör'ün bir karara varabilmesi için yazı, üçüncü bir Yayın Kurulu üyesine veya yazı konusundaki uzmana gönderilir. Yayın Kurulu üyeleri gerekli görürlerse yazıları düzeltilmiş haliyle tekrar görüş değerlendirebilirler.

Yazarlar, Yayın Kurulu üyelerinin ve Editör'ün yaptığı eleştiri, öneri ve düzeltmeler arasında katılmadıkları hususlar olduğunda bunları ayrı bir sayfada gerekçeleriyle birlikte açıklamalıdır.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi, yazarlardan sayfa ücreti talep etmemektedir. Dergiye sunulan makaleler, daha önce yayınlanmadığı ve başka yerde yayınlanmak üzere gönderilmediği varsayılarak değerlendirme için kabul edilir. Yazarlar, makalenin ana içeriğinin daha önce yayınlanmadığını ve başka bir dergide yayınlanmak üzere gönderilmediğini onaylamalıdır. www.jmo.org.tr adresinde bulunan telif hakkı devir formu, tüm yazarlar adına ilgili yazar tarafından imzalanmalı ve makale dosyalarıyla birlikte gönderilmelidir. Bir makale sunulduktan sonra, başka yazar eklenmesi veya çıkarılması veya yazarların değiştirilmesi mümkün değildir. Ancak, hakem sürecinde makale içeriğinde yapılan çok önemli değişiklikler dolayısıyla Editörle iletişime geçilerek yazar değişikliği yapılabilir.

Makaleler, yazım kurallarına uymuyorsa ya da dergi kapsamı dışındaysa, dergi editörü tarafından hakem değerlendirmesi yapılmaksızın reddedilebilir. Bir makale yayın için kabul edildikten sonra, diğer bir deyişle, hakem tarafından önerilen düzeltmeler tamamlandıktan ve editör tarafından kabul edildikten sonra, yazara makalede değişiklik yapma izni verilmez. Makale yayınlanmadan önce, yazarlara düzeltmeler için Teknik Editör tarafından prova baskı gönderilir. Başkasının fikir veya sözcüklerinin orijinal biçiminde kullanılması veya uygun bir atıf yapılmaksızın değiştirilmesi, intihal olarak kabul edilir ve tolere edilemez.

YAZILAR

Yazılar aşağıda verilen düzen çerçevesinde hazırlanmalıdır:

- (a) Başlık (Türkçe ve İngilizce)
- (b) Yazar Adları (kısıtlanmadan, koyu ve baş harfleri büyük harfle) ve adresleri (italik ve küçük harfle) ile başvurulacak yazarın e-posta adresi. Yazarların ORCID ID bilgileri
- (c) Öz (Türkçe ve İngilizce)
- (d) Anahtar Kelimeler (Türkçe ve İngilizce)
- (e) Giriş (amaç, kapsam ve yöntem)
- (f) Ana metin (kullanılan yöntemler, çalışılan malzemeler, tanımlamalar, analizler vd.)
- (g) Tartışma,
- (h) Sonuçlar ve Öneriler
- (i) Katkı Belirtme
- (j) Kaynaklar
- (k) Çizelgeler Dizini (Çizelge başlığı Türkçe ve İngilizce)
- (l) Çizelgeler
- (m) Şekiller Dizini (Şekil başlığı Türkçe ve İngilizce)
- (n) Şekiller

Metinde kullanılan değişik türde başlıklar farklı şekillerde ve tüm başlıklar sayfanın sol kenarında verilmelidir. Ana başlıklar büyük harflerle ve koyu yazılmalıdır. İkinci derece başlıklar alt başlık olarak değerlendirilmeli ve birinci ve ikinci derece alt başlıklar küçük harfle (birinci derece alt başlıklarda her kelimenin ilk harfi büyük) ve koyu, üçüncü derece alt başlıklar ise italik olmalıdır. Başlıkların önüne numara veya harf konulmamalıdır. Yazılar (öz, metin, katkı belirtme, kaynaklar, ekler ve şekiller dizini) A4 (29.7 cm X21 cm) boyutundaki sayfaların bir yüzüne, kenarlardan en

az 2.5 cm boşluk bırakılarak, 2 satır aralıkla ve 12 puntoyla yazılmalı, ayrıca tüm sayfalara numara verilmelidir.

Makale başlıkları, aşağıdaki gibi olmalıdır:

ÖZ

ABSTRACT

GİRİŞ

ANA BAŞLIK

Birinci Derece Alt Başlık

İkinci derece alt başlık

Üçüncü derece alt başlık

TARTIŞMA

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KATKI BELİRTME

KAYNAKLAR

Başlık ve Yazarlar

Yazının başlığı, 12 kelimeyi geçmeyecek şekilde çalışmanın içeriğini anlaşılır şekilde yansıtmalıdır. Eğer yazı Türkçe hazırlanmışsa, Türkçe başlığı (koyu ve kelimelerin ilk harfleri büyük harf olacak şekilde) İngilizce başlık (italik ve kelimelerin ilk harfleri büyük olacak şekilde) izlemelidir. İngilizce hazırlanmış yazılarda ise, İngilizce başlık Türkçe başlıktan önce ve yukarıda belirtilen yazım kurallarına göre verilmelidir. Makaledeki yazarlar orcid.org web adresinden edinecekleri ORCID kimliklerini makale ile birlikte sunmalıdır.

Yazarlara ilişkin bilgi ise aşağıdaki örneklere uygun olarak verilmelidir.

İsmail Dinçer *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir*

İbrahim A. Al-Akhaly *Sana'a University, Faculty of Petroleum and Natural Resources, Sana'a, Yemen*

İlgili yazarın e-posta adresi de verilmelidir.

ÖZ

Çalışma hakkında bilgi verici bir içerikle (çalışmanın amacı, elde edilen başlıca sonuçlar) en kısa öz olarak ve 200-300 kelimeyi aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır. Özde kaynaklara atıfta bulunulmamalıdır. Özler hem Türkçe, hem İngilizce olarak verilmelidir. Türkçe hazırlanmış yazılarda Özden sonra "Abstract" (İtalik) yer almalı, İngilizce yazılarda ise italik yazılmış Türkçe Öz Abstract'ı izlemelidir.

Anahtar Kelimeler

Öz ve Abstract'ın altında en az 4 en çok 7 kelimededen oluşan ve yazının konusunu yansıtan anahtar kelimeler Türkçe ve İngilizce olarak verilmelidir. Anahtar kelimeler, alfabetik sırayla küçük harfle (ilk anahtar kelimenin ilk harfi büyük) yazılmalı ve aralarına virgül konmalıdır. Teknik Not ve Tartışma türü yazılarda anahtar kelimelerin verilmesine gerek yoktur.

Katkı Belirtme (gerekliyse)

Katkı belirtme, kısa olmalı ve teşekkür edilecek olanlar çalışmaya en önemli katkıyı sağlayan kişilerin ve/veya kuruluşların

adlarıyla sınırlandırılmalıdır. Teşekkür edilecek kişilerin açık adları unvanları belirtilmeksizin verilmeli, ayrıca bu kişilerin görevli oldukları kurum ve kuruluşların adları da eklenmelidir.

Kullanılacak Birimler ve Ondalık Bölümlerin Ayrılması

Makalede, metrik sistem veya SI birimleri (kPa, kN/m³ vb.) kullanılmalıdır. Gerek metin içinde ve çizelgelerde, gerekse şekillerde rakamların ondalık bölümlerinin ayrılması için nokta kullanılmalıdır (3.1 gibi).

Kaynaklar

Aşağıdaki örnekler ile kesinlikle uyumlu olmalıdır.

- Metin içinde kaynaklara değinme yapılırken aşağıdaki örneklerde olduğu gibi, bibliyografya araştırmacı soyadı ve tarih sırasıyla verilmelidir.
....Ford (1986) tarafından
....bazı araştırmacılar (Williams, 1987; Gunn, 1990; Saraç ve Tarcan, 1995)
- Birden fazla sayıda yazarlı yayınlara metni içinde değinilirken ilk soyadı belirtilmeli, diğer yazarları için vd. ibaresi kullanılmalıdır.
....Doyuran vd. (1995)....
....(Smart vd., 1971)....
- Ulaşılamayan bir yayına metin içinde değinme yapılırken bu kaynakla birlikte alıntının yapıldığı kaynak da aşağıdaki şekilde belirtilmelidir. Ancak Kaynaklar Dizininde sadece alıntının yapıldığı kaynak belirtilmelidir.
....Dreybrodt (1981; Schuster and White, 1971)....
- Kişisel görüşmelere metin içinde soyadı ve tarih belirtilerek değinilmeli, ayrıca «Kaynaklar» bölümünde de yer verilmelidir. (Soyadı, Adı, Tarih. Kişisel görüşme. Görüşülen kişinin/kişilerin adres(ler)i)
- Kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, «Kaynaklar» bölümünde eksiksiz olarak belirtilmelidir.

Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen esas alınmalıdır:

Sürelî yayımlar:

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Makalenin Başlığı. Sürelî Yayımların Adı (kısaltılmamış), Cilt No. (Sayı No.), Sayfa No.]
Yarbaşı, N., Kalkan, E., 2009. Geotechnical mapping for alluvial fan deposits controlled by active faults: a case study in the Erzurum, NE Turkey. Environmental Geology, 58 (4), 701-714.

Bildiriler:

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Bildirinin Başlığı. Sempozyum veya Kongrenin Adı, Editörler, Basımevi, Cilt No. (birden fazla ciltten oluşuyorsa), Düzenlendiği Yerin Adı, Sayfa No.]
Altındağ, R., Şengün, N., Güney, A., Mutlutürk, M., Karagüzel, R., Onargan, T., 2006. The integrity loss of physicommechanical properties of building stones when subjected to recurrent cycles of freeze-thaw (F-T) process. Fracture and Failure of Natural Building Stones-Applications in the Restoration

of Ancient Monuments (Editors: Stavros and Kourkoulis), 363-372.

Kitaplar:

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Yayınevi, Basıldığı Şehrin Adı, Sayfa Sayısı.]
Palmer, C.M., 1996. Principles of Contaminant Hydrogeology (2nd Edition). Lewis Publishers, New York, 235 p.
Ketin, İ., Canitez, N., 1972. Yapısal Jeoloji. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, Sayı:869,520 s.

Raporlar ve Tezler:

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Raporun veya Tezin Başlığı. Kuruluşun veya Üniversitenin Adı, Arşiv No. (varsa), Sayfa Sayısı (yayımlanıp, yayımlanmadığı)]
Demirok, Y., 1978. Muğla-Yatağan linyit sahaları jeoloji ve rezerv ön raporu. MTA Derleme No:6234, 17 s (yayımlanmamış).
Akın, M., 2008. Eskipazar (Karabük) travertenlerinin bozunmasının araştırılması. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora Tezi, 263 s (yayımlanmamış).

İnternette İndirilen Bilgiler:

Kurumun adı, Tarih. Web adresi, web adresine girildiği tarih.
AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), 2021. <http://www.afad.gov.tr>, 4 Ocak 2021.
Türkçe kaynaklar doğrudan Türkçe olarak verilmeli ve Türkçe karakterlerle yazılmalıdır.
NOT: Tüm kaynaklarda ilk satırdan sonraki satırlar 0.7 cm içeriden başlanarak yazılmalıdır.

Eşitlikler ve Formüller

- Eşitlikler bilgisayarla yazılmalıdır. 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.
- Eşitliklerde kullanılabilecek alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (I_0 , x^2 gibi).
- Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
- Karekök işareti yerine parantezle birlikte üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{cmass} = \sigma_c^{0.5}$ gibi).
- Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine «/» simgesi kullanılmalıdır. Çarpma işareti olarak genellikle herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak zorunlu hallerde «*» işareti tercih edilmelidir ($y=5 * 10^{-3}$ gibi).
- Kimyasal formüllerde iyonların gösterilmesi amacıyla Ca⁺⁺ veya CO⁻ gibi ifadeler yerine Ca⁺² ve CO⁻² kullanılmalıdır.
- İzotop numaraları, «18O» şeklinde verilmelidir.

Çizelgeler:

- a) Yazarlar, derginin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa metinde kullanılabilecek orana daha küçük karakterlerle yazmalıdır. Bu amaçla çizelgeler tek sütuna (7.5 cm) veya çift sütuna (16 cm) yerleştirilebilecek şekilde hazırlanmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunlu olan büyük çizelgelerin en fazla (16 x 21) cm boyutlarında olması gerekir. Bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak çizelgeler kabul edilmez.
- b) Çizelgelerin hemen altında gerekli durumlarda açıklayıcı dip notlara veya kısaltmalara ilişkin açıklamalara yer verilmelidir.
- c) Çizelgelerin başlıkları, kısa ve öz olarak seçilmeli, hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalic harflerle) "Çizelgeler Dizini" başlığı altında ayrı bir sayfaya yazılmalıdır. İngilizce olarak hazırlanmış yazılarda önce İngilizce sonra Türkçe çizelge başlığı verilmelidir.
- d) Çizelgelerde kolonsal ayrımı gösteren düşey çizgiler yer almamalı, sadece çizelgenin üst ve alt sınırları ve gerek görülen diğer bölümleri için yatay çizgiler kullanılmalıdır.
- e) Her çizelge, sıralı olarak ayrı bir sayfada olmalı ve çizelge başlıkları çizelgenin üzerine yazılmalıdır.

Şekiller (Çizim ve Fotoğraf):

- a) Şekiller, uygun bir bilgisayar yazılımı kullanılarak hazırlanmalı, değerlendirmeyi kolaylaştıracak biçimde yüksek kalitede, metin sonunda verilmelidir. Ancak bu durum, elektronik dosya boyutunu fazla büyütmemelidir.
- b) Tüm çizim ve fotoğraflar şekil olarak değerlendirilip numaralandırılmalıdır. Şekil altı yazıları "Şekiller Dizini" başlığı altında hem Türkçe (normal karakterle ve ilk harfi büyük diğerleri küçük harflerle) hem de İngilizce (ilk harfi büyük diğerleri küçük İtalic harflerle) ayrı bir sayfada verilmelidir. Yazı İngilizce olarak hazırlanmışsa, şekil altı yazıları önce İngilizce sonra Türkçe verilmelidir.
- c) Her şekil, ayrı bir sayfada yer alacak biçimde sıraya dizilerek «Şekiller Dizini» sayfasıyla birlikte çizelgelerden sonra sunulmalıdır.
- d) Şekiller, ya tek sütuna (7.5 cm), ya da çift sütuna (en fazla 16 cm) yerleştirilebilecek boyutta hazırlanmalıdır. Tam sayfaya yerleştirilmesi zorunluluğu olan büyük şekillerin, şekil altı açıklamalarına da yer kalacak biçimde, en fazla (16 x 21 cm) boyutlarında olması gerekir. Belirtilen bu boyutlardan daha büyük ve katlanacak boyuttaki şekiller kabul edilmez.
- e) Harita, kesit ve planlarda sayısal ölçek yerine çubuk (bar) türü ölçek kullanılmalıdır.
- f) Şekiller yukarıda belirtilen boyutlarda hazırlanırken, şekil üzerindeki açıklamaların (karakterlerin) okunabilir boyutlarda olmasına özen gösterilmelidir.

- g) Fotoğraflar, şekiller için yukarıda belirtilen boyutlarda basılmış olmalıdır. Fotoğrafların üzerinde gösterilecek olan simgeler okunaklı olmalıdır. Özellikle koyu tonların egemen olduğu bölgelerde simgelerin beyaz renk ile gösterilmesi tavsiye edilir. Yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelerin kullanılmasına özen gösterilmelidir.

Ek Açıklamalar ve Dipnotlar:

- a) Ana metnin içine alındığında okuyucunun dikkatinin dağılmasına yol açabilecek, hatırlatma niteliğindeki bilgiler, yazının sonundaki «Ek Açıklamalar» başlığı altına konulabilir (İstatistik bilgilerin verilisinde, formüllerin çıkarımının gösterilmesinde, bilgisayar programlarının verilmesinde, vb. konularda bu yol izlenebilir).
- b) Dipnotlar, yerleştirme ve yazılma açısından güçlükler neden olduğundan, çok gerekli durumlar dışında kullanılmamalıdır. Eğer dipnot kullanılırsa, yıldız (*) işareti ile gösterilmeli ve mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Dipnotta eğer değinme yapılsa bibliyografik bilgiler dipnotta değil, «Kaynaklar»da verilmelidir.

YAZILARIN EDITÖRLÜĞE GÖNDERİLMESİ

Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nin "Yayın Amaçları ve Kuralları"nda belirtilen ilkelere uygun olarak elektronik ortamda hazırlanmış yazılar, e-posta ile topal@metu.edu.tr adresine gönderilmelidir.

Prova Baskı

Makalelerin prova baskıları, dizgi ve yazım hatalarının olup olmadığının kontrolü için ilgili yazara Teknik Editör tarafından gönderilir. Prova baskılarda yapılacak düzeltmeler yazım hataları ile sınırlı olup, yazarların makaleyi kabul edilmiş son halinden farklı duruma getirebilecek değişiklikler ve düzeltmeler yapması kabul edilmeyecektir. Prova baskılar, yazarlar tarafından alındıktan sonra en geç üç gün içinde Teknik Editöre gönderilmelidir. Gecikmeli olarak yapılacak düzeltmelerin baskıya verilmesi garanti edilemeyeceği için, yazarların prova baskıları göndermeden çok dikkatli şekilde kontrol etmeleri gerekmektedir.

AYRI BASKI

Makale dergi web sitesinden (www.jmd.jmo.org.tr) ücretsiz olarak pdf formunda indirilebildiği için, yazarlara ayrı baskı gönderilmeyecektir.

TELİF HAKLARI

Yazar veya (Başvurulacak Yazar (birden fazla yazarlı makalelerde), kendisi ve diğer yazarlar adına "Telif Hakkı Devir Formu"nu makalenin baskıya verilmesinden önce imzalamalıdır. Bu sözleşme, Jeoloji Mühendisleri Odası'na yazarlar adına telif hakkı alınmış yayınlarını koruma olanağı sağlamakla birlikte, yazarların makalenin sahibi olma haklarından vazgeçtiği anlamına gelmemektedir. Telif Hakkı Devir Formu, en kısa sürede Editör'e gönderilmelidir. Bu form Editör'e ulaştırılınca değin, makale yayına kabul edilmiş olsa bile, baskıya gönderilmez.