

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 43

Sayı - Number 1

ISSN 1016 - 9172

Haziran / June 2019



TMMOB JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey

EDİTÖR / EDITOR

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

Müge AKIN
Abdullah Gül Üniversitesi
Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü
Sümer Kampüs 38080
Kocasinan /KAYSERİ
E-posta : mugeakink@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 : Temmuz 2019
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

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

Jeoloji Mühendisliği Dergisi makale ve dizin özleri

SCOPUS, ULAKBİM, GeoREF, Geobase/Geo Abstracts, EBSCO ve Cabell
uluslararası indeksleri tarafından taranmaktadır.

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

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.

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 1- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Sinem ERİŞİŞ, Atiye TUĞRUL, Murat YILMAZ, Selman ER
Bazaltik Kayaçların Mineralojik ve Petrografik Özelliklerinin Akustik Emisyon Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması
Investigation of the Effects of Mineralogic and Petrographical Characteristics of Basaltic Rocks on Acoustic Emission
- 23- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Işık YILMAZ
Şişen Killerin İyileştirilmesinde Jips Kolonu Performansının Araştırılmasına İlişkin Laboratuvar Model Çalışması
A Laboratory Model Study Related with the Determination of Gypsum Column Performance in Treatment of Expansive Soils
- 39- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Müge K. AKIN
Düzce Kent Merkezi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi
Evaluation of Liquefaction Potential of Soils in Düzce City Center
- 57- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Saffet Deniz KARAGÖZ, Mehmet Yalçın KOCA
Determination of Engineering Geological Conditions of a Plant-Site: A Case Study in An Open Pit Mine in Çine, Aydın
Bir Tesis Alanının Mühendislik Jeolojisi Koşullarının Belirlenmesi: Örnek Çalışma, Çine, Aydın'da Yer Alan Bir Açık Ocak Feldspat Maden Sahası
- 99- **Derleme / Review Paper**
Nurkan KARAHANOĞLU
Jeotermal Rezervuarlarla İlgili Sayısal Modelleme/Benzeşim Çalışmaları
Numerical Modeling/Simulation Studies of the Geothermal Reservoirs
- 131- **Derleme / Review Paper**
Zübeyde HATİPOĞLU-BAĞCI, Louis H. MOTZ
Methods for Investigation of Natural Attenuation and Modeling of Petroleum Hydrocarbon Contamination in Coastal Aquifers
Kıyı Akiferlerinde Petrol Hidrokarbon Kirliliğinin Doğal Gideriminin Araştırılması ve Modellenmesi Yöntemleri



Araştırma Makalesi / Research Article

Bazaltik Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özelliklerinin Akustik Emisyon Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effects of Mineralogic and Petrographical Characteristics of Basaltic Rocks on Acoustic Emission

Sinem ERİŞİŞ , Atiye TUĞRUL , Murat YILMAZ* , Selman ER 

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar-İstanbul

Geliş (Received): 29 Haziran (June) 2018 / Düzeltme (Revised): 31 Ağustos (August) 2018 / Kabul (Accepted): 19 Eylül (September) 2018

ÖZ

Günümüzde yapılmakta olan mühendislik projeleriyle birlikte doğal kaynak ihtiyacı da giderek artmaktadır. İhtiyaçları karşılamak için, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek olması nedeniyle bazaltik kayalar tercih edilmektedir. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında ve gerektiğinde farklı sektörlerde de kullanılacak bazaltların çatlak başlangıçlarının, yenilme eşik değerlerinin ve yük altındaki davranışlarının yanı sıra, bunları etkileyen mineralojik ve petrografik özelliklerinin de bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada farklı mineralojik ve petrografik özelliklere sahip bazaltik kayaların mekanik davranışlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırmalar Marmara Bölgesi ve çevresindeki bazalt taş ocaklarından getirilmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mineralojik ve kimyasal bileşimleri belirlenen bazaltların, görüntü analizi yapılarak petrografik özellikleri sayısallaştırılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda mekanik değerleri bulunmuş ve akustik emisyon yöntemiyle çatlak başlangıcı ve yenilme eşik değeri yükleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları $0.33\sigma_c$ - $0.54\sigma_c$ ve yenilme eşik değeri katsayıları da $0.83\sigma_c$ - $0.98\sigma_c$ arasında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bazalt, Akustik emisyon, Mineraloji-petrografi

ABSTRACT

The necessity of natural resource gradually increases with engineering projects which are currently being carried out at the present time. For meeting the requirements, basaltic rocks are preferred due to their high strength and durability. In this context, it is important to know the mineralogical and petrographic characteristics of basalts, which used in engineering applications and when required different sectors, that affect their crack initiating, failure threshold and as well as the behavior under load. This study aimed to reveal the mechanical behavior of basaltic rocks which have different mineralogical and petrographic features. Research was carried out on samples that have been collected from the basalt quarries within Marmara Region and its surroundings. After mineralogical and chemical composition analysis, petrographic properties of basalts were digitized with the help of the image processing. At the end of the laboratory studies, mechanic properties were obtained and load values of crack initiation and failure threshold were determined with acoustic emission method. Obtained result show that load values of crack initiation value were found between $0.33\sigma_c$ and $0.54\sigma_c$ and the failure threshold value between $0.83\sigma_c$ and $0.98\sigma_c$.

Keywords: Basalt, Acoustic emission, Mineralogic - petrographic

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada yaygın şekilde bulunan bazaltik kayaçlar, dayanımları ve durabilitelerinin yüksek olmasından dolayı çokça tercih edilen bir malzeme çeşididir. Farklı türdeki bazaltların yük altındaki davranışlarının ve yenilme özelliklerinin bilinmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, doğal kaynakların doğru değerlendirilmesi ve sürdürülebilir olabilmesi açısından önemlidir.

Akustik emisyonun (AE) kayalar ile olan ilişkisi üzerine farklı araştırmacılar çalışmalar yapmıştır. Hardy (1972 ve 1981), çalışmalarında kaya gibi jeolojik malzemelerde akustik yayılmanın nasıl gerçekleştiğini belirtmemelerine rağmen birim deformasyon enerjisinin hızlıca boşalması sonucu gelişen deformasyonlar ve yenilmelerle ilgili olduğunu belirtmiştir.

Kayaların yük altındaki davranışlarını belirleyecek olan fiziksel ve mekanik özellikler onların bileşimleri ve dokularıyla doğrudan ilişkilidir. Kaya mühendisliğinde gerilme koşulları değiştikçe, doku ve bileşimdeki farklı elastik özellikteki unsurların sınırları boyunca veya en zayıf bileşenler içerisinde çatlak gelişiminin başladığı ve çatlaklanma başlangıcı yüklerinin, bileşim ve dokuya bağlı olduğu literatürdeki çalışmalarda ortaya konmuştur (Srinivasan vd., 1995; Suzuki vd., 1998; Seto vd., 1999; Wang vd., 2000; Park vd., 2001; Aydan vd., 2001).

Tuncay ve Ulusay (2002) tarafından AE nin özellikleriyle kaya mühendisliğinde kullanım örnekleri ve avantaj ve dezavantajlarını belirtmiştir.

Farklı tür kayaçlar (granit, bazalt, gabro, andezit gibi) üzerinde yapılan çalışmalar literatürde yer alsa da, farklı tür bazaltlar

kullanılarak, tüm fiziksel ve mekanik özelliklerinin bileşim ve doku ile olan ilişkilerini kıyaslayan ve doğrudan ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın temel amacı bazaltik kayaçların bileşim ve doku özelliklerinin akustik emisyon özelliklerine etkisinin ortaya konulmasıdır.

MALZEME, YÖNTEM VE BULGULAR

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden getirilen, farklı bileşim ve dokuya sahip bazaltik kayaçların içyapı özelliklerinin akustik emisyon davranışına etkisini tespit edebilmek için farklı taş ocaklarından blok örnekler alınmıştır. Örnekleme yapılan taş ocakları; Tekirdağ-Hayrabolu, Tekirdağ-Muratlı, Tekirdağ-Osmancık Köyü, Kütahya, Düzce, Çanakkale-Biga, Bursa-İznik ve Edirne-Keşan bölgelerinde yer almaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bazalt karot örnekleri ve kodları.

Table 1. Basalt core samples and their codes used in laboratory studies.

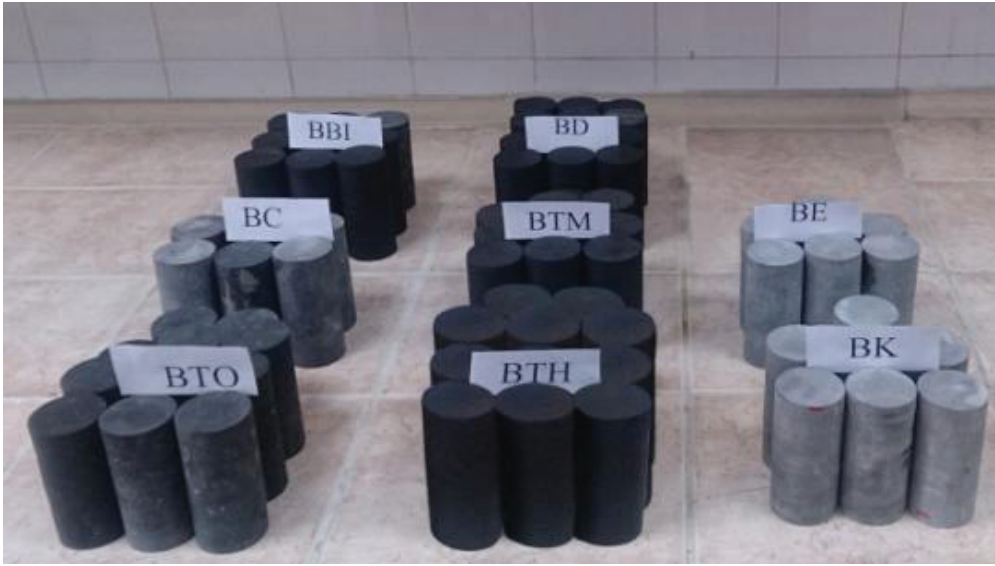
Örnek Kodu	Örneğin Alındığı Bölge
BTH	Tekirdağ- Hayrabolu
BTM	Tekirdağ- Muratlı
BTO	Tekirdağ- Osmancık Köyü
BK	Kütahya
BD	Düzce
BÇ	Çanakkale
BB	Bursa
BE	Edirne

Bazaltik kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin, akustik emisyon davranışlarına etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle numunelerden incekesitler hazırlanmış ve incelenmiştir. Farklı özelliklerdeki bazaltik

kayaçların kimyasal bileşimlerini belirlemek için ise XRF analizi yapılmış ve ana element oksit yüzdeleri bulunmuştur. Böylece kimyasal bileşimlerine göre incelenen kayaçlar sınıflandırılmış, mineralojik ve petrografik özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmaların ardından blok halinde getirilmiş olan bazaltik kayaçlardan NQ çapına uygun karot örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 1).

Kimyasal Özellikler

Farklı bileşimlere sahip sekiz kayacın kimyasal özelliklerini saptamak amacıyla XRF yöntemi kullanılarak ana element oksit içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bazalt karot örnekleri.

Figure 1. Basalt core samples used in laboratory studies.

Çizelge 2. Bazaltik kayaçların ana element oksit yüzdeleri.

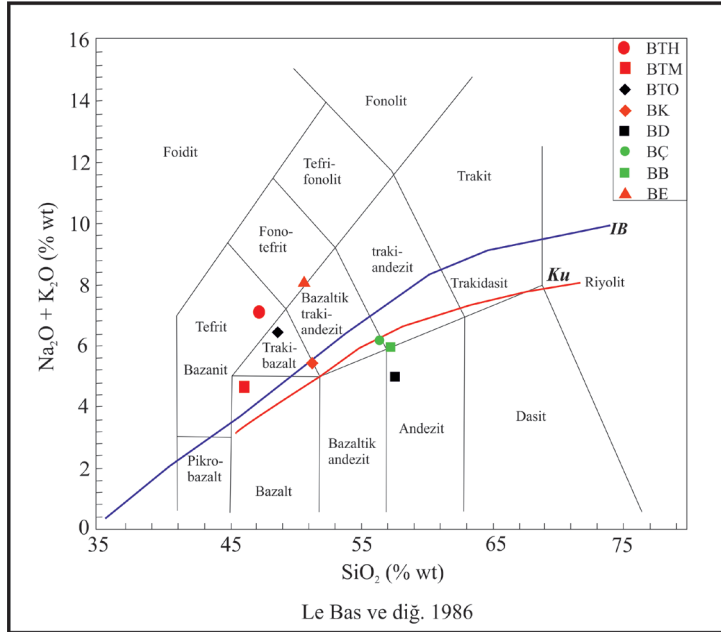
Table 2. The major element oxide fractions of basaltic rocks.

Ocak Kodu	Ana Element Oksit Yüzdeleri (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
BTH	46.33	13.67	10.96	9.79	11.63	0.15	2.31	4.52
BTM	45.14	13.25	10.19	9.08	12.11	0.16	1.90	3.04
BTO	47.10	13.12	10.02	8.91	11.83	0.14	2.10	3.78
BK	51.73	18.32	5.87	9.08	3.09	0.15	2.39	3.31
BD	57.65	17.22	6.52	6.69	2.96	0.15	1.18	3.68
BÇ	56.63	18.52	5.95	6.65	3.34	0.15	3.28	3.03
BB	57.13	17.75	6.96	6.75	3.81	0.15	1.96	3.43
BE	49.67	12.26	7.89	7.91	12.74	0.14	5.51	2.53

Bazaltik kayaçların kimyasal özelliklerine göre; SiO_2 değerleri %45.14 - %57.65 arasında değişmektedir ve en yüksek değer BD, en düşük değer ise BTM örneklerine aittir. Al_2O_3 değerleri; %12.26 ile en düşük BE ve %18.52 ile en yüksek BÇ örneği arasında değişim göstermektedir. Fe_2O_3 değerleri de %5.87 - %10.96 arasında değişmektedir ve en yüksek BTH örneğine, en düşük değer ise BK örneğine aittir. CaO içerikleri %6.65 - %9.79 arasında değişim gösterirken, en yüksek değer BTH ve en düşük değer ise BÇ örneğidir. MgO değerleri %2.96 - %12.74 arasında bir değişim göstermektedir ve BE örneği en yüksek, BD örneği ise en düşük değerlere sahiptir. SO_3 değeri örneklerde birbirlerine yakın değerler vermekte olup %0.14 - %0.16 arasındadır. K_2O içerikleri %1.18 - %5.51 arasında değişim gösterirken en yüksek

BE ve en düşük BD örneğidir. Son olarak Na_2O verilerine bakıldığında değerler %2.53 - %4.52 arasında değişirken en yüksek değer BTH ve en düşük değer ise BE örneğindedir.

Bazaltik kayaçların kimyasal içerikleri doğrultusunda Le Bas vd. (1986)'a göre $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ değerleri kullanılarak örneklerin dağılımları yapılmıştır (Şekil 1). Bu doğrultuda BTH tefrit, BTM bazalt, BTO traki-bazalt, BK traki-bazalt, bazaltik traki-andezit, BD andezit, BÇ bazaltik traki-andezit, BB traki andezit, bazaltik traki-andezit, BE fenotefrit, bazaltik traki-andezit bileşimlerindedir. Ayrıca IB sınır ayırımına göre; BTH, BTM, BTO ve BE alkalin olup; BD, BÇ, BB ve BK subalkalin bölgededir. Kuno (1966)'ya göre ise; BTH, BTM, BTO, BE ve BK alkalin, BD, BÇ, BB subalkalin bölgede yer almaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. İncelenen kayaç örneklerinin $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ değerlerine göre isimlendirme diyagramındaki konumları (Le Bas vd., 1986).

Figure 2. The locations of the rock samples in the naming diagram according to $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ (Le Bas, 1986). IB: Irvine ve Baragar (1971)'e göre alkalin-subalkalin ayırımı, Ku: Kuno (1966)'ya göre alkalin-subalkalin ayırımı. IB: Irvine and Baragar (1971) according to alkaline-subalkaline separation, Ku: Kuno (1966) according to alkaline-subalkaline separation.

Mineralojik ve Petrografik Özellikler

İnce kesitler üzerinde bazaltik kayaların mineralojik bileşimini kantitatif olarak belirlemek amacıyla modal analiz (nokta sayımı) yapılmıştır. Modal analiz için her bir bazalt kesiti üzerinde 2000 nokta sayılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kayaların mineral ve hamur alanları nokta sayımı ile elde edilen mineral içeriklerinin yüzdeleri de Çizelge 3'te verilmiştir. Bazaltik kayaların hamur ve doku özellikleri, mineral içerikleri, ayrışma durumları ve petrografik bileşimlerine göre sınıflandırmaları da Çizelge 4 ve Şekil 3'te verilmiştir. Hamuru oluşturan plajiyoklas ve piroksenler "mikrolit" olarak yer alır.

Yapılmış olan nokta sayım hesaplarına göre, kesit içindeki en fazla hamur oranı %81.4 değeri ile Tekirdağ Hayrabolu örneğine aittir. En az hamur oranı ise %48.5 ile Edirne Keşan örneğine aittir. Aynı zamanda BE örneği %32.2 değeri ile en fazla piroksen alan içeriğine sahipken, BTM örneği ise %5.6 ile en az piroksen içeriğine sahiptir. Plajiyoklas yüzdelere göre; en yüksek değer %30.2 ile BB örneği ve en düşük değer ise %2.6 ile BK örneğine aittir. Biyotit minerali, sadece farklı bir parajenez veren BE örneğinde gözlenmiştir ve kesit içerisinde %4.1 oranında bulunmaktadır. Opak mineral alan oranlarına göre en yüksek %1.7 değeri ile BTO ve en düşük %0.4 değeri ile BK örneklerinde görülmektedir. Olivin içeriklerine bakıldığında ise en yüksek değer %15 ile BTO ve en düşük değer % 2.8 ile BK örneğine aittir.

Çizelge 3. Bazaltik kayaların nokta sayımı ile belirlenen mineral içerik oranları.

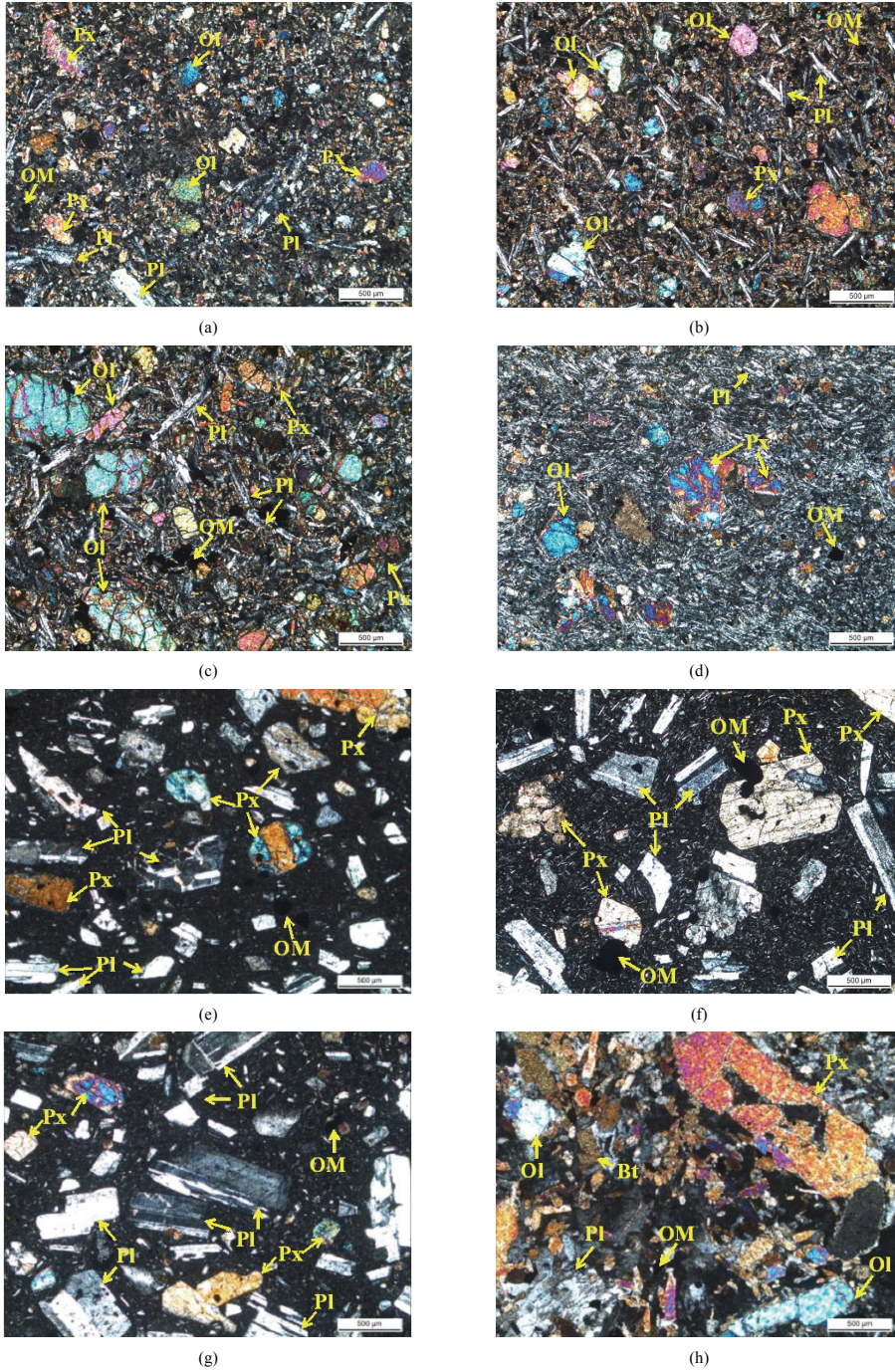
Table 3. Mineral ratios of basaltic rocks determined by point counting.

Örnek Kodu	Mineral İçeriği (%)					
	Hamur	Piroksen	Olivin	Plajiyoklas	Biyotit	Opak Mineral
BTH	81.4	9.9	3.3	4.4	-	1
BTM	68.2	5.6	10.5	14.2	-	1.5
BTO	65.3	7.2	15	10.8	-	1.7
BK	75.7	18.5	2.8	2.6	-	0.4
BD	59.7	12.6	-	26.9	-	0.8
BÇ	56.6	13	-	29.4	-	1
BB	50.5	18.5	-	30.2	-	0.8
BE	48.5	32.2	3.8	10.8	4.1	0.6

Çizelge 4 . Bazaltik kayaçların alındıkları bölgelere göre mineral içeriği, doku, hamur, ayrışma durumu ve mikroskopik tanımlamaları.
Table 4. Mineral contents, texture, matrix, weathering and microscopic descriptions of basaltic rocks according to the areas they are taken from.

Örnek Kodu	Numunenin Alındığı Bölge	Mineral İçeriği	Doku	Hamur	Ayrışma	*Mikroskopik Tanımlama
BTH	Tekirdağ / Hayrabolu	Olivin, plajiyoklas, piroksen, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas. piroksen. volkan camı	Silisleşme	Bazalt
BTM	Tekirdağ / Muratlı	Piroksen, Plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas Kristalleri. piroksen ve opak	Talklaşma (olivin)	Bazalt / Diyabaz
BTO	Tekirdağ / Osmancıkköy	Olivin, plajiyoklas, opak	Hipokristalin porfirik	Volkan camı. piroksen. plajiyoklas	Kloritleşme. silisleşme	Olivin Bazalt
BK	Kütahya	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik. Akma dokusu	Plajiyoklas mikroliti ağırlıklı ve çok küçük piroksen	Karbonatlaşma. killeşme. talklaşma	Olivin Bazalt
BD	Düzce	Plajiyoklas, piroksen(ojit), opak	Holohyalin porfirik	Volkan camı. çok küçük piroksen ve plajiyoklas	-	Bazalt
BÇ	Çanakkale / Biga	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Hipidiyamorf porfirik	Volkan camı ağırlıklı	Hidrotermal alterasyon. karbonatlaşma (piroksen). erime-çözünme (plajiyoklas)	Bazalt
BB	Bursa / İznik	Plajiyoklas, Piroksen, opak	Hipohyalin porfirik	Volkan camı ağırlıklı. az mikrolit	-	Bazalt
BE	Edirne / Keşan	Piroksen, plajiyoklas, biyotit, opak	Holokristalin porfirik	-	Kloritleşme	Mafik Damar Kayacı

* Streckeisen ve Le Bas (1991)' e göre



Şekil 3. Örneklerin polarizan mikroskobu altındaki görünümü.

a) BTH, b) BTM, c) BTO, d) BK, e) BD, f) BÇ g) BB, h) BE, (Px: Piroksen, Pl: Plajiyoklas, Ol: Olivin, OM: Opak Mineral) (Çift Nikol. 4X).

Figure 3. View of samples under polarizing microscope.

Akustik Emisyon

Akustik emisyon; gerilme altındaki malzemelerde bir ya da daha çok yerel kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır (ASTM, 2002). Bütün katı malzemeler belli bir elastikliğe sahiptir; dış kuvvetler altında genişirler veya sıkıştırılırlar, kuvvet ortadan kalktığında ise bir yay gibi geri gelebilirler. Kuvvet ve dolayısıyla elastik deformasyon ne kadar fazla ise elastik davranış o kadar fazla olacaktır. Eğer elastik limit aşılsa kırılma veya çatlama gerçekleşir. Elastik olarak genişmiş malzemede boşluk, inklüzyon vb. bir kusur varsa çatlamlar yüksek derecede gerilen bu noktalarda oluşarak hızlı bir dislokasyonla malzeme enerjisini atarak gevşer. İşte bu şekilde elastik enerjinin hızla serbest bırakılmasına “Akustik Emisyon” olayı denir. Yöntem, örneğe sabitlenecek bir alıcı sensör, (Şekil 4) oluşan titreşimlerin frekanslarını arttıracak güç yükselticiler ve akustik emisyon sayılarının grafiğe döküldüğü, tüm sistemin bağlı olduğu bir bilgisayar düzeneğinden oluşmaktadır (Şekil 5). Tuncay ve Ulusay (2002) yaptıkları çalışmalar ile Türkiye’de henüz kullanımı yaygın olmayan AE tekniğini, AE sinyallerinin (olgusunun) özelliklerini, izleme sistemlerinin amaca göre kullanımını, şev, yeraltı ve arazi gerilmelerinin belirlenmesinde yöntemin avantaj ve dezavantajlarını ana hatlarıyla belirtmişlerdir. Tuncay ve Ulusay (2008) ile Tuncay ve Obara (2012) AE tekniğini kullanarak arazi gerilmelerinin belirlenebilmesine yönelik değerlendirmelere de gitmişlerdir.

Çatlak başlangıcı, bazı kaynaklarda gerilim kaynaklı hasarın ilk aşaması olarak belirtilmiştir. Fakat ISRM’in önerilen kuralları çatlak başlangıcının tespitinden bahsetmemektedir (Nicksiar, 2012). Özellikle yapılan son çalışmalar (Chang ve Lee, 2004), çatlak başlangıcı

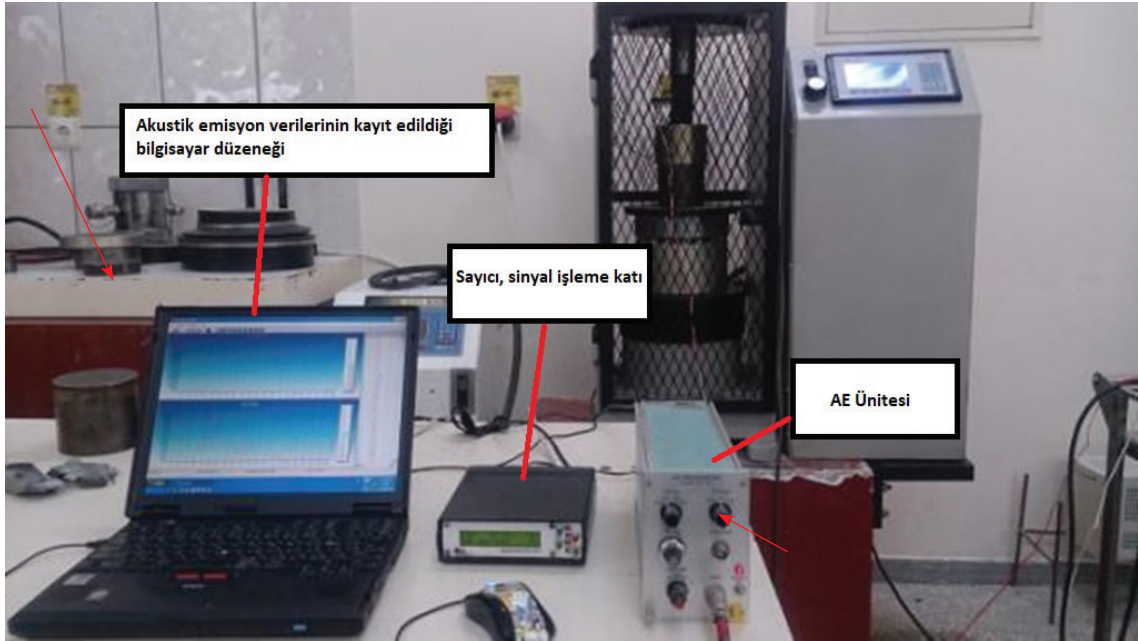
seviyelerinin bilinmesinin yeraltı kazılarında oluşabilecek sökülme (kavlaklanma) direnci için yaklaşık bir değer olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4. Gerilme artışına bağlı olarak gelişen kHz mertebesindeki tüm titreşimleri algılayan sensör ve aynı zamanda karota yapılandırılmış olan deformasyon ölçerlerin görünümü.

Figure 4. A sensor that detects all vibrations in the kHz range due to the increment stress rate and the appearance of deformation meters sticked on the core sample at the same time.

Mikro çatlak ağının gelişimi ve ilerlemesi iki farklı sürecin etkisi altındadır; maruz kalınan periyodik yüklerin sınırının aşılmasına veya yenilme basıncı eşik değerinin kontrolüne bağlıdır (Eberhardt, 1999b). Gerçekleşen bir basınç sırasında örnek üzerinde farklı çatlak aşamalarının geliştiği (çatlakların kapanması, çatlak başlangıcı, çatlakların birleşmesi veya çatlak yenilmesi) bilinmektedir.



Şekil 5. Akustik emisyon deney düzeneğinin genel görünümü.

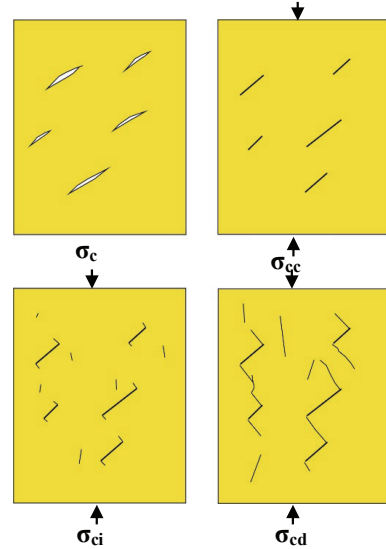
Figure 5. General view of the acoustic emission test setup.

Basınç sırasında kayaç örneğinde gerçekleşen çatlak gelişiminin aşamaları Şekil 6'da gösterilmiştir. Eberhardt (1998) tarafından ayrıntılı bir şekilde tarif edilen çatlak gelişimlerinin eşik değerleri Chang ve Lee (2004) tarafından özet olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

Deformasyon-gerilme grafiğinde çatlakların kapandığı bölge, ilk yanal eğim çizgisinin minimum noktasıdır.

Çatlak başlangıcı, kümülatif AE eğrilerinin ilk kez önemli ölçüde artmaya başladığı noktadır.

Çatlakların yenilmesi, eğim çizgisinin negatiften pozitifte geçtiği veya ikincil lineer çizgi aralığından aniden saptığı ve arttığı nokta olarak tarif edilmektedir.



Şekil 6. Şematik olarak farklı gerilme seviyelerinde kırık başlangıcı, gelişimi ve kapanmasının gösterimi (Cai, vd., 2004'ten değiştirilerek alınmıştır).

Figure 6. Schematic demonstration of fracture initiation, development and closure at different stress levels (modified after Cai et al., 2004).

(σ_c ; Tek Eksenli Basınç Dayanımı, σ_{cc} ; Çatlak Kapanması Gerilmesi, σ_{ci} ; Çatlak Başlangıcı Gerilmesi, σ_{cd} ; Çatlak Yenilmesi Gerilmesi)

Maksimum sıkışma dayanımı ile çatlak başlangıcı gerilme değeri arasında bir eşik değeri verilerek, maksimum gerilme değeri bilinen sağlam bir kayaç örneği için çatlak başlangıcı gerilme değeri hakkında bir yaklaşımda bulunulabilir. Eberhardt (1999b), granitler üzerinde yaptığı çalışma sonucunda çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi eşik değeri katsayılarını 0.39 UCS ve 0.75 UCS olarak tespit etmiştir. Cai vd. (2004), çatlak başlangıcı sürecinin maksimum tek eksenli sıkışma dayanımı değerinden 0.3 ile 0.5 kat daha düşük

basınç gerilmelerinde başladığını belirtmişlerdir. Ündül vd. (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda gerilme deformasyon grafiklerinden yararlanarak, çatlak başlangıcı eşik gerilme değerini yüklerini ortalama 0.39-0.43 olarak tespit etmişlerdir. Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilen değerlere göre bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik gerilme değerleri $0.33 \sigma_c$ ile $0.54 \sigma_c$ (%33-%54) basınç gerilmeleri arasında değişirken, çatlak yenilme eşik değeri katsayıları ise $0.83 \sigma_c$ ile $0.98 \sigma_c$ (%83-%98) arasında değişmektedir.

Çizelge 5. Akustik emisyon yöntemi ile oluşturulan grafiklerden elde edilen verilere göre bazalt örneklerinin yenilme süreci boyunca farklı çatlak seviyelerinde aldıkları sıkışma dayanımı değerleri.

Table 5. According to the results obtained from the graphs generated by the acoustic emission method, the values of the pressure resistances of the basalt specimens obtained at different crack levels during the deformation process.

Örnek Kodu	Tek Eksenli Basınç Dayanımı -Deney Süresi σ_c (MPa)-c(sn)	Çatlakların Kapanma Gerilmesi -Çatlak Kapanma Süresi σ_{cc} (MPa)-cc(sn)	Çatlak Başlangıcı Gerilmesi - Çatlak Başlangıcı Süresi σ_{ci} (MPa)-ci(sn)	Çatlakların Yenilme Gerilmesi -Çatlak Yenilme Süresi σ_{cd} (MPa)-cd(sn)
BTH	271 - 712	25 - 30	147 - 408	244 - 670
BTM	252 - 706	19 - 98	93 - 296	211 - 690
BTO	174 - 460	13 - 34	85 - 294	164 - 458
BK	205 - 584	22 - 92	76 - 258	192 - 566
BD	272 - 786	11 - 84	110 - 372	268 - 764
BÇ	149 - 462	16 - 50	60 - 194	143 - 446
BB	252 - 558	18 - 60	90 - 226	226 - 512
BE	162 - 484	14 - 70	54 - 174	150 - 456

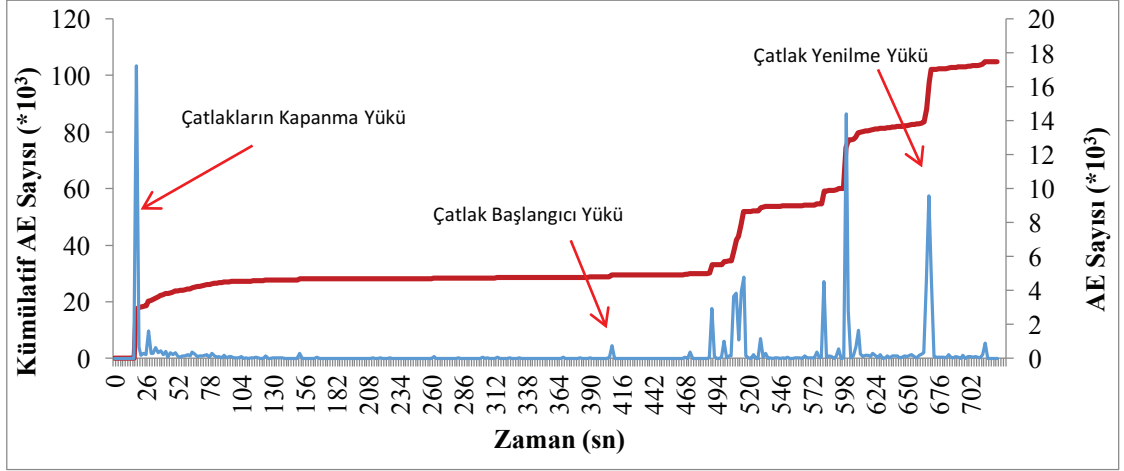
Çizelge 6. Bazalt örneklerinin farklı çatlak seviyelerinde ve yenilme süreleri içinde aldıkları eşik değeri katsayıları.
Table 6. Threshold value coefficients of basalt samples taken at different crack levels and during the time of failure times.

Örnek Kodu	Çatlak Başlangıcı Eşik Değeri Katsayısı σ_{ci}/σ_c	Çatlak Yenilme Eşik Değeri Katsayısı σ_{cd}/σ_c	Çatlak Başlangıcı Süresi Katsayısı ci(sn)/c(sn)	Çatlak Yenilme Süresi Katsayısı cd(sn)/c(sn)
BTH	0.54	0.90	0.57	0.94
BTM	0.37	0.83	0.42	0.97
BTO	0.49	0.94	0.63	0.99
BK	0.37	0.93	0.44	0.97
BD	0.40	0.98	0.47	0.97
BÇ	0.40	0.95	0.42	0.95
BB	0.36	0.89	0.41	0.91
BE	0.33	0.92	0.35	0.94

Maksimum sıkışma dayanımı ile çatlak başlangıcı gerilme değeri arasında bir eşik değeri verilerek, maksimum gerilme değeri bilinen sağlam bir kayaç örneği için çatlak başlangıcı gerilme değeri hakkında bir yaklaşımda bulunulabilir. Eberhardt (1999b), granitler üzerinde yaptığı çalışma sonucunda çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi eşik değeri katsayılarını 0.39 UCS ve 0.75 UCS olarak tespit etmiştir. Cai vd. (2004), çatlak başlangıcı sürecinin maksimum tek eksenli sıkışma dayanımı değerinden 0.3 ile 0.5 kat daha düşük basınç gerilmelerinde başladığını belirtmişlerdir. Ündül vd. (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda gerilme deformasyon grafiklerinden yararlanarak, çatlak başlangıcı eşik gerilme değerini yüklerini ortalama 0.39-0.43 olarak tespit etmişlerdir. Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilen değerlere göre bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik gerilme

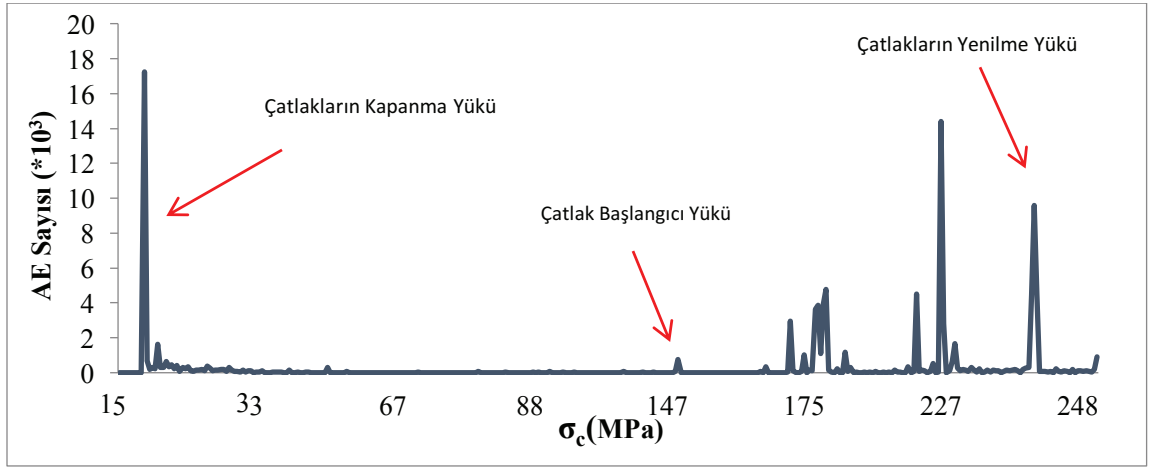
değerleri 0.33 σ_c ile 0.54 σ_c (%33-%54) basınç gerilmeleri arasında değişirken, çatlak yenilme eşik değeri katsayıları ise 0.83 σ_c ile 0.98 σ_c (%83-%98) arasında değişmektedir.

Tekirdağ-Hayrabolu bazaltı için yapılan örnek çalışmada, tek eksenli basınç deneyleri sırasında en yüksek 271 MPa gerilme değeri alan Tekirdağ-Hayrabolu bazaltında; 25 MPa'da çatlakların kapanması, 149 MPa'da ise çatlak başlangıcı gerçekleşmiştir. Yaklaşık olarak 244 MPa'da çatlakların yenilmesi meydana gelmiştir. 712 sn süren basınç deneyi sırasında Tekirdağ-Hayrabolu bazaltı 408. sn'de çatlaklanmaya başlamış, zamanla gelişen ikincil çatlaklarında birlikte hareket etmeye başlamaları ile yenilme 670. sn'de meydana gelmiştir (Şekil 7-10). Bu veriler doğrultusunda çatlak başlangıcı eşik değeri katsayısı 0.54 σ_c , çatlak yenilmesi eşik değeri ise 0.90 σ_c olarak bulunmuştur (Çizelge 6).



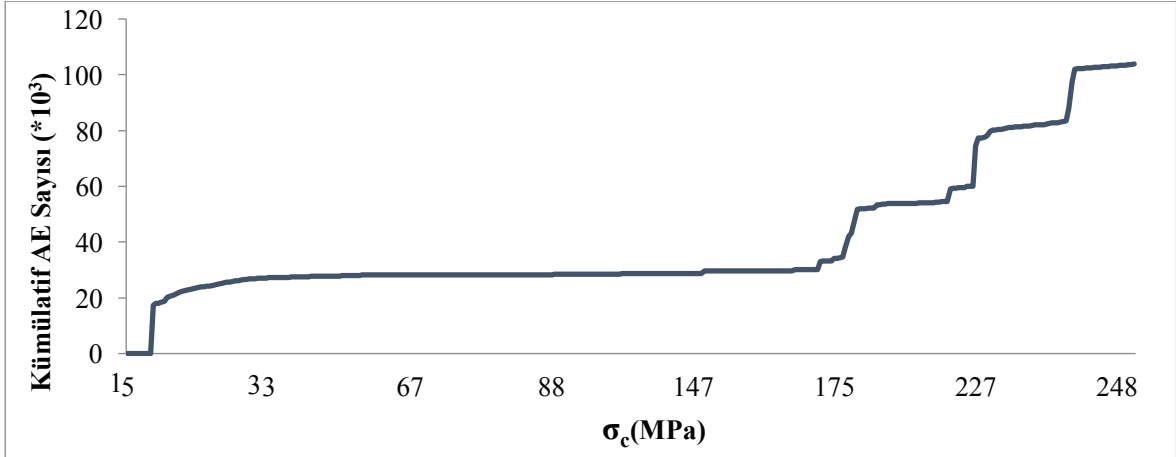
Şekil 7. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltının AE izleme yöntemi ile elde edilen veri grafiği.

Figure 7. Data graph obtained by AE monitoring method of Tekirdağ- Hayrabolu basalt.



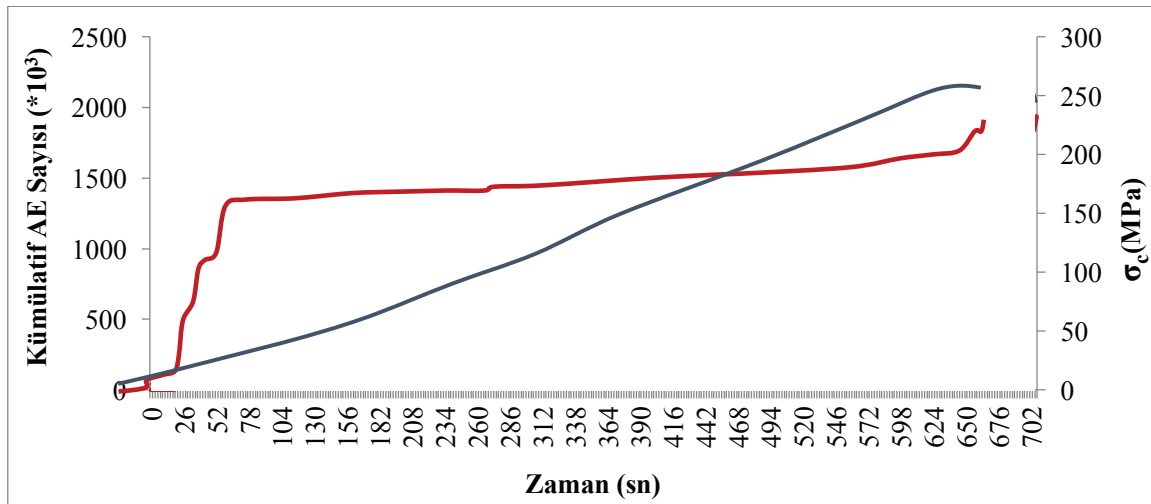
Şekil 8. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltının basınç dayanımlarına göre AE verilerinin dağılımı.

Figure 8. Distribution of AE data according to pressure resistances of Tekirdağ- Hayrabolu basalt.



Şekil 9. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltında uygulanan yüke karşı meydana gelen AE verilerinin kümülatif olarak değişimi.

Figure 9. Cumulative change of AE data from the stratum of the Tekirdağ-Hayrabolu basalt.



Şekil 10. Tekirdağ- Hayrabolu örneğine uygulanan basınç dayanımı sırasında zamanla değişim gösteren kümülatif AE veri grafiği.

Figure 10. A cumulative AE data plot that shows a change over time during the pressure resistance applied to the Tekirdağ-Hayrabolu example.

VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Kayaç içerisindeki çatlak sistemi, hamur bileşimi ve dokusu, minerallerinin boyutu, türü ve ayrışma durumları, fiziksel özellikleri (porozite, yoğunluk, birim hacim ağırlık, su emme gibi) ve tüm bu özelliklerin farklı şekillerde birlikte çalışması ile kayacın dayanımını, çatlak başlangıcını, yenilme mekanizmasını ve diğer mekanik özelliklerini etkilemektedir.

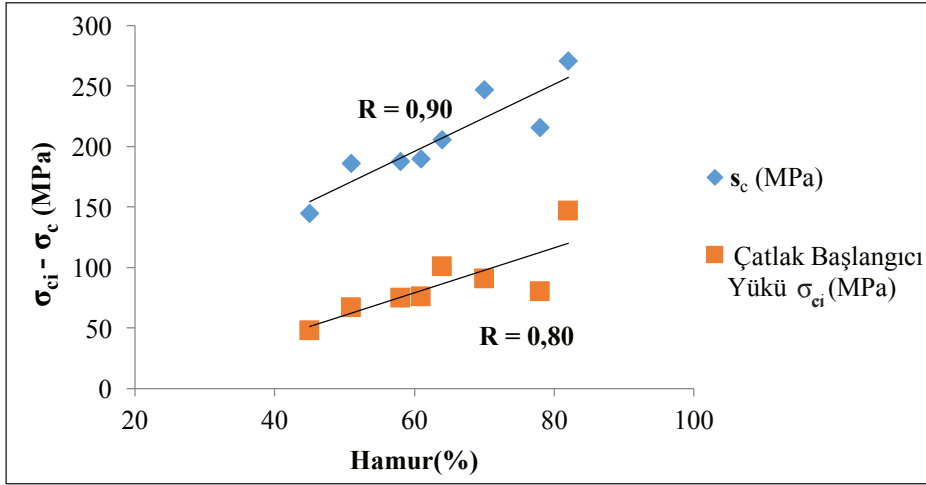
Eberhardt (1999a), Tuğrul ve Zarif (1999) granitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kayacın mineralojik bileşimleri ile mekanik özelliklerini karşılaştırdıklarında tane boyu küçüldükçe dayanımın arttığını belirtmişlerdir.

Ündül ve diğerleri (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmada; plajiyoklas ve amfibol fenokristallerinin toplamının, hamura olan oranı (Plajiyoklas+Amfibol/Hamur) arttıkça dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir. İncelenen kayaçlar üzerinde yapılan basınç deneylerinden elde edilmiş olan ortalama dayanım değerleri ile akustik emisyon çalışmaları sonucunda elde edilmiş olan çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları çarpılarak, Çizelge 7’de verilen ortalama çatlak başlangıcı basınç değerleri (σ_{ci}) elde edilmiştir. Bu değerlere göre, bazaltik kayaçlarda hamur oranı arttıkça maksimum basınç dayanımı ve çatlak başlangıcı yükü de artmaktadır (Şekil 11).

Çizelge 7. Bazaltik kayaçların ortalama çatlak başlangıcı gerilme değerleri ve minerallerin hamura olan oranları.

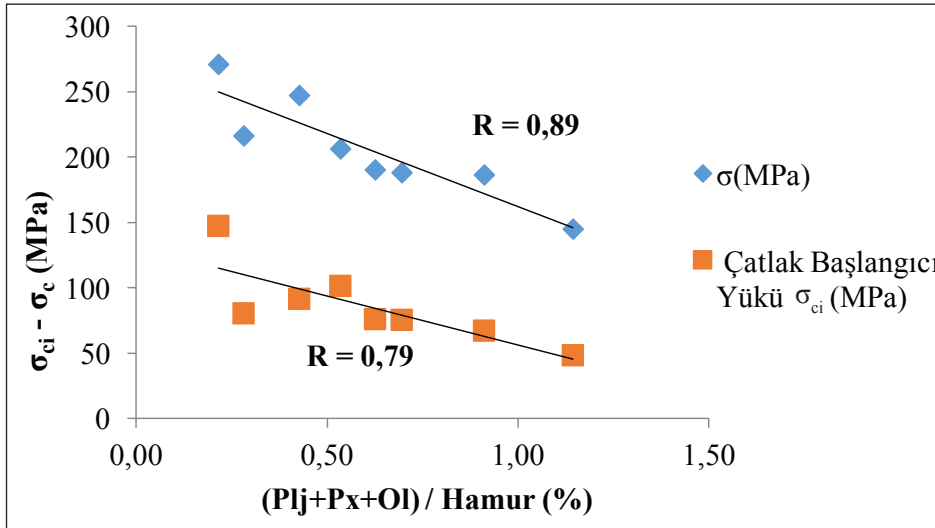
Table 7. Mean crack initiation stress values of basaltic rocks and the proportion of minerals to matrix.

Örnek Kodu	Basınç Dayanımı σ_c (MPa)	Çatlak Başlangıcı Gerilmesi σ_{ci} (MPa)	Hamur (%)	(Pl+Px+Ol)/Hamur (%)
BTH	271	147	82	0.21
BTM	247	91	70	0.43
BTO	206	101	64	0.53
BK	216	80	78	0.28
BD	190	76	61	0.62
BÇ	188	75	58	0.69
BB	186	67	51	0.91
BE	145	48	45	1.14



Şekil 11. Bazaltik kayaçların hamur yüzdeleri ile çatlak başlangıcı değerlerinin ve tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of matrix percentages and crack initiation values and uniaxial compressive strengths of the basaltic rocks.



Şekil 12. Bazaltik kayaçların mineral alan yüzdelerinin hamur yüzdelerine oranının çatlak başlangıcı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile karşılaştırılması.

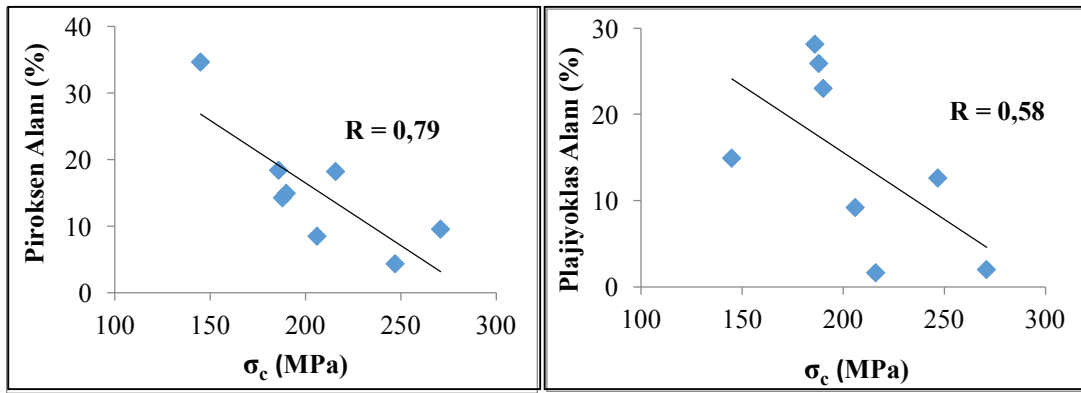
Figure 12. Comparisons of the ratio of the mineral area percentages of the basaltic rocks to the percentage of the matrix are compared with the crack initiation and uniaxial compressive strength values.

Bazaltik kayaçlarda minerallerin alanları arttıkça ve tane boyları büyüdükçe, dayanım değerleri düşmektedir. Plajiyoklas, piroksen ve olivin fenokristal alanları toplanıp hamura

oranlandığında, değer küçüldükçe, yani hamur oranı arttıkça maksimum yükün ve çatlak yenilme yükünün de arttığı görülmektedir (Çizelge 7 ve Şekil 12).

Dayanımı etkileyen en önemli unsurlardan biri hamurun bileşimi ve özelliğidir. 8 farklı bazaltik kayaç içerisinde, piroksen, plajiyoklas ve olivin minerallerinin hamurun neredeyse tamamına hakim olduğu örnekler (BTH, BTM, BTO, BK) yüksek dayanım gösterirken, volkan camı ve plajiyoklas ağırlıklı olanlar (BD, BÇ, BB) daha düşük basınç dayanımlarında yenilmektedir. Bunun yanı sıra, hamur içerisinde fenokristal boyutlarda bulunan ana minerallerin (piroksen, plajiyoklas gibi) alanları arttıkça, kayaçların dayanımları düşmektedir (Şekil 13).

görülen boşlukları olmasıdır. BK örneğinde de hamurda var olan çatlak sistemleri, akma dokusu ve minerallerindeki ayrışmadan dolayı gözlenen killeşmeler nedeniyle dayanımı beklenen değerden daha düşüktür. Çünkü volkan camı ayrışmadan daha çok etkilenmekte ve kile dönüşmektedir. Bunların dışında hamuru volkan camı ağırlıklı olan BD örneği ise ayrılmış mineral içermediğinden yüksek dayanımlıdır, fakat yenilme yükü gerçekleştikten hemen sonra maksimum yükü almaktadır. Bu şekilde kırılğan davranmasının nedeni, hamurunun



Şekil 13. Piroksen ve plajiyoklas fenokristal yüzdelерinin dayanım değerleriyle karşılaştırılması.







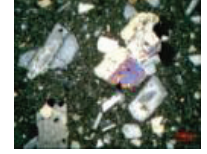
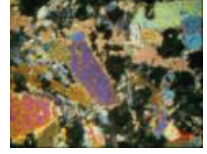
Figure 13. Comparison of strength values of pyroxene and plagioclase phenocrystal fractions.

Çatlak ve ayrılmış mineral içermeyen kayaçlar, bunları içeren kayaçlara göre, yük altında daha uzun bir süre yenilmeden kalabilmektedir. Genel olarak dayanımı yüksek olan BTH ve BTM örneklerinde, yenilmenin meydana geldiği yük değerleri de yüksektir. Fakat benzer petrografik özellikler gösteren BTO ve BK örneklerinin dayanımları ve yenilme yükü değerleri beklenilenden göreceli daha düşüktür. Bunun nedeni BTO örneğinin dayanımlı hamur dokusuna rağmen, gözle

ağırlıklı olarak volkan camından meydana gelmiş olması ve hamurdaki çatlaklardır. Genel olarak çatlak başlangıcı eşik değeri katsayılarına bakıldığında, dayanımı yüksek olan örneklerin katsayı değerleri de yüksektir. Fakat hamurun bileşiminden ve dokusundan, ayrılmış mineral içeriğinden, mineral boyutlarından ve çatlak sistemlerinden kaynaklanan sebepler nedeniyle beklenilenden daha düşük veya daha yüksek katsayı değerleri çıkabilmektedir (Çizelge 8).

Çizelge 8. Bazaltik kayaçların mikroskop görüntüleri ve mekanik özellikleri.

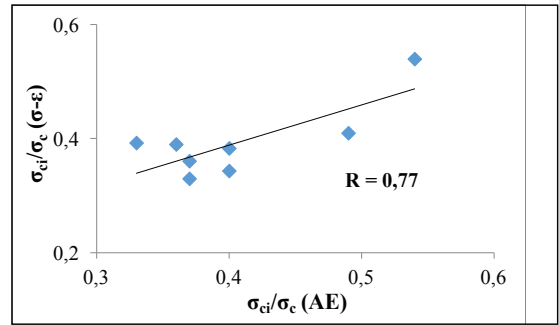
Table 8. Microscopic views and mechanical properties of basaltic rocks.

Örnek Kodu	Çatlak Başlangıcı Eşik Değeri Katsayısı (σ_{ci}/σ_c)	Çatlak Yenilmesi Eşik Değeri Katsayısı (σ_{cd}/σ_c)	Basınç Dayanımı σ_c (MPa)	Elastisite Modülü E (GPa)	Bazaltların Polorizan Mikroskop Altındaki Görüntüleri (4x)
BTH	0.54	0.90	271	117	
BTM	0.37	0.83	247	65	
BTO	0.49	0.94	206	91	
BK	0.37	0.93	216	67	
BD	0.40	0.98	190	101	
BÇ	0.40	0.95	188	57	
BB	0.36	0.89	186	76	
BE	0.33	0.92	145	103	

Çatlak yenilme yükü (σ_{cd}), kayacın kırılabilirliği hakkında yaklaşımda bulunmamıza yardımcı olmaktadır. Kayacın yenilme yükü aldığı maksimum yüke oranlandığında, elde edilen değer ne kadar büyük ise kayacın o kadar kırılabilir (gevrek) davrandığı söylenebilir. Bu çalışma ile yenilme eşik değeri katsayısı 0.83-0.98 σ_c arasında bulunan bazaltların, Eberhardt (1999b), Chang ve Lee (2004) tarafından daha önce yapılmış çalışmalarda yenilme eşik değeri 0.75-0.89 UCS arasında bulunmuş olan granitik kayaçlara göre, biraz daha kırılabilir davrandıkları söylenebilir. Diğer bir anlatımla, granitik kayaçlar aldıkları maksimum dayanım yüküne göre, erken yenilseler bile tane gücü ile birbirlerine kenetlenmekte ve bir süre daha basınç altında parçalanmadan kalabilmektedirler. Fakat bazaltik kayaçlar hamur ve fenokristallerden oluşan bir yapıda olduklarından, yenilme gerçekleşikten çok daha kısa bir süre sonra alabileceği maksimum yükte parçalanmaktadırlar. Eberhardt (1999a) granit, granodiyorit ve pegmatit üzerinde yaptığı çalışmalarıyla çatlak başlangıcında önemli olanın, ana minerallerin gücü olduğu ve çatlağın yayılma davranışında bu minerallerin etkin rol aldığı belirtmiştir. BD ve BB örneklerinde ayrılmış minerallerin olmaması, var olan çatlakların da birbirleri ile bağlantılı olmayıp, mineralleri kesmemesi nedeniyle yüksek dayanım gösterdikleri söylenebilir. Bunun yanı sıra, bazaltik kayaçlarda hamurun bileşimi ve dokusu da, kayacın dayanımı ve çatlak başlangıcı için etken rol oynamaktadır.

Bugüne kadar kayaçların çatlak başlangıcı değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen farklı yöntemlerle bulunmuştur. İlk olarak Brace (1966) hacimsel deformasyon - basınç dayanımı grafiğinden yararlanarak eğrinin lineer çizgiden saptığı nokta olarak tespit etmiştir. Lajtai (1974) aksel basınç - yanal deformasyon grafiğinden, Diederichs (2007)

Poisson oranı ile basınç dayanımı grafiğinden, Stacey (1981) aksel ve yanal deformasyon grafiğinden, Eberhardt (1998) AE değeri - basınç dayanımı grafiğinden ve Nicksiar (2012) LRS (yanal deformasyon grafiğinden yararlanarak geliştirilmiş bir yöntem)'den yararlanarak çatlak başlangıcı yüklerini ve eşik değerlerini tespit etmeye çalışmışlardır. Nicksiar ve Martin (2012) birçok farklı yöntemi kullanarak birbirlerine yakın sonuçlar elde etmiş ve diyoritler için çatlak başlangıcı eşik değeri katsayısını $0.35\sigma_c - 0.56\sigma_c$ arasında bulmuştur. Bu çalışma kapsamında yanal deformasyon - basınç dayanımı grafiği ve akustik emisyon sayıları kullanılmak üzere iki farklı yöntemden yararlanarak bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Neticede her iki yöntemden elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu (Şekil 14) ve bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik değerlerinin bileşim ve dokusal özellikleri nedeniyle $0.33\sigma_c - 0.54\sigma_c$ arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

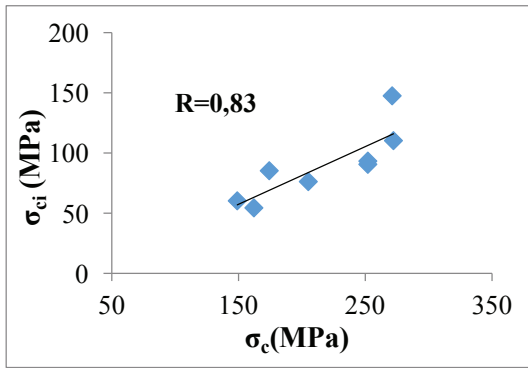


Şekil 14. İki farklı yöntem kullanılarak bulunmuş olan çatlak başlangıcı eşik değeri katsayılarının karşılaştırılması.

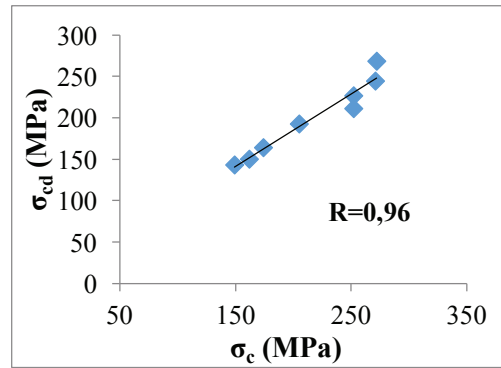
Figure 14. Comparison of crack initiation threshold values found using two different methods.

Akustik emisyon verilerinden elde edilen çatlak başlangıcı eşik değerleriyle gerilme-deformasyon grafiklerinden elde edilen veriler birbirleri ile uyumludur. Bu sonuç, iki yöntemin de kayaçların çatlak başlangıcını eşik değerini bulmak için kullanılabilir yöntemler olduklarını desteklemektedir. Fakat uygulaması daha kolay olduğu için akustik emisyon yönteminin kullanılması önerilebilir.

Gerilme deformasyon grafiklerine göre tek eksenli basınç dayanımı değeri arttıkça çatlak başlangıcı yükünün de arttığı Ündül vd. (2015) tarafından belirtilmiştir. Akustik emisyon yöntemiyle elde edilen çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi yüklerinin, kayacın dayanım özellikleriyle uyumlu olduğu Şekil 15'de gösterilen basit regresyon analizlerinde görülmektedir.



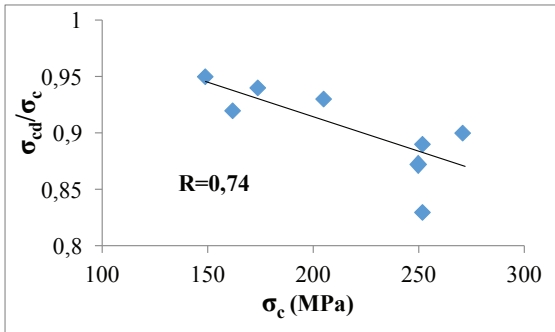
(a)



(b)

Şekil 15. Basınç dayanımı değerleri ile a) çatlak başlangıcı ve b) çatlak yenilme yüklerinin karşılaştırılması.

Figure 15. Comparing the unconfined strength values with a) crack initiation and b) crack failure.



Şekil 16. Çatlak yenilme eşik değeri katsayısı ile basınç dayanımının karşılaştırılması (BD örneği hariç).

Figure 16. Comparing the crack resistance threshold value with the compressive strength (except BD specimen).

BD örneği hariç akustik emisyon verilerinden elde edilen verilere göre çatlak yenilme eşik değeri katsayısı azaldıkça tek eksenli basınç dayanımı değerinin arttığı görülmektedir (Şekil 16). Düzce bazaltının boşluğunun az olmasına rağmen, çatlaklı olması nedeniyle yenilme gerçekleşikten sonra daha fazla yük alamayıp, maksimum yüke ulaştığı için uyumsuz bir değer verdiği düşünülmektedir.

SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucunda akustik emisyon verileri ile bazaltik kayaçların daha önceki çalışmalarda belirtilmemiş olan çatlak başlangıcı

ve yenilme eşik değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Hamur oranı arttıkça maksimum basınç dayanımı ve çatlak başlangıcı yükü de artmaktadır.
- Plajiyoklas, piroksen ve olivin fenokristal alanları toplanıp hamura oranlandığında, yani hamur oranı arttıkça maksimum yükün ve çatlak yenilme yükünün de arttığı görülmektedir.
- Çalışmaya konu olan bazaltlar için çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları $0.33\sigma_c$ - $0.54\sigma_c$ ve kalıcı deformasyonun sağlandığı yenilme eşik değeri katsayıları da $0.83\sigma_c$ - $0.98\sigma_c$ arasında bulunmuştur.
- Dayanımı yüksek olan örneklerin katsayı değerleri yükseldikçe, çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları da yükselmektedir.
- Bu katsayılardan yararlanılarak, dayanımları ve bileşimleri bilinen bazaltik kayaçların çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerinin ve yenilme yüklerinin tespiti için genel bir yaklaşımda bulunulabilir.

Ayrıca yazarlar bu önemli kayaçların yenilmesinin tahmininde kullanılan bu yöntemin diğer kayaç türleri üzerinde de ayrıntılı olarak araştırılmasını önermektedirler.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 51152 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- ASTM E 1316, 2002, Standard Terminology for NDT.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tuncay, E., Kumsar, H., Yılmazoğlu, M., Yüzer, E., 2001. Batı Anadolu'nun etkin gerilim ortamı. Jeoteknik III, İzmir ve Çevresinin Deprem ve Jeoteknik Sempozyumu, İzmir, Ö. Orhun ve Y. Tuner (eds.), Bildiriler CD'si, 14 s.
- Brace, W.F., Paulding, B.R., Scholz, C., 1966. Dilatancy in fracture of crystalline rocks, Journal of Geophysical Research, 71 (16), 3939-3953.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., Minami, M., 2004. Generalized crack initiation and crack damage gerilims thresholds of brittle rock masses near underground excavations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 833-847.
- Chang, S.H., Lee, C.I., 2004. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 1069-1086.
- Diederichs, M.S., 2007. Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling. Canadian Geotechnical Journal, 44, 1082-1116.
- Eberhardt E., 1998. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression. Ph.D Thesis, Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Eberhardt, E., Stead, D., Read, R.S., 1998. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. Canadian Geotechnical Journal, 35 (2), 222-223.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999a. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of gerilims-induced brittle fractures. Rock Mechanics and Rock Engineering, 32(2), 81-99.

- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., 1999b. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 361-380.
- Hardy, H. R. Jr., 1972. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research. *Acoustic Emission*, ASTM STP 505, Philadelphia, R.G. Liptai, D.O. Harris, and C.A. Tatro (eds.), American Society for Testing and Materials, 41-83.
- Hardy, H. R. Jr., 1981. Application of acoustic emission techniques to rock and rock structures: A state-of-the-art review. *Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice*, STP 750, Philadelphia, V.P. Drnevich and R.E. Gray (eds.), American Society for Testing and Materials, 4-92.
- Kuno H. 1966. Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology*, 29, 195-222.
- Lajtai, E.Z., 1974. Brittle fracture in compression. *International Journal of Fraction*, 10(4), 525-536.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Nicksiar, M., Martin, C. D., 2012. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 607-617.
- Park, P., Park, N., Hong, C., Jeon, S., 2001. The influence of delay time and confining pressure on in-situ stress measurement using AE and DRA. *Proceedings of the 38th US Symposium, Rock Mechanics in the National Interest*, Washington, D. Elsworth, J.P. Tinucci and K.A. Heasley (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 1281-1284.
- Stacey, T.R., 1981. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, 18 (6), 469 - 474.
- Srinivasan, C., Nair, G.J., Raju, N.M., 1995. Microseismic precursor analysis prior to seismic events in Kolar gold mine fields: A case study. *Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 371-381.
- Suzuki, T., Hikita, S., Hashimoto, S., 1998. Measurement of landslide behaviour by an acoustic emission method. *Proceedings of the 8th International IAEG Congress*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1733-1739.
- Seto, M., Nag, D.K., Vutukuri, V.S., 1999. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17, 241-266.
- Tuğrul, A., Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51, 303-317.
- Tuncay, E., Ulusay, R., 2002. Acoustic Emission (AE) technique: 1- Basic principles and its areas of application in rock engineering, *Yerbilimleri, Bulletin of Earth Sciences Application and Research Center of Hacettepe University*, 25, 65-82.
- Tuncay, E., Ulusay, R., 2008. Relation between Kaiser Effect (KE) levels and prestresses applied in laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 45(4), 524-537.
- Tuncay, E., Obara, Y., 2012. Comparison of stresses obtained from acoustic emission and compact conical-ended borehole overcoring techniques and an evaluation of Kaiser Effect level. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 71(2), 367-377.
- Ündül, Ö., Amann, F., Aysal, N., Plötze, M., 2015. Micro - textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. *Engineering Geology*, 1-9.
- Wang, H.T., Xian, X.F., Yin, G.Z., Xu, J., 2000. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser Effect. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 543-547.



Araştırma Makalesi / Research Article

Şişen Killerin İyileştirilmesinde Jips Kolonu Performansının Araştırılmasına İlişkin Laboratuvar Model Çalışması

A Laboratory Model Study Related with the Determination of Gypsum Column Performance in Treatment of Expansive Soils

Işık YILMAZ 

Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

Geliş (Received): 17 Ekim (October) 2018 / Düzeltme (Revised): 07 Kasım (November) 2018 / Kabul (Accepted): 20 Kasım (November) 2018

ÖZ

Killi zeminler üzerine inşa edilen özellikle hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, bu yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme özelliklerinin ve uygun iyileştirme yönteminin belirlenmesi çok büyük önem taşımaktadır. Literatürde kireç, çimento, uçucu kül, jips, bitüm, reçine, kimyasallar, vb. ile ilgili birçok zemin iyileştirme yöntemlerine sıklıkla rastlanmaktadır. Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bu yöntemlerin başında iyileştirme kimyasalları ve finansal boyutun önemi büyüktür. Bu nedenle düşük maliyette en iyi iyileştirmenin yapılması birincil amaçtır. Bu çalışma kapsamında killi zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolonlarının performansının araştırılmasına ilişkin bir laboratuvar model çalışmasının gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Amaca yönelik olarak; laboratuvarında hazırlanan bir arazi modeline yerleştirilen jips kolonu ile kolondan itibaren mesafeye bağlı olarak zeminin şişmesinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Elde edilen model verilerine dayalı olarak da jips kolon tekniğinin iyileştirme performansı araştırılmış ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Killi zeminler, İyileştirme, Şişme, Jips Kolonu, Laboratuvar Model

ABSTRACT

The most important soil behaviour in order to consider in foundation designs of specially light structures built on clay soils is swelling properties of the soil and accordingly soils heave which occurs on soil surface. For this reason, in surveys related to this kind of soils, it is quite important to determine the swelling properties of soils and appropriate stabilisation methods. Literature contains a vast number of stabilising techniques such as; lime, cement, fly ash, bitume and resin for treatment of expansive soils. Financial perspective of these techniques is very important. Therefore, the primary purpose is low cost for the best treatment. In this study, a laboratory model study was conducted in order to determine the performance of gypsum column technique on treatment of clay soils. For this purpose, gypsum column was built in a field model which built in the laboratory and the changes on swelling of the soil was determined depending on the distance from the column. By using the obtained model data, the performance of gypsum column technique was analyzed and discussed.

Keywords: Clay Soils, Stabilization, Swelling, Gypsum Column, Laboratory Model

GİRİŞ

Yeryuvarı üzerinde sıkça karşılaşılan zemin sorunları arasında çökme, şişme, dispersif özellik gösteren zeminler bulunmaktadır. Sorunlu zeminler zemin mekaniği açısından ciddi sorunlar teşkil etmektedir. Özellikle şişebilen killi zeminlerde hafif yapıların temel tasarımlarında dikkate alınması gereken en önemli zemin davranışı şişme özelliği ve buna bağlı olarak yüzeyde meydana gelecek zemin kabarmalarıdır. Bu nedenle, yapılarla ilgili zemin araştırmalarında söz konusu killi zeminin şişme potansiyeli, şişme sonucunda oluşacak maksimum basınç düzeyi ve buna bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşacak kabarma miktarının belirlenmesi ve öngörülmesi çok büyük önem taşımaktadır.

Şişen zeminler suyla karıştırıldıklarında hacim değişimi gösteren ve üzerinde bulunan yapılara ve kazık destek sistemlerine zarar verebilen, yarı kurak veya kurak iklimlerde oluşmuş killerdir. Şişme özelliğinin montmorillonit ve illit tipi killere özgü bir olay olduğu söylenebilir. Bazı durumlarda killer tek, bazılarında ise üç boyutta şişme özelliği göstermektedir. Bazen de zeminlerde yanal şişme basıncı düşey yöndeki değerinin iki katına çıkabilmektedir. Toplam su içeriği ve su tutma enerjisi, killerin tüm özelliklerini etkileyen en önemli iki faktördür. Su içeriği, kıvam, dayanım ve yoğunluk, su tutma enerjisi ise hacimsel değişim, konsolidasyon ve hidrolik iletkenlik gibi temel özellikleri etkiler. Mühendislik uygulamalarının hemen hepsi kildeki doğal su içeriğini bozar. Kil üzerine uygulanan gerilmeler, doğal ve yapay yükler kilin yapısında nem hareketine neden olur ve killerdeki hacimsel değişimler genellikle bu nem hareketi ile kontrol edilir. Killerde nem hareketi, kil-su sistemi içerisinde içsel eğimden kaynaklanan

kuvvetlerle oluşur. İçsel eğim, sıcaklık değişimi, doygunluğun artması ve kimyasal bileşimdeki değişimlerden kaynaklanır. Killerde kuruma sonucu büzülme, su emme sonucu şişme gibi istenmeyen sonuçlar nem hareketlerinden dolayı oluşur.

Bu zeminler örneğin sadece Amerika'da binalara, yollara, hava alanlarına ve diğer tesislere bir yılda yaklaşık 9 milyar dolar zarar vermektedir. Bu miktar depremlerden, taşkınlardan, kasırgalardan ve hortumlardan kaynaklanan hasarın neredeyse iki katıdır (Jones ve Holtz, 1987). Bir kıyaslama yapılması amacıyla Çizelge 1' de Amerika'da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar miktarları verilmiştir.

Çizelge 1. Amerika'da şişen zeminlerden kaynaklanan yıllık hasar (Jones ve Holtz, 1987) .

Table 1. The annual damages in America sourced from the expansive soils (Jones and Holtz, 1987).

Kategori	Yıllık Hasar (U.S. \$)
Karayolları ve caddeler	4 550 000 000
Ticari binalar	1 440 000 000
Müstakil evleri	1 200 000 000
Yaya yolları, taşıt yolları ve park alanları	440 000 000
Gömülü kamu kuruluşları ve servisleri	400 000 000
Çok katlı binalar	320 000 000
Havaalanı tesisleri	160 000 000
Yerleşim alanı heyelanı	100 000 000
Diğer	390 000 000
Toplam yıllık hasar (1987)	9 000 000 000

Şişebilen killi zeminlerin şişme potansiyelleri; üzerlerinde bulunan örtü gerilmesine, yük kaldırılmasına veya su içeriğindeki artışlara bağlıdır. Bell ve Maud (1995), Yılmaz ve Karacan (1997) ve Yılmaz

(2007 a, b) özellikle hafif yapıların şişme ile meydana gelen zemin kabarmalarına karşı yeterli miktarda mukavemet gösterememelerinin yapı üzerinde çok şiddetli hasarların oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Bir zemini problemlili olarak değerlendiren mühendis aşağıdaki yöntemlere başvurur;

1. Problemlili zemin kaldırılarak yerine daha uygun özellikteki zemin uygun tekniklerle yerleştirilir. Bu yöntem zemin hacmi büyüdükçe ekonomiklikten uzaklaşmaktadır.
2. Mühendislik projesinin boyutlarını zeminin durumuna uygun olarak seçmek veya sorunlu zemini aşarak yapıyı alttaki sağlam zemine taşımak. Bu yöntem de bazen ekonomiklikten uzaktır.
3. Zeminin özelliklerini istenilen yönde değiştirmek. Bu tür uygulamalar yüzyıllardan beri uygulanmakta olup zemine kimyasal maddeler katmak, zemini ısıtmak, dondurmak, sıkıştırmak gibi işlemlerle zeminin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntem ekonomik olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Şişen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerin başında iyileştirme kimyasalları ve finansal boyutun önemi büyüktür. Bu nedenle düşük maliyette en iyi iyileştirmenin yapılması birincil amaçtır.

Zemin iyileştirilmesi çok eski zamanlardan beri kullanılmakta olup mekanik iyileştirmenin yeterli olmadığı durumlarda kimyasal iyileştirme yöntemleri daha çok tercih edilmektedir. Kimyasal iyileştirmede zemine çeşitli katkı maddeleri katılarak zeminin özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bugüne kadar reçineden mermer tozuna kadar pek çok katkı maddesi denenmiş olmakla birlikte literatürde en

sık kullanılan katkı maddeleri kireç, uçucu kül ve çimento olarak sayılabilir (Van Impe, 1989).

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi sırasında katkı maddesi zeminle yüzeysel olarak karıştırılır ya da zemin içerisinde kolonlar oluşturulur. Kolon uygulamasındaki temel amaç katkı maddesinin kolonu çevreleyen zemine zamanla difüzyonu ile zeminin özelliklerini iyileştirmesidir. Literatürde en sık olarak kireç kolonu tekniği kullanılmakla beraber uçucu kül ve çimentonun kullanıldığı kolon uygulamaları da mevcuttur.

Şişebilen sorunlu zeminleri iyileştirme amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiş ve killi zeminlerin iyileştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinin kireç, uçucu kül, çimento ve bunların değişik oranlardaki katkıları şeklinde olduğu görülmüş olmakla beraber ulusal ve uluslararası literatürde bu konuda yayınlanmış (Townsend ve Kylv, 1966; Brandl, 1981; Handy ve Williams, 1967; Tystovich vd., 1971; Broms ve Boman, 1979; Terashi vd., 1980; Locat vd., 1990; El-Rawi ve Awad, 1981; Holm ve Broms, 1981; Kitsugi ve Azakami, 1982; Transportation Research Board, 1987; Mathew ve Narasimha, 1997; Ferguson, 1993; Popescu vd., 1997; Basma vd., 1998; Nalbantoğlu ve Güçbilmez, 2001; Okagbue ve Onyeobi, 1999; Akawwi ve Kharabsheh, 2000; Ji-ru ve Xing, 2002; Tonoz vd., 2003; Amu vd., 2005; Al-Mukhtar vd., 2012; Gyanen vd., 2013; Abiodun ve Nalbantoglu, 2015; Garzón vd., 2016; Singh vd., 2017; Vitale vd., 2017; Zhu vd., 2018) bir çok çalışma vardır.

Jipsin kullanımına ilişkin çalışma sayısı ise oldukça az olmakla birlikte özellikle son bir kaç yılda ilgili çalışmalarda artış gözlenmektedir. Benzer şekilde bu çalışmalar; jipsin tek başına ve/veya diğer malzemelerle değişik oranlarda karışımları şeklinde literatürde (FIPR., Florida Institute of Phosphate Research, 1988; Çetiner,

2004; Ameta vd., 2007; Yılmaz ve Civelekoğlu, 2009; Küçükali, 2011) bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardan da görülebileceği gibi jipsin katkı maddesi olarak kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar oldukça sınırlı miktardadır. Bu çalışma kapsamında şişen killi zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolunun performansının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir laboratuvar model çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zeminlerin jips kolunu kullanarak iyileştirilmesi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan bu çalışma ile hem jipslerin katkı maddesi olarak şişebilen zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğine ilişkin yakın zamanda gerçekleştirilmiş çalışmaların devamı olarak katkı konulması, hem de oldukça ucuza mal edilebilen jipsle iyileştirmenin “jips kolonu” uygulaması ve performansının ortaya konulması ile arazi uygulamaları bakımından altlık oluşturulması amaçlanmıştır.

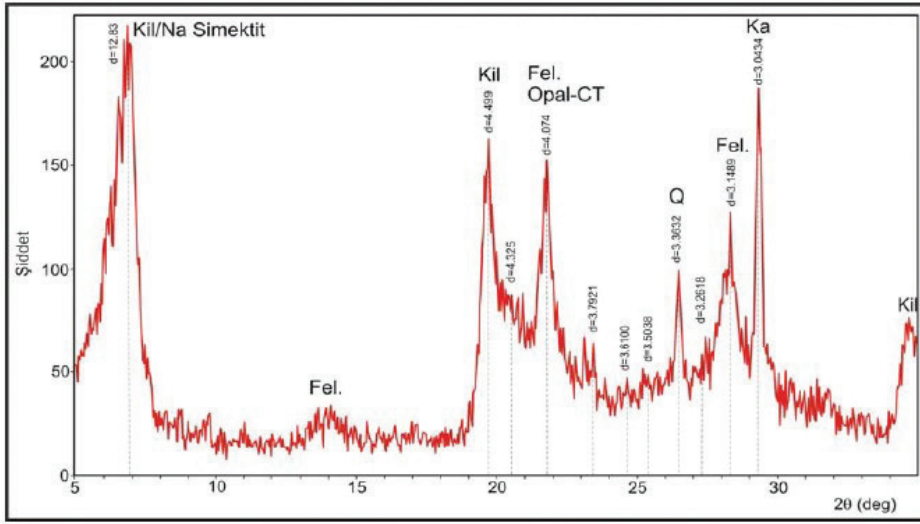
MATERYAL VE METOD

Kullanılan Bentonit ve Jipsin Özellikleri

Bentonitler volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışmasıyla veya bozulmasıyla olmuşlardır. İçerisinde büyük oranda montmorillonit minerali bulundurmasının yanı sıra alüminyum ve magnezyumca da zengin bir kil mineralidir. Bentonit ($Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$) genel formülü ile tanımlanmakta olup plastiklik özelliği yüksek, konkoidal yapıda

olup kolaylıkla şekil verilebilen bir kil çeşidi olarak bilinmektedir (Gillson, 1960; Grim, 1968; Murray, 1991). Bentonitin içinde doğal katkı maddesi olarak kaolin ve illit gibi kil mineralleri ile jips, kuars, rutil, kalsit, dolomit ve volkanik kül gibi kil dışındaki minerallerde yer alabilmektedir. Bentonitler su ile temas ettiklerinde değişken seviyelerde şişme gösterirler. Şişme özelliklerine ve değişebilen iyonlarına göre 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; sodyum bentonit (Na-B), sodyum-kalsiyum bentonit (Na, Ca-B) ve kalsiyum bentonit (Ca-B) şeklinde tanımlanırlar. Sodyum bentonitler su ile temas haline geçtiklerinde fazla şişerken, sodyum-kalsiyum bentonitler orta derece de şişme göstermekte, kalsiyum bentonitler ise oldukça az şişmektedir.

Bu çalışmada kullanılan bentonit Reşadiye'nin 25 km kuzeyinde yer alan Savaş A.Ş. tarafından işletilen kil yataklarından alınmıştır. Kullanılan bentonit, doğal, saf ve işlem görmemiş sodyum bazlı malzemeler arasından seçilmiştir. Söz konusu bentonit Yılmaz ve Civelekoğlu (2009) tarafından yapılan çalışmada da kullanılmıştır. Dolayısıyla bentonite ait XRD difraktomu Yılmaz ve Civelekoğlu (2009)'nun çalışmasından elde edilmiştir. Şekil 1 ve 5'de verilen karakteristik difraktogramda da görüldüğü gibi kullanılan bentonit, Na-Simektit (montmorillonit) türü kil minerali içermekte olup çok küçük miktarda feldispat, kalsit ve opal-CT gözlenmiştir (Çizelge 2).



Şekil 1. Kullanılan bentonite ait karakteristik XRD difraktogramı (Yılmaz ve Civekoğlu, 2009).

Figure 1. Characteristic XRD graph for the used bentonite (Yılmaz and Civekoğlu, 2009).

Çizelge 2. XRD (Tüm Kayaç) analizi sonuçları ve kullanılan bentonitin kimyasal bileşimi (Yılmaz ve Civekoğlu, 2009).

Table 2. The results of the XRD (whole rock) analyses and the chemical composition of the used bentonite (Yılmaz and Civekoğlu, 2009).

Mineral Yüzdesi	Oran
Na-Smektit (%)	81
Feldispat (%)	7
Kuvars (%)	2
Kalsit (%)	2
Opal- CT (%)	8

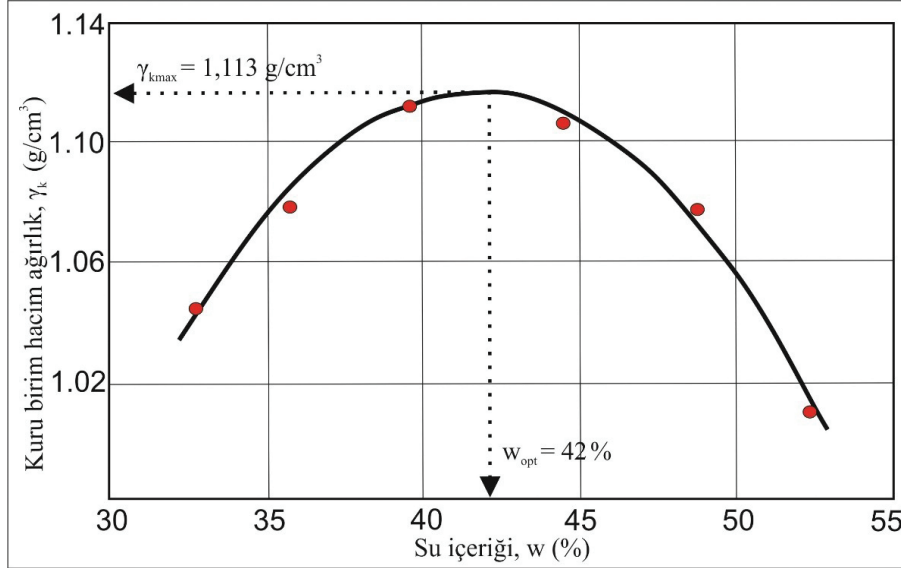
Optimum Su İçeriği ve Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı

Çalışmada kullanılan bentonitin optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim

ağırlığını bulmak amacıyla ASTM D-698 (1994) standardına uygun olarak Standart Proktor deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 2’de sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre söz konusu bentonitin optimum su içeriği (w_{opt}) %42, maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ise 1.113 g/cm³ olarak bulunmuştur.

Atterberg Sınırları

Çalışmada kullanılan bentonit üzerinde BS 1377 (1975)’ye uygun olarak likit limit (LL) ve plastik limit (PL) deneyleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3). Elde edilen likit limit ve plastik limit değerleri kullanılarak bentonitin plastisite indeksi (I_p) hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; bentonitin ortalama likit limit değeri % 240.2, plastik limiti % 57.4 ve plastisite indeksi ise % 182.8 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. Bentonite ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriğini (w_{opt}) gösteren kompaksiyon eğrisi.

Figure 2. The compaction curve of bentonite showing the maximum dry unit weight (γ_{kmax}) and optimum water content (w_{opt}).

Çizelge 3. Kullanılan bentonitin Atterberg sınırları değerleri.

Table 3. Atterberg limit values of the used bentonite.

Atterberg sınırları	Değerler
Likit limit (%)	240.2
Plastik limit (%)	57.4
Plastisite indeksi (%)	182,8

Şişme

Söz konusu bentonitin şişme yüzdesini belirlemek amacıyla optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler üzerinde ASTM D – 4546 (1994) standartlarına uygun olarak şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında, 0.07 kg/cm² yük altında suya doyurulan 7.5 cm çaplı numunenin maksimum hacimsel şişmesi sağlanmıştır. Deney sonunda

elde edilen numune yüksekliğinin ilksel numune yüksekliğine oranı ile şişme yüzdesi (%S) elde edilmiştir. Buna göre söz konusu bentonitin şişme yüzdesi % 65 olarak bulunmuştur.

Dayanım

Bentonit kilinin dayanımının belirlenmesi amacıyla ASTM- D 2166 (1994) standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri (UCS) yapılmıştır. Deney kapsamında optimum su içeriğinde sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerden alınan 99 mm yükseklikte ve 49.4 mm çaplı örnekler üzerinde yenilme gerçekleşinceye kadar 1 mm/dk sabit yükleme hızı uygulanmıştır. Bu deney üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiş ve ortalama değer kaydedilmiştir (Şekil 3). Deney sonuçları Çizelge 4'de sunulmuştur. Deney sonuçlarının ortalaması alındığında kullanılan bentonitin serbest basınç dayanımı 57.1 kPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 4. Kullanılan bentonite ait UCS sonuçları.

Table 4. UCS values of the used bentonite.

Deney No	F, Yenilme anında yük (kg)	A, Yüzey alanı (cm ²)	σ , Gerilme (kg/cm ²)	σ , Gerilme (kPa)
1	10.9	19.156	0.574	56.3
2	11.1	19.156	0.581	57.0
3	11.3	19.156	0.591	58.0

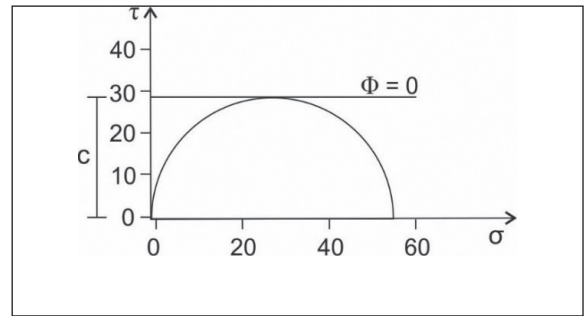
Ayrıca, yenilme anındaki gerilme durumunu gösteren Mohr dairesi ve drenajsız kayma dayanımı zarfı çizilerek örneğin kohezyon değeri

bulunmuştur. Buna göre çalışmada kullanılan bentonitin içsel sürtünme açısı (Φ) = 0 ve kohezyonu (c) = 28.6 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 4).



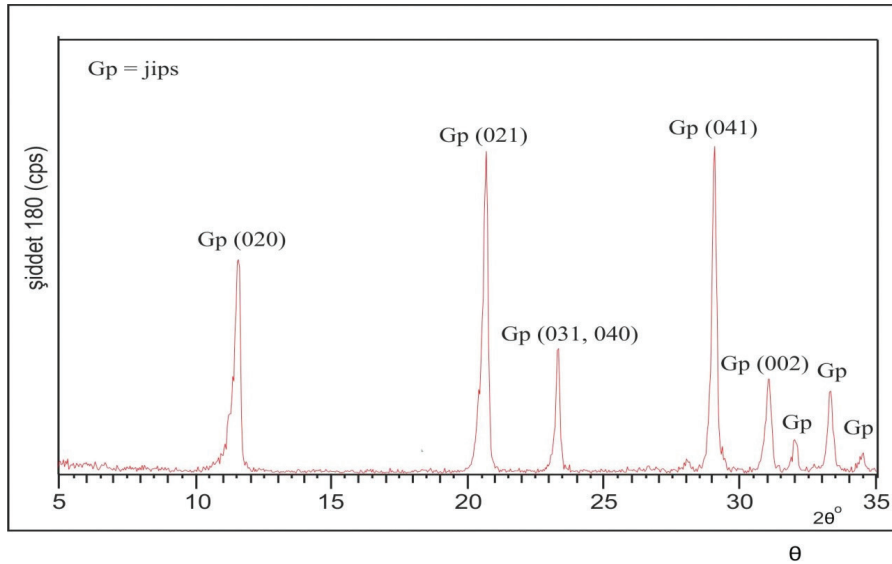
Şekil 3. UCS deneyi gerçekleştirilen numuneler.

Figure 3. The samples tested by UCS.



Şekil4. Mohr dairesi ve sonuçlarının değerlendirilmesi.

Figure 4. The Mohr circles and the evaluation of the results.



Şekil 5. Kullanılan jipse ait karakteristik XRD difraktogramı.

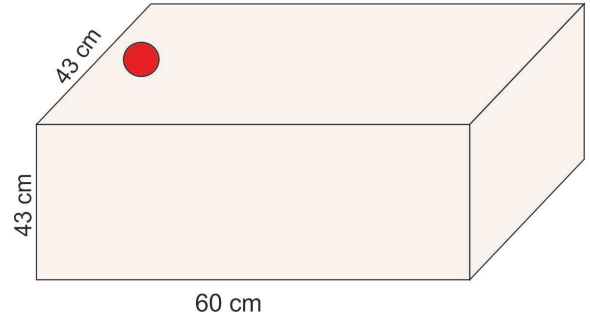
Figure 5. Characteristic XRD graph for the used gypsum.

Laboratuvar Modelinin Oluşturulması

Çalışma kapsamında laboratuvar model oluşturularak şişen zeminlerin iyileştirilmesinde jips kolonun performansı araştırılmıştır. Laboratuvar modelinin oluşturulması amacıyla ilk olarak bentonit karıştırıcı kazanda optimum su içeriğinde karıştırılarak deney numunesi elde edilmiştir. Elde edilen deney numunesi 43 cm x 60 cm x 43 cm boyutunda çelik bir kasa içerisinde benzinli taşınabilir tokmak (zıp zıp) yardımı ile 3 katman halinde sıkıştırılmıştır. Ardından, kasanın kısa kenarına yakın bir noktada 50 mm çapında bir delik açılmıştır. Bu deliğe jips doldurularak jips kolonu oluşturulmuştur. Nem kaybı ve dolayısı ile su içeriği değişimini engellemek amacıyla modelin üzeri jeotekstille hava ile temasını engelleyecek biçimde kapatılmıştır. Oluşturulan laboratuvar modeli ve modelin kesiti sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’ de verilmiştir.

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla yapılan kolon uygulaması ile ilgili çalışmalarda kür süresinin 28 gün ve 2 yıl arasında olması

gerektiği önerilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada kür süresi 3 ay olarak seçilmiştir. Oluşturulan modelde kür süresi boyunca kolondan su girişi sağlanarak jipsin kolonu çevreleyen zemine göç etmesi sağlanmıştır. Bu amaçla plastik bir boruda düzenli aralıklarla delikler açılmış ve borunun çevresi filtre kağıdıyla kaplanmıştır. Hazırlanan boru jips kolonunun merkezine yerleştirilerek su girişi sağlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 6. Oluşturulan laboratuvar modelinin kesiti.

Figure 6. The cross-section of the designed laboratory model.



Şekil 7. Oluşturulan laboratuvar modeli.

Figure 7. The designed laboratory model.

3 aylık kür süresi sonunda laboratuvar modelinin üzeri açılarak jips kolonunun performansını incelemek amacıyla kolondan itibaren artan mesafelerde örselenmemiş örnekler alınmıştır. Örnek alım düzeni Şekil 9 ve Şekil 10' da verilmiştir.

Alınan örnekler üzerinde serbest basınç deneyi, serbest şişme deneyi ve Atterberg limit deneyleri yapılmıştır. Ayrıca suyun zemin içerisindeki göç mesafesini gözlemlemek amacıyla alınan örneklerin su içeriği değerleri belirlenmiştir. Buradaki temel gerekçe, jips içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine suyun akışı yardımıyla göç etmesi şeklinde bir hareketin sağlanmasına yöneliktir. Dolayısıyla, su içeriğindeki değişimler incelenerek jipsin göç mesafesine yönelik olarak da yaklaşımlarda bulunulabilir.



Şekil 10. Laboratuvar modelinden örnek alım düzeni.

Figure 10. The sampling order from the laboratory model.

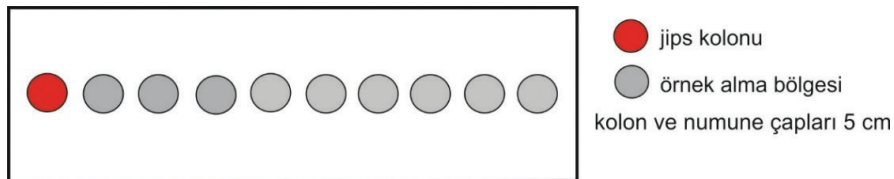


Şekil 8. Modele su girişinin sağlanması.

Figure 8. Water inlet to the model.

BULGULAR

Jips kolonundan itibaren değişik mesafelerde alınan örnekler üzerinde yapılan Atterberg limitleri deneylerinin sonuçları Çizelge 5' de sunulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, zeminin likit limit değeri kolondan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde % 240.2' den % 205' e düşerken plastik limit değeri % 57.4' den % 52' ye azalmıştır. Bu mesafeden sonra ise, iyileştirilmemiş zeminin likit limit ve plastik limit değerine yakın değerler gözlenmiştir.



Şekil 9. Laboratuvar modelinden örnek alım düzeninin kesiti.

Figure 9. The cross-section of the sampling order from the laboratory model.

Çizelge 5. Jips kolonundan itibaren alınan numunelere ait Atterber limitleri değerleri.

Table 5. Atterberg limit values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Likit Limit (LL)	205	238	236	241	243	240	238	242	240
Plastik limit (PL)	52	62	57	60	60	61	58	59	59
Plastisite İndeksi (Ip)	153	176	179	181	183	179	180	183	181

Şekil 11’de zeminin plastisite indeksi değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere zeminin plastisite indeksi değerinde kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafe içerisinde azalma gözlenirken bu mesafeden sonra tekrar bir artış başlamıştır ve değerler neredeyse sabit bir seyir izlemiştir.

Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri Çizelge 6’ da verilmiştir.

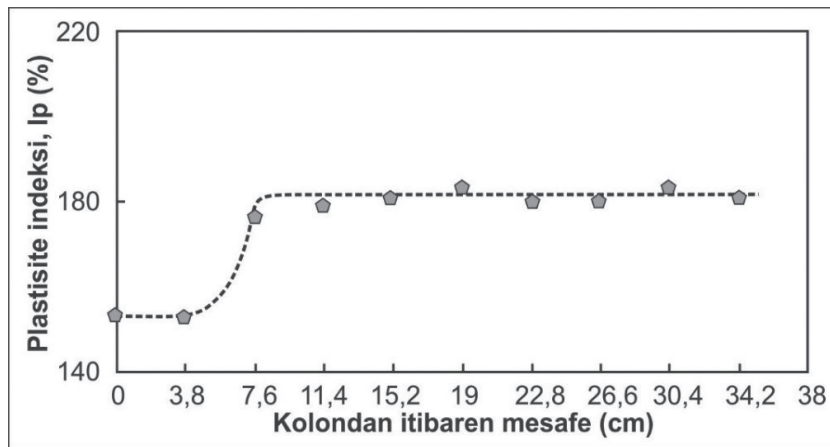
Daha önceden de belirtildiği üzere iyileştirilmemiş zeminin tek eksenli basınç dayanımı 57.1 kPa olarak bulunmuştu. Çizelge 6’ da verilen sonuçlar incelendiğinde ise zeminin serbest basınç dayanımı değerinin 3.8 cm’ lik bir mesafe içerisinde 66.5 kPa’ a yükseldiği görülmektedir. Ancak, bu mesafeden sonra tekrar azalarak sabit bir değer seyretmiştir.

Serbest basınç dayanımı değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi Şekil 12’de sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere

Çizelge 6. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest basınç dayanımı ve kohezyon değerleri.

Table 6. Uni-axial compressive strength and cohesion values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
UCS (kPa)	66.5	58.8	57.1	59.0	57.0	56.4	56.1	58.9	56.7
Kohezyon (kPa)	33.2	29.4	28.6	29.5	28.5	28.2	28.0	29.4	28.3

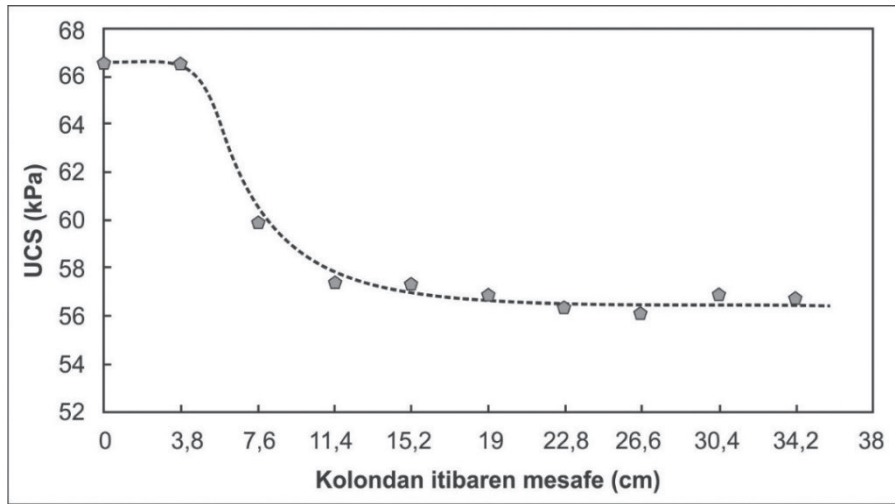


Şekil 11. Plastisite indeksi değerlerinin kolondan itibaren olan mesafe ile olan değişimi.

Figure 11. The changes on the plasticity index depending on the distance from gypsum column.

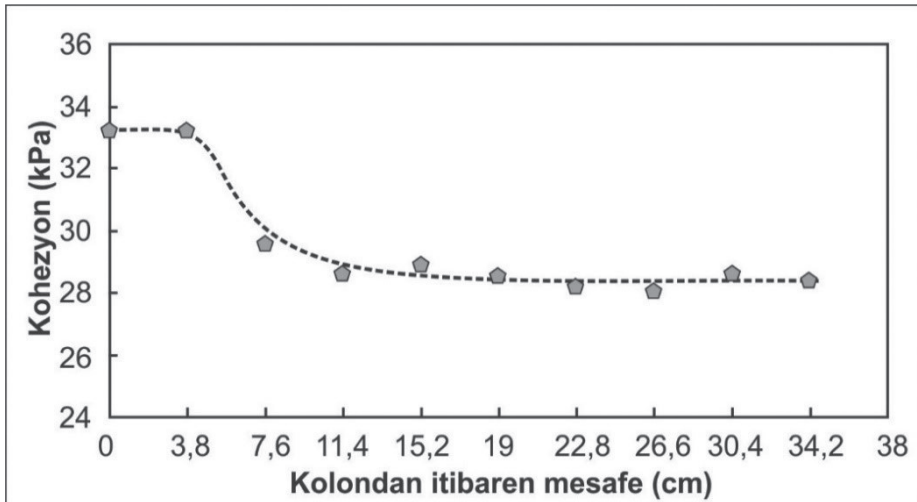
zeminin tek eksenli basınç dayanımı değeri kolondan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde artmakta, bu mesafeden sonra tekrar azalmakta ve iyileştirilmemiş zeminin tek eksenli basınç dayanımına yakın sonuçlar vererek devam etmektedir.

Ayrıca örneklerin kohezyon değerleri incelendiğinde ise, yine kolondan itibaren 3.8 cm'lik mesafe içerisinde 28.55 kPa'dan 33.2 kPa' a yükseldiği, ancak bu mesafeden sonra tekrar azaldığı gözlenmiştir. Kohezyon değerinin kolondan itibaren değişimi Şekil 13' de verilmiştir.



Şekil 12. Gips kolonundan itibaren tek eksenli basınç dayanımındaki değişim.

Figure 12. The changes on the uni-axial compressive strength depending on the distance from gypsum column.



Şekil 13. Gips kolonundan itibaren kohezyon değerlerindeki değişim.

Figure 13. The changes on cohesion depending on the distance from gypsum column.

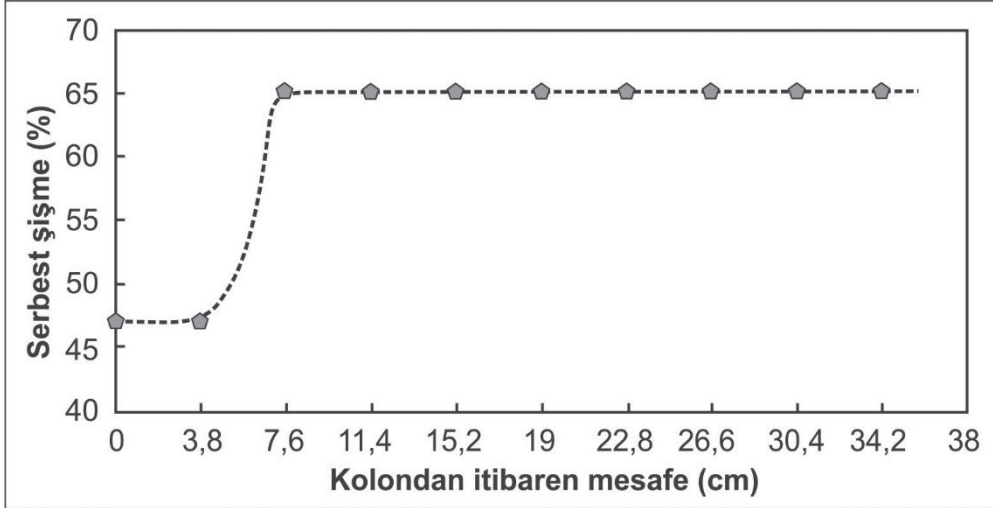
Zeminin serbest şişme değerindeki değişimler incelendiğinde iyileştirilmemiş zeminin serbest şişme değeri % 65 olarak ölçülmüştür. Çizelge 7’ de verilen sonuçlar incelendiğinde ise, zeminin şişme değerinin kolondan itibaren 3.8 cm’lik mesafe içerisinde % 47’ye düştüğü görülmektedir.

Zeminin serbest şişme değerlerinin jips kolonundan itibaren olan mesafe ile değişimi ise Şekil 14’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafe içerisinde zeminin şişme değerinde bir azalma gözlenmektedir. Bu mesafeden sonra yine artışın olduğu sabit bir seyir izlemiştir.

Çizelge 7. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin serbest şişme değerleri.

Table 7. Free swelling values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Serbest şişme (%)	47	65	65	65	65	65	65	65	65



Şekil 14. Jips kolonundan itibaren serbest şişmedeki değişim.

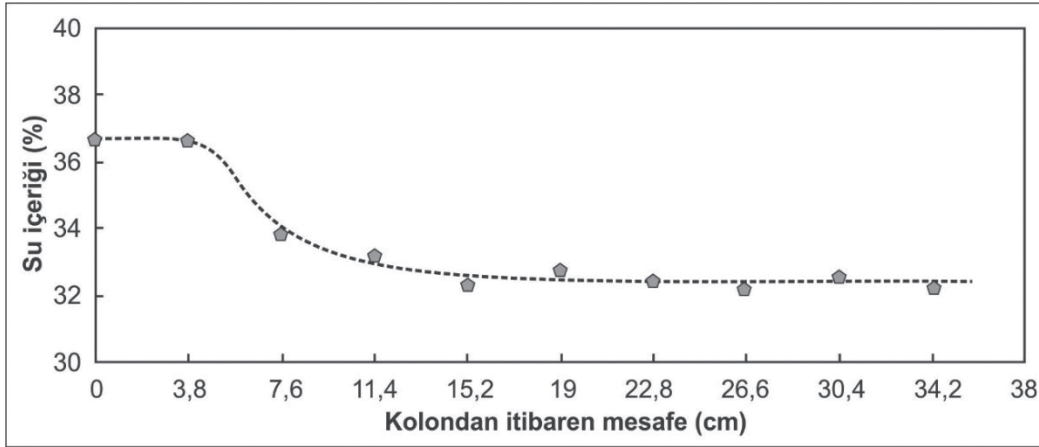
Figure 14. The changes on the free swelling depending on the distance from gypsum column.

Çizelge 8. Jips kolonundan itibaren alınan numunelerin su içeriği değerleri.

Table 8. Water content values of the samples taken in the order of distance from gypsum column.

Kolondan itibaren olan mesafe (cm)	3.8	7.6	11.4	15.2	19	22.8	26.6	30.4	34.2
Su içeriği (%)	37	34	34	32	33	32	32	33	33

Jips içerisindeki iyonların kolonu çevreleyen zemin içerisine olan göç mesafesine yaklaşımda bulunabilmek amacıyla hesaplanan su içeriği değerleri Çizelge 8’ de sunulmuştur. Ayrıca su içeriğinin kolondan itibaren olan mesafe ile değişimi Şekil 15’ de verilmiştir. Su içeriğindeki değişimler incelendiğinde, diğer deney sonuçlarını doğrulayacak biçimde, kolondan itibaren 3.8 cm’lik bir mesafede yüksek su içeriği değeri gözlenirken bu mesafeden sonra azalarak sabit bir seyir izlemektedir. Dolayısıyla, jips içerisindeki iyonların ancak bu mesafeye kadar göç edebildiği sonucuna varılabilir.



Şekil 15. Jips kolonundan itibaren su içeriğindeki değişim.

Figure 15. The changes on the water content depending on the distance from gypsum column.

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında killerin iyileştirilmesinde jips kolonu tekniğinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvar ölçekli bir model oluşturularak jips kolonundan itibaren değişik mesafelerde kilin fiziksel, şişme ve dayanım özelliklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiş ve tartışılmıştır.

1. Jips kolonundan itibaren 3.8 cm'lik bir mesafe içerisinde, deneyde kullanılan kilin likit limit değerinde % 240.2' den % 205' e, plastisite indeksi değerinde ise % 182.8' den % 153' e bir düşüş gözlenmiştir. Plastisite indeksi ve likit limit değerlerindeki düşüşün sebebi kildeki tek değerlikli sodyum iyonlarının jipsin içerisindeki kalsiyum iyonlarıyla yer değiştirmesi ile meydana gelen çift tabaka kalınlığındaki azalma şeklinde yorumlanmıştır. Plastisite indeksi ve likit limit değerinde bir düşüş gözlenmesine rağmen zemin hala CH sınıfındadır. Dolayısıyla sınırlı bir iyileştirme söz konusudur. 3.8 cm' lik mesafeden sonra kilin plastisite indeksi ve likit limit değerleri

tekrar artmış ve iyileştirilmemiş kilin plastisite indeksi ve likit limit değerlerine yakın değerlerde seyretmiştir.

- Jips kolonundan itibaren yine 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde kilin şişme yüzdesinin % 65' den % 47' ye düştüğü gözlenmiştir. Bu mesafeden sonra şişme değerlerinde tekrar bir artış olmuş ve iyileştirilmemiş kilin şişme değerine yakın bir seyir izlemiştir. Kilin şişme yüzdesinde meydana gelen azalmanın sebebi, kil içerisindeki Na^+ iyonlarının jipsin içerisindeki Ca^{2+} iyonu ile yer değiştirmesi sonucu Na-montmorillonitin, Ca-montmorillonite dönüştürülmesi nedeniyledir. Bilindiği üzere, Na-montmorillonit Ca-montmorillonite oranla oldukça fazla şişme özelliği göstermektedir. Şişme yüzdesindeki bu düşüşün kolondan itibaren sadece 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde gözlenmesi, Ca^{2+} iyonunun ancak bu mesafeye kadar göç edebildiğini göstermektedir.
- Kilin dayanımındaki değişimler incelendiğinde, serbest basınç dayanımının kolondan itibaren 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde 57.1 kPa'dan 66.5 kPa'a yükseldiği gözlen-

miştir. Bu mesafeden sonra ise serbest basınç dayanımı tekrar azalarak sabit bir seyir izlemiştir.

4. Jips kolonundan itibaren kilin su içeriği değerlerinde ilk 3.8 cm' lik mesafeden sonra düşüş gözlenmiştir. Su içeriğinin bu mesafeden sonra düşmesi suyun ancak bu mesafeye kadar ulaşabildiğini ifade etmektedir. Yapılan literatür araştırmalarına göre killi zeminlerde iyon göçünün olabilmesi için suyun varlığı gerekmektedir. Dolayısıyla, jips içerisindeki Ca^{2+} iyonunun göçü suyun ulaşabildiği alanla sınırlı kalmıştır.
5. Kile ait ölçülen bütün özellikler jips kolonundan itibaren 3.8 cm' lik bir mesafe içerisinde değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla, iyileştirme kolon çapının % 76' sı diğer bir deyişle kolon çapının 0.76 katı kadar bir mesafe içerisinde sağlanabilmiştir. Bu iyileştirme mesafesi zemin iyileştirme çalışmalarında arzu edilen bir mesafe değildir. İyileştirme mesafesinin bu kadar düşük çıkmasının sebepleri incelendiğinde en önemli sebebin Ca^{2+} iyonunun daha fazla mesafelere geçememesi şeklinde yorumlanabilir. Bunun en önemli sebebi ise kullanılan bentonitin çok düşük geçirimsizliğe sahip olmasından dolayı suyun zemin içerisindeki akışının sağlanamamasıdır. Dolayısıyla, daha yüksek geçirimsizliğe sahip sorunlu bir zemin kullanıldığı takdirde daha büyük göç mesafeleri sağlanabilir ve daha iyi kolon performansı elde edilebilir. Sonuç olarak, jips kolonun performansı kullanılan zeminin özelliklerine de bağlıdır. Ayrıca, kolon çapı ve kür süresi de kolon performansını etkileyen faktörler arasındadır. Daha büyük kolon çapları kullanılarak ya da daha fazla

bir kür süresi seçilerek daha iyi sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Ancak, bu yaklaşımların deneysel verilerle desteklenmesi de gerekmektedir. Dolayısıyla, yukarıdaki yaklaşımların desteklenmesi için daha ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirilerek deneysel veriler elde edilmelidir.

6. Zemin iyileştirme çalışmalarında her ne kadar kireç diğer katkı maddelerine oranla daha yaygın olarak kullanılıyor olsa da jipsin yaygın olarak bulunması ve kirece göre 2-3 kat daha ucuz olması, jipsle yapılan iyileştirme çalışmalarında önemli bir avantaj oluşturmaktadır.
7. Jips kolonu ile yapılan iyileştirme çalışmalarında jipsin yeraltı suyu kirliliğine sebep olabileceği göz önüne alınmalıdır. Ayrıca, jipsin beton yapılarla temas edebileceği durumlarda sülfat etkisine dirençli çimento kullanımına da gerek duyulabilir.

KAYNAKLAR

- Abiodun, A.A., Nalbantoglu, Z., 2015. Lime pile techniques for the improvement of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 52, 760-768.
- Akawwi, E., Kharabsheh, A., 2000. Lime stabilization effects on geotechnical properties of expansive soils in Amman, Jordan. *Journal of Geotechnical Engineering*, 5, 201-210.
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S., Alcover, J.S., 2012. Microstructure and Geotechnical Properties of Lime-Treated Expansive Clayey Soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27.
- Ameta, N.K., Prohit, D.G.M., Wayal, A.S., Sandeep, D., 2007. Economics of stabilizing bentonite soil with lime-gypsum. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 12, Bundle E.

- Amu, O.O., Fajobi, A.B., Afekhuai, S.O., 2005. Stabilizing potential of cement and fly ash mixture on expansive clay soils. *Journal of Applied Sciences*, 5, 1669-1673.
- ASTM D-698, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- ASTM D-4546, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- ASTM-D 2166, 1994. Soil and Rock: Sec. 4, V. 04.08. American Society for Testing and Materials. Designation: D-4546.
- Basma, A.A., Al-Rawas, A., Al-Saadi, S.N., Al-Zadjali, T.F., 1998. Stabilization of expansive clay in Oman. *Environmental and Engineering Geoscience*, 4, 503-510.
- Bell, F.G., Maud, R.R., 1995. Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: a viewpoint from Natal, South Africa. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1, 41-59.
- BS 1377, 1975. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standards Institution, London.
- Brandl, H., 1981. Alteration of soil parameters by stabilization with lime. *Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 587-594.
- Broms, B., Boman, P., 1979. Lime columns-a new foundation method. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105, 539-556.
- Çetiner, S.I., 2004. Şişen zeminlerin Çayırhan uçucu külü ve desülfojips ile stabilizasyonu, yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 107 s.
- El-Rawi, M.N., Awad, A.A.A., 1981. Permeability of lime stabilized soils. *Journal of Transportation Engineering Division, ASCE*, 107, 25-35.
- Ferguson, G., 1993. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, fly ash for soil improvement. *Geotechnical Special Publication*, 36, 1-15.
- FIPR (Florida Institute of Phosphate Research), 1988. Stabilization of phosphatic clay with lime columns. Report prepared by Bromwell and Carrier Inc. under a grant sponsored by the Florida Institute of Phosphate Research, Bartow-Florida, 102 p.
- Garzón, E., Cano, M., O'Kelly, B.C., Sánchez-Soto, P., 2016. Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, 329-334.
- Gillson, J.L., 1960. *Industrial Minerals and Rocks*. The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, 596 p.
- Gyanen, T., Savitha, A.L., Gudi, K., 2013. Laboratory study on soil stabilization using fly ash mixtures. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. Volume 2, Issue 1.
- Handy, R.L., Williams, N.W., 1967. Chemical stabilization of an active landslide. *Civil Engineering*, 37, 62-65.
- Holm, G., Broms, B.B., 1981. Lime columns as foundation for light structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm, 3, 687-694.
- Ji-ru, Z., Xing, C., 2002. Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition*, 17, 73-77.
- Jones, D.E., Holtz, W.G., 1987. The prediction and performance of structures on expansive soils. *ASCE, Civil Engineering*, 43, 87-89.
- Kitsugi, K., Azakami, H., 1982. Lime-column techniques for the improvement of clay ground. *Proceedings of the Symposium on recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, 1982, 105-115.
- Küçükali, Ö., 2011. Kireç ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme ve Dayanım Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 75 s.

- Locat, J., Berube, M.A., Choquette, M., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 294-304.
- Mathew, P.K., Narasimha, R.S., 1997. Effect of lime on cation exchange capacity of marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123, 183-185.
- Murray, H.H., 1991. Overview-clay mineral applications. *Applied Clay Science*, 5, 379- 395.
- Nalbantoğlu, Z., Güçbilmez, E., 2001. Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid environments. *Journal of Arid Environments*, 47, 453-463.
- Okagbue, C.O., Onyeobi, T.U.S., 1999. Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. *Engineering Geology*, 53, 371-380.
- Popescu, M.E., Constantinescu, T., Ferrando C., Quintavalle, F., 1997. Treatment of subgrade expansion soil at the extension of Bucharest-Otopeni International Airport. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, Athens, Greece, 331-338.
- Singh, S. P., Roy, N. Sangita, S., 2017. Strength and hydraulic conductivity of sedimented ash deposits treated with lime column. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11, 3-15.
- Tystovich, N.A., Abelev, M.Yu, Takhirov, I., 1971. Compacting saturated loeses soils by means of lime piles. *Proceedings of the 4th Conference on Soil Mechanics*, Budapest, 837-842.
- Terashi, M., Tanaka, H., Niidome, Y., Sakanoi, H., 1980. Permeability of treated soils. *Proceedings, 15th Japan Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 773-776.
- Townsend, D.C., Kylv, T.W., 1966. Durability of lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, 139, 25-41.
- Transportation Research Board, 1987. Lime stabilization: reaction, properties, design and construction. *Committee on Lime and Lime-fly ash Stabilization, State-of-the-Art-Report*, 5, Washington, D.C., 1-59.
- Tonoz, M.C., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 2003. A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, 91-106.
- Van Impe, W.F., 1989. *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*. A.A. Balkema, Rotterdam, 125 pp.
- Vitale, E., Deneele D., Paris, M., Russo, G., 2017. Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays. *Applied Clay Science*, 141, 36-45.
- Yılmaz, I., Karacan, E., 1997. Geotechnical properties of alluvial soils: an example from south of Sivas (Turkey). *IAEG Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 55, 159-165.
- Yılmaz, I., 2007a. *Mühendislik Jeolojisi – İlkeler ve Temel Kavramlar*, Teknik Yayınevi, Ankara, 490 s.
- Yılmaz, I., 2007b. The effect of swelling clays on a water transport canal between Köklüce HPP and Erbaa HPP (Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 467-472.
- Yılmaz, I., Civelekoğlu, B., 2009. Gypsum: An additive for stabilization for swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44, 166-172.
- Zhu, F., Li, Z., Dong, W., Ou, Y., 2018. Geotechnical properties and microstructure of lime-stabilized silt clay. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Doi: 10.1007/s10064-018-1307-5.



Araştırma Makalesi / Research Article

Düzce Kent Merkezi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Liquefaction Potential of Soils in Düzce City Center

Müge K. AKIN 

Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Sümer Kampüs, 38080 Kayseri

Geliş (Received): 19 Kasım (November) 2018 / Düzeltme (Revised): 01 Şubat (February) 2019 / Kabul (Accepted): 25 Şubat (February) 2019

ÖZ

Zemin sıvılaşması depremler sırasında suya doymuş bazı zeminlerde meydana gelen ve önemli düzeyde yüzey deformasyonlarına neden bir olaydır. Temel zeminin taşıma gücünü yitirmesi sebebiyle yapılarda oturma ve devrilme gibi önemli hasarlara yol açabilmektedir. Düzce ve yakın çevresi yeraltı suyu seviyesinin oldukça yüzeye yakın olduğu ve çoğunlukla siltli ve kumlu birimlerden oluşan düz bir ova üzerinde kurulmuştur. Bununla birlikte, Düzce ve yakın çevresi için Kuzey Anadolu Fay Zonu büyük depremler üretebilecek önemli bir sismik kaynaktır. Bu özellikler dikkate alındığında, olası büyük bir depremde Düzce ve yakın çevresinde sıvılaşma ve sıvılaşmaya bağlı yanıl yayılma türü yüzey deformasyonlarının meydana gelebileceği olasıdır. Bu çalışmada, Düzce'deki yerel zemin koşullarının ve yeraltı suyu durumunun belirlenmesi amacıyla yapılmış 40 adet jeoteknik sondaja ait veriden yararlanılmıştır. Arazi çalışmaları sonucu yeraltı suyu seviyesinin sığ ve zemin türünün de gevşek alüvyon olduğunun belirlenmesi nedeniyle Düzce kentinin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) yöntemi ile Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) yöntemleri esas alınarak Düzce ili için sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiş ve farklı deprem senaryolarına göre CBS ortamında her iki yöntemde göre sıvılaşma potansiyeli haritaları hazırlanarak karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında ön değerlendirmeye yönelik hazırlanan sıvılaşma haritalarına göre yeni yapılaşmaların arttığı inceleme alanının güney ve güneydoğu kesimlerinde sıvılaşma potansiyelinin yüksek-çok yüksek olduğu gözlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Düzce, Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, Sıvılaşma Şiddeti İndeksi, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Deprem

ABSTRACT

Soil liquefaction is one of the ground deformations occurred during an earthquake which may cause serious damages such as settlement and tilting of structures due to loss of bearing capacity of foundations. Düzce and its surrounding settle on a plain which consists of silty and sandy layers with shallow groundwater level. Besides, the North Anatolian Fault Zone is a major seismic source which is capable of producing large magnitude earthquakes. All these data point out that the ground deformations like liquefaction and lateral spreading may occur during a probable large earthquake around Düzce and its close vicinity. In this study, the geotechnical data of 40 boreholes drilled to determine the local ground conditions and the groundwater level in Düzce were considered. Based on the field studies, it was aimed to evaluate the liquefaction potential considering the fact that the groundwater level

is shallow as well as the subsurface soil is composed of loose alluvium. Liquefaction Potential Index (LPI) and Liquefaction Severity Index (LSI) methods were taken into account and the liquefaction potential of Düzce province was determined and mapped with respect to various earthquake scenarios in GIS environment. These maps are compared on the basis of different scenarios. Accordingly, it is concluded that the liquefaction potential is high-very high in the south and south-eastern sections of the study area where the construction of new residential buildings progressively continues.

Keywords: Liquefaction, Düzce, Liquefaction Potential Index, Liquefaction Severity Index, North Anatolian Fault Zone, Earthquake

GİRİŞ

Zemin sıvılaşması, deprem sırasında artan boşluk suyu basınçlarına bağlı olarak efektif gerilmenin ortadan kalkmasıyla özellikle kumlu zeminlerin sıvı gibi davranması sonucu meydana gelir. Bu olay, aynı zamanda gevşek, doygun kumlarda sıklığın ve dayanımın geçici olarak yitirilmesine neden olur. Yakın geçmişte de birçok örnekte yaşandığı gibi, 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda, sıvılaşmaya bağlı olarak ciddi hasarlar oluşmuştur. Sıvılaşma tanımı ilk olarak 1930'ların sonlarında Casagrande tarafından ortaya atılmıştır (Day, 2002). 19. yüzyılın ortalarına doğru sıvılaşma ve etkileri sıvılaşmaya bağlı etkilerin oldukça belirgin olarak gözlemlendiği iki önemli deprem sonrasında birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu depremler, 1964 yılındaki Alaska ve yine 1964 yılı içinde meydana gelen Niigata depremleridir. Her iki deprem de sıvılaşma açısından oldukça önemli veriler sunmuşlardır (Kramer, 1996). Daha yakın zamandaki 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli depremlerinde de birçok yapı sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası etkilere maruz kalmıştır.

Özellikle yapılaşmaya yönelik değerlendirmelerin yapıldığı alanlarda olası sıvılaşma etkileri senaryo depremler ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir. Bir bölgedeki zeminin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesine yönelik birçok yöntem önerilmiştir (Seed ve Idriss, 1971; 1982; Seed vd., 1985;

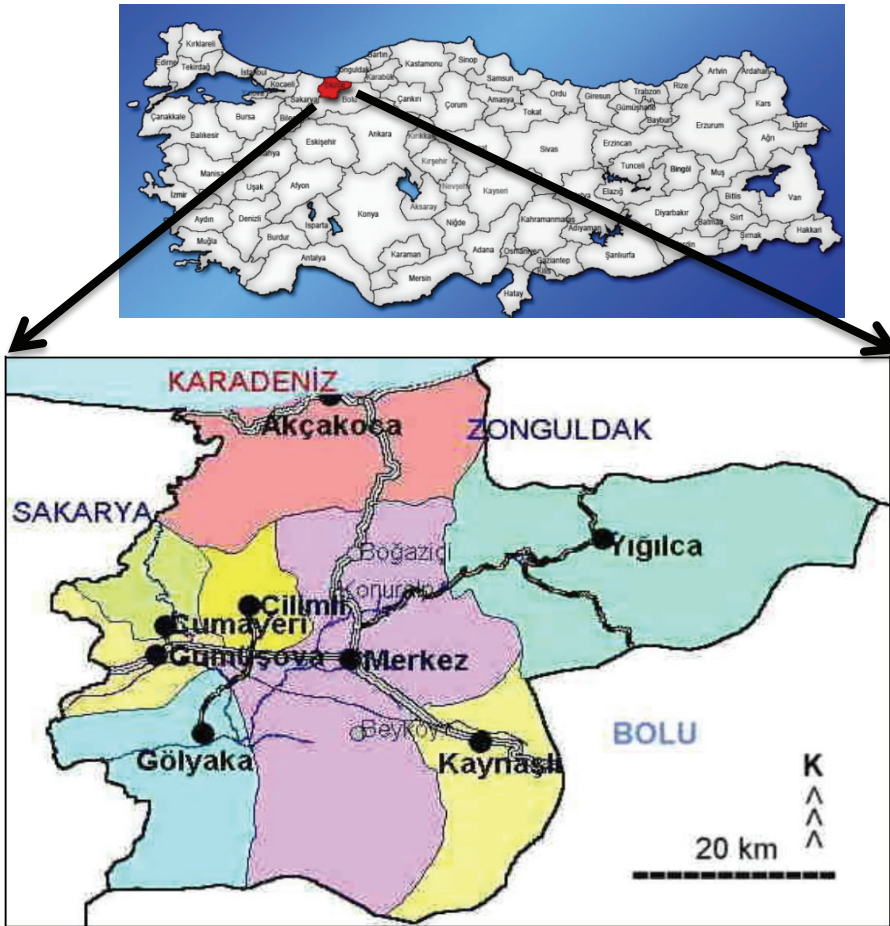
2001; Poulos vd., 1985; NCEER, 1997; Youd ve Noble, 1997; Youd vd., 2001; Kramer, 1996; Çetin, 2000; Çetin vd., 2004; Idriss ve Boulanger, 2006; Akın vd., 2013). Zeminin sıvılaşmaya karşı direcinin (dayanımının) belirlenmesinde zemin profili boyunca Standart Penetrasyon Testi (SPT), Konik Penetrasyon Testi (CPT) veya Makaslama dalagası hızı (V_s) ölçümleri dikkate alınmaktadır. SPT; pratik ve ucuz bir deney olması bakımından en yoğun tercih edilen yöntemdir. Ayrıca mühendislik uygulamalarında da, yaygın kullanıma bağlı olarak SPT deneyleri konusunda oldukça fazla tecrübe edinilmiştir. Bununla birlikte, CPT'ye (Robertson ve Wride, 1998; Toprak vd., 1999; Juang vd., 2003; Olsen, 1984; 1997; Moss, 2003; Moss vd., 2006) ve V_s 'e (Andrus ve Stokoe, 1997; 2000) dayalı yöntemler de oldukça önemli avantajlara sahip olup, son yıllarda yaygınlık kazanmaktadır.

Bu çalışmada jeoteknik sondajlar ve laboratuvar deney sonuçları dikkate alınarak Düzce kent merkezi zeminleri için sıvılaşma potansiyeline yönelik ön değerlendirmeler yapılmıştır. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı bir bilgisayar yazılımı olan ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009) kullanılarak tüm veriler sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla farklı senaryo durumları için Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) ve Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) yöntemlerine göre düzenlenerek ilgili haritalar CBS ortamında üretilmiştir.

İNCELEME ALANI

Düzce $40^{\circ} 37'$ ile $41^{\circ} 07'$ kuzey enlemleri ve $30^{\circ} 49'$ ile $31^{\circ} 50'$ doğu boylamları arasında yer alan, 2.593 km^2 genişliğinde bir Batı Karadeniz Bölgesi ilidir. Kapladığı alan bakımından Türkiye yüzölçümünün (783.577 km^2) binde 33'ü kadardır. Doğusunda Zonguldak ve Bolu, güneyinde yine Bolu, batısında ise Sakarya illeri ile komşudur (Şekil 1). Düzce ili Batı Karadeniz

Bölgesi'nde yer almakta olup, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'nun Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre 2016 yılı sonu itibarıyla merkez nüfusu 162 bin 897 ve il geneli nüfusu ise 370 bin 371 olarak belirlenmiştir. Düzce'nin bilinen tarihi M.Ö. 1390 yıllarına kadar gitmektedir. Yöre, birçok kavimin ve devletin istilasına maruz kalmıştır. Çevrede Frig, Lidya, Pers, Roma, Bizans, Selçuk ve Osmanlı uygarlıklarının izlerini görmek mümkündür.



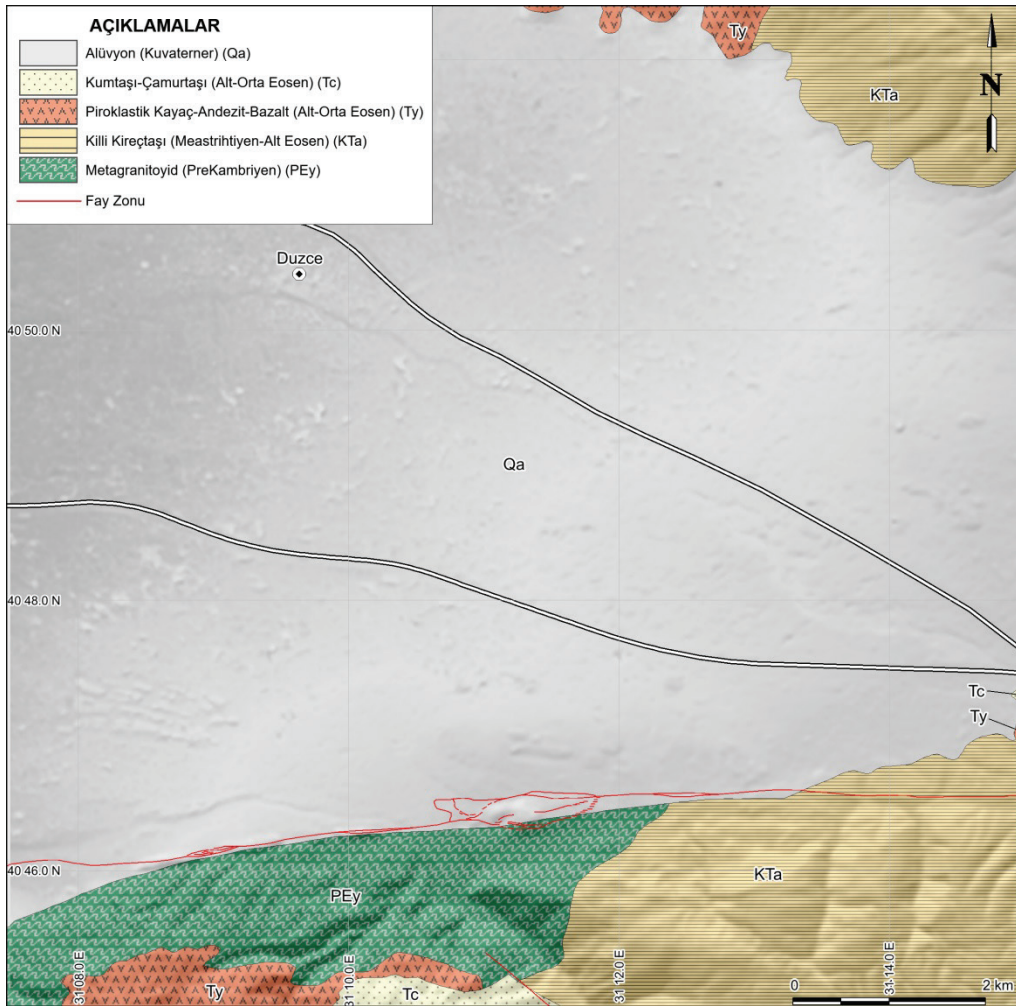
Şekil 1. Düzce yerleşim yeri haritası.

Figure 1. Location map of Duzce settlement.

İNCELEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Düzce ve yakın civarındaki en yaşlı birim Düzce ovasının güney batısında Prekambriyen yaşlı meta-granotoyitlerdir (PEy) (Şekil 2) (Şengör ve Yılmaz, 1981). Düzce Fayı, bu birimler ile Kuvaterner çökelleri arasındaki sınırı oluşturur. Genç Çökeller (Qa); Düzce havzasını dolduran tümü kırıntılı çökellerin

(Geç Pleyistosen-Holosen), depolama yerine bakmaksızın çakıl-kum-silt ve killerden oluştuğu görülür (Yılmaz vd., 1997). Havza kenarlarında çok az miktardaki döküntü veya yamaç molozunun dışında alüvyal ve gölsel alanlarda depolanmış oldukları dikkat çeker. Düzce havzasındaki sediment kalınlığının geçmiş sondaj bilgilerine ve jeofizik verilere dayalı olarak yaklaşık 260 m civarında olduğu tespit edilmiştir (Özmen, 2000).



Şekil 2. Düzce ve civarının jeolojik haritası (Uysal ve Herece, 1999' dan alınmıştır).

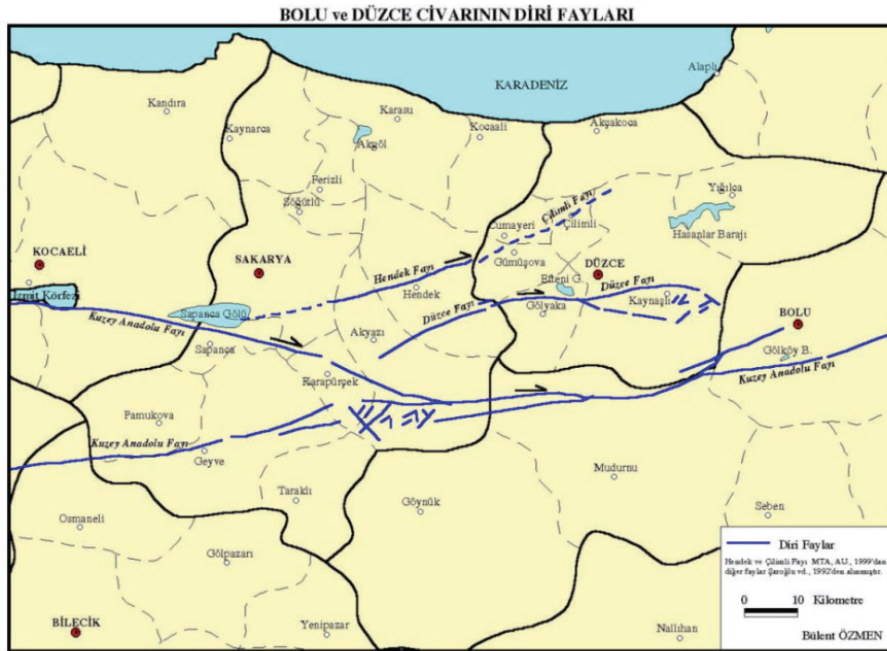
Figure 2. Geological map of Düzce and its vicinity (modified after Uysal and Herece, 1999).

İNCELEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN DEPREMSELLİĞİ

Düzce ili ve yakın çevresi 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde yakın aralıklı meydana gelen iki büyük depremden büyük ölçüde etkilenmiştir. Her ikisi de Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde meydana gelen bu depremlerden ilkinin merkez üssü Gölcük olup, ikincisinin ise Düzce Dağdibi köyü olmuştur (Şekil 3 ve 4). Pek çok çalışmaya konu olan Gölcük depreminin aletsel büyüklüğü 7.4, odak derinliği 15.9 km, süresi 45-50 saniye, en büyük yatay kayma yaklaşık 5 m, toplam yüzey kırığı uzunluğu 140 km olarak verilmektedir (Emre vd., 1999). Düzce depreminin aletsel büyüklüğü ise 7.2, odak derinliği 14 km, en büyük yatay kayma yaklaşık 4 m ve toplam yüzey kırığı

uzunluğu 40 km olarak belirlenmiştir (Demirtaş vd., 2000). 12 Kasım 1999 Düzce depreminde kent merkezinde depremin oluşturduğu deprem moment büyüklüğü $M_w=7.2$ ve yatay deprem ivmesi değeri 0.52g olarak kaydedilmiştir.

Kuzeyde Asya-Avrupa levhası ile güneyde Anadolu levhalarını birbirinden ayıran Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ), yaklaşık uzunluğu 1200 km. olan doğrultu atımlı bir fay sistemi olup ülkemizin en önemli tektonik yapılarından biridir. Düzce havzası Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) üzerinde bulunmaktadır (Şekil 3). Düzce havzasına en yakın konumlu olan ve deprem potansiyeli taşıyan faylar Düzce, Hendek ve Çilimli faylarıdır. Bu faylardan Düzce ve Hendek fayları aktif fay karakterindedir. Çilimli fayı ise olasılı aktif bir faydır (Emre vd., 1999).



Şekil 3. Düzce ve yakın civarındaki diri faylar (Özmen, 2000'den alınmıştır).

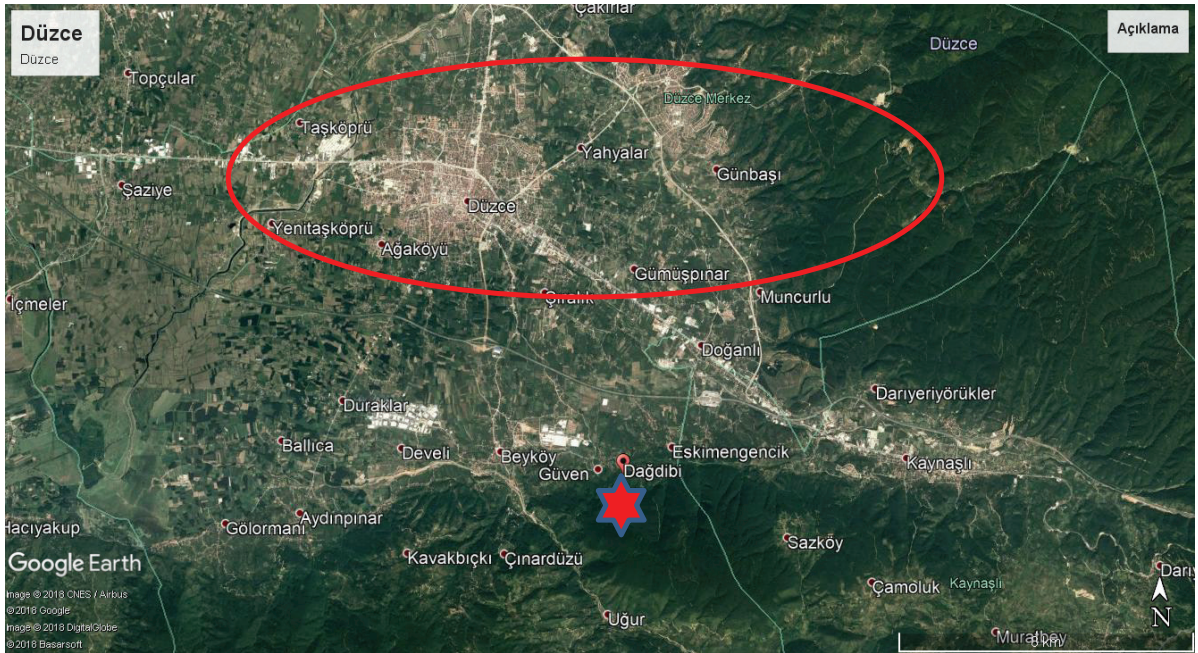
Figure 3. Active faults of Duzce and its vicinity (After Özmen, 2000).

Düzce Fayı: Akyazı-Kaynaşlı arasında uzanan ve Efteni gölünün güneybatısında çatallanan yaklaşık D-B uzantılı ve uzunluğu 70 km olan bu fay sağ yönlü doğrultu atımlı aktif bir faydır (Şaroğlu vd., 1987; 1992).

Hendek Fayı: Düzce havzasının batısında Sapanca Gölü-Hendek-Cumayeri arasında uzanan KD-GB uzanımlı fay Hendek fayı olarak isimlendirilmiştir (Emre vd., 1999). Sağ yönlü doğrultu atımlı fay yaklaşık 50 km uzunluğundadır. Hendek-Cumayeri arasında kalan 25 km'lik bölümünde morfolojik olarak çok belirgin olan bu fay Adapazarı ovasında olasılı olarak haritalanmıştır (Emre vd., 1999).

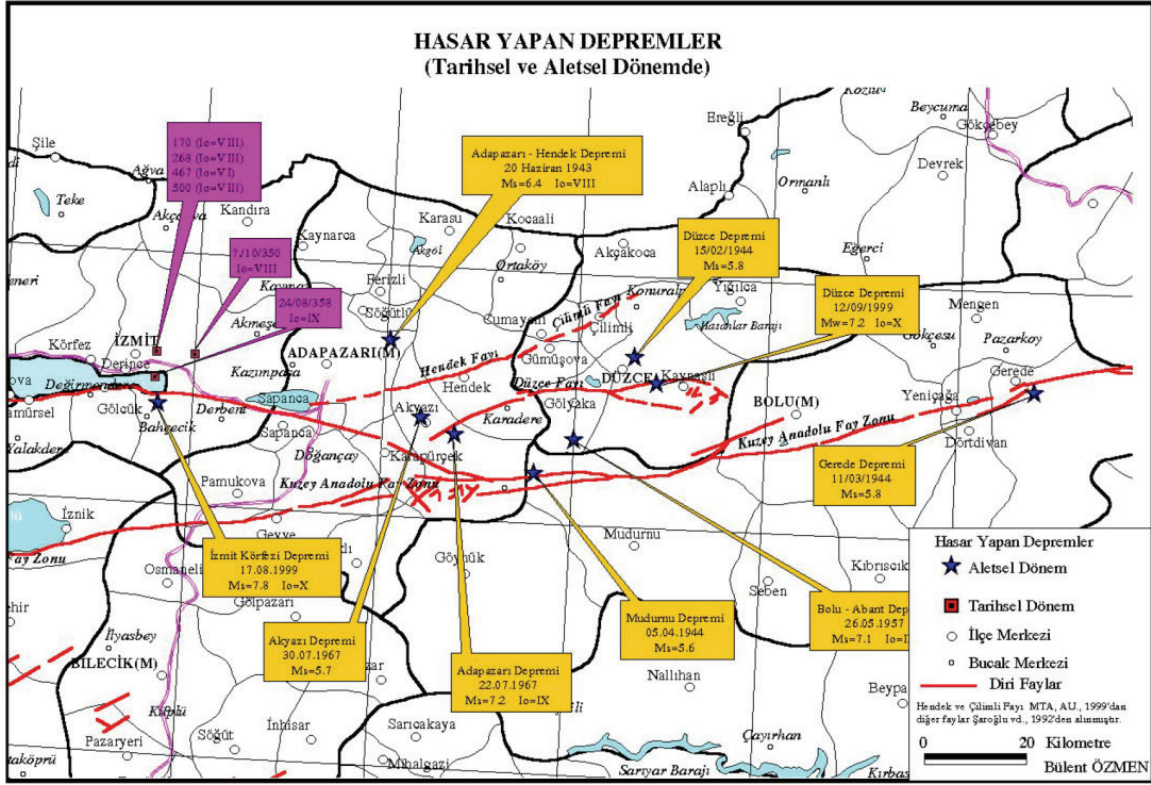
Çilimli fayı: Düzce havzasının kuzeyinde Cumayeri-Konuralp arasında uzanan ve yaklaşık uzunluğu 13 km olan bir faydır. Fayın niteliği ve aktivesine ilişkin ayrıntılı veri toplanamamasına rağmen arazide fay boyunca uzamış şekilli basınç sırtlarının gözlenmesi ve fay çizgisi boyunca çok sayıda kaynak dizilimi gözlenmiş olması sebebi ile olasılı aktif fay olarak değerlendirilmiştir (Emre vd., 1999).

İnceleme alanı ve yakın çevresine yönelik aletsel ve tarihsel dönemlerde meydana gelen depremler Şekil 5 ve Çizelge 1'de verilmiştir (Ergin vd., 1967; Özmen , 2000).



Şekil 4. Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde meydana gelen 12 Kasım 1999 depremi merkez üssü.

Figure 4. Epicenter of 12 November 1999 earthquake on the North Anatolian Fault Zone.



Şekil 5. Tarihsel ve aletsel dönemde hasar yapan depremler (Özmen, 2000'den alınmıştır).

Figure 5. Devastating earthquakes in historical and instrumental time periods (After Özmen, 2000).

Düzce ovası Kuzey Anadolu Fay Zonundaki yer hareketlerinin etkisiyle oluşmuş genç bir çöküntü havzasıdır (Tatar, 2003). Kabaca kare biçimli olup doğu-batı boyutu 23 km, kuzey-güney boyutu ise 20 km kadardır. Düzce depremi kırığına 5-10 km uzaklıkta olan kent, Düzce ovasını oluşturan gevşek alüvyon zeminler üzerinde yer almaktadır. Bu deprem sırasında gözlenen hasarlar kent içerisinde belirli alanlarda yoğunlaşmıştır. Bu yoğunluk zonları olasılıkla

yeraltı suyu seviyesi yüksek olan eski akarsu kanal dolgularının oluşturduğu zeminlerdir. Düzce'deki hasar dağılımında yerel zemin özelliklerinin belirleyici etkisi olmuştur. Ateş vd. (2013) tarafından yapılan Düzce ili için sivilleşme koşullarının etkisi ve zemin büyütme özellikleri ile yapıların etkileşimi gibi çalışmalara rastlanılmaktadır. Düzce, Kuvarterner alüvyon çökellerin oldukça geniş yayılım sunduğu bir yerleşim yeridir (Özaslan vd., 2001).

Akın

Çizelge 1. Aletsel ve tarihsel dönemlerde meydana gelen büyüklüğü 5'ten fazla olan depremler (Kadirioglu vd., 2014).

Table 1. Earthquakes with a magnitude greater than 5 in historical and instrumental time periods (Kadirioglu et al., 2014).

Yerleşim yerleri	Tarih	Deprem merkezi	Mw	Toplam yapısal hasar	Ölü sayısı	Yaralanma sayısı
Mürefte	09.08.1912	40.60-27.20	7.3	5540	216	466
Hendek	20.06.1943	40.85-30.51	6.6	Yok	336	Yok
Gerede	01.02.1944	41.41-32.69	7.2	20865	3959	Yok
Düzce	10.02.1944	41.00-32.30	5.4	900	Yok	Yok
Mudurnu	05.04.1944	40.84-31.12	5.6	900	30	Yok
Yenice	18.03.1953	39.99-27.36	7.4	9670	265	336
Abant	26.05.1957	40.60-31.20	7.1	4201	52	100
Çınarcık	18.09.1963	40.77-29.12	6.3	230	1	26
Adapazarı	22.07.1967	40.60-30.89	7.2	5569	89	235
Gelibolu	27.03.1975	40.45-26.12	6.4	980	7	Yok
Gölcük	13.09.1999	40.80-30.03	5.7	Yok	Yok	Bilinmiyor
Düzce	12.11.1999	40.79-31.21	7.2	15389	845	4948
Bolu	17.11.1999	40.83-31.51	5.0	Yok	Yok	Yok
Bolu	22.03.2000	40.94-31.58	5.4	Yok	Yok	Yok
Yığılca	26.08.2001	40.93-31.53	5.1	Yok	Yok	Yok

SAHA VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Çalışma alanında geniş yayılım gösteren Kuvaterner alüvyon zeminler, çakıllı, kumlu, siltli, killi, az bloklu, yanal ve düşey geçişli seviyeler birbirleri içinde merceklenmeli, kamalanmalı, gevşek ve tutturulmamış nitelikteki bir özelliğe sahiptir. İnceleme alanında yapılan sondajlardan alınan örneklerde genelde üstten alta doğru az kumlu siltli kil, siltli kil kum, siltli iri kumlu kil, çakıl, iri kum çakıl serileri gözlenmektedir (Öztürk, 2016). Düzce Merkez Belediyesi İmar Planına esas jeolojik-jeoteknik etüt kapsamında Düzce'deki yerel zemin koşullarının ve yeraltısuyu durumunun belirlenmesi amacıyla yapılmış 40 adet jeoteknik sondaja ait veriler dikkate alınarak tüm analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır (Akbaşlı, 2008).

Çalışma alanında derinlikleri 10.00-15.00 m arasında değişen toplam 591 m 40 adet jeoteknik sondaj yapılmıştır. Bu sondaj yerlerinin dağılımına Şekil 7'de yer alan haritalarda yer verilmiştir. Etkin derinliği açısından zemin sıvılaşmasının en az 20 m'ye kadar değerlendirilmesi yaygın bir şekilde kabul edilmektedir. Ancak, bu çalışmada kullanılan jeoteknik sondajların en fazla 15 m derinliğe ulaşması bu yönüyle bir sınırlama olmakla birlikte derinliğe bağlı olarak sıvılaşmanın yüzeydeki etkilerinin de azalacağı dikkate alınarak tüm değerlendirmeler mevcut jeoteknik sondaj verileri dikkate alınarak yapılmıştır. Jeoteknik sondajlarda geçilen birimler Kuvaterner yaşlı alüvyonal çökeller ve Yığılca formasyonuna ait birimler olup, genel olarak siltli kil, killi kumlu silt, çakıllı siltli kum

seviyeleri geçilmiştir. Jeoteknik sondajlarda her 1.50 m’de bir standart penetrasyon deneyi (SPT) uygulanmış ve zemin örnekleri alınmıştır (Akbaşlı, 2008). İnceleme alanındaki bu jeoteknik sondajlardan 22’sinde yeraltısuyuna rastlanmış olup, yeraltısuyu seviyeleri 1,00 ile 9,50 m arasında değişmektedir.

FARKLI DEPREM SENARYOLARINA GÖRE SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Zemin sıvılaşması değerlendirmelerinde sadece ait seviye olduğu için anlamlılık sunan sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının belirlenmesinin yanısıra, yüzeyden derine doğru tüm profil için anlamlandırılan yaklaşımlar da bulunmaktadır. İlk defa Iwasaki vd. (1982) tarafından yüzeyden derine doğru 20 m’lik zemin profili için önerilen Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) kavramı, Sonmez (2003) tarafından yapılan çalışmayla da LPI’nın genel yaklaşımı

korunarak sıvılaşma potansiyeli sınıflaması yeniden düzenlenmiştir. Sonmez ve Gokceoglu (2005) ise sıvılaşmaya karşı güvelik katsayısı değerine bağlı olarak sıvılaşma olasılığına ilişkin Juang vd. (2003) tarafından önerilen ilişkiyi ve ayrıca Chen and Juang (2000) tarafından önerilen sıvılaşma olasılığı sınıflamasını birlikte dikkate alarak, yine Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen genel yaklaşım temelinde Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) eşitliğini ve ilgili sınıflamasını önermişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) ve Sonmez ve Gokceoglu (2005) tarafından önerilen Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) yaklaşımları ve ilgili sınıflamaları dikkate alınarak, mevcut verilerden itibaren inceleme alanının sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesine yönelik sıvılaşma haritaları farklı deprem senaryoları için üretilmiştir. İnceleme alanında dikkate alınan farklı deprem senaryolarına ait parametreler Çizelge 2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Çalışmada dikkate alınan olası deprem senaryoları.

Table 2. Possible earthquake scenarios considered in this study.

Senaryolar	Deprem büyüklüğü M_w	Maksimum ivme değeri, PGA (g)	Açıklama
1	7.5	0.5	Düzce ve yakın çevresinin depremselliği için yeni deprem yönetmeliği temelinde olası deprem senaryosu
2	7.2	0.8	1999 Düzce depremi Bolu İstasyon kayıtları dikkate alınarak (Çeken, 2000)
3	7.2	0.4	1999 Kocaeli depremi Sakarya İstasyonu kayıtları dikkate alınarak (Erdik, 2000)

Iwasaki vd. (1982) tarafından belirtilen çalışmada sıvılaşabilir tabakaların kalınlığı ve ayrıca güvenlik katsayıları dikkate alınarak aşağıda belirtilen eşitlikler yardımıyla hesaplamalar yapılmaktadır.

$$LPI = \int_0^{20} F(z)W(z)dz \quad (1)$$

$$F(z) = 1 - FS \quad (FS < 1.0 \text{ için})$$

$$F(z) = 0 \quad (FS \geq 1.0 \text{ için})$$

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (z \leq 20 \text{ m için})$$

$$W(z) = 0 \quad (z > 20 \text{ m için})$$

LPI ile belirtilen sıvılaşma potansiyeli indeksi yüzeyden 20m derinliğe kadar güvenlik katsayısı (F) ve ağırlık sabiti (W) değerlerindeki değişimlere göre derinlikle değişen değerlere bağlı olarak Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmaktadır. LSI'ya göre ise P_L yani sıvılaşma olasılığı oranına göre 20m'ye kadar olan sıvılaşabilen seviyelerin derinliğe bağlı olarak toplam sıvılaşma potansiyeli ortaya konmaktadır. Aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile sıvılaşma şiddet indeksi hesaplanmaktadır.

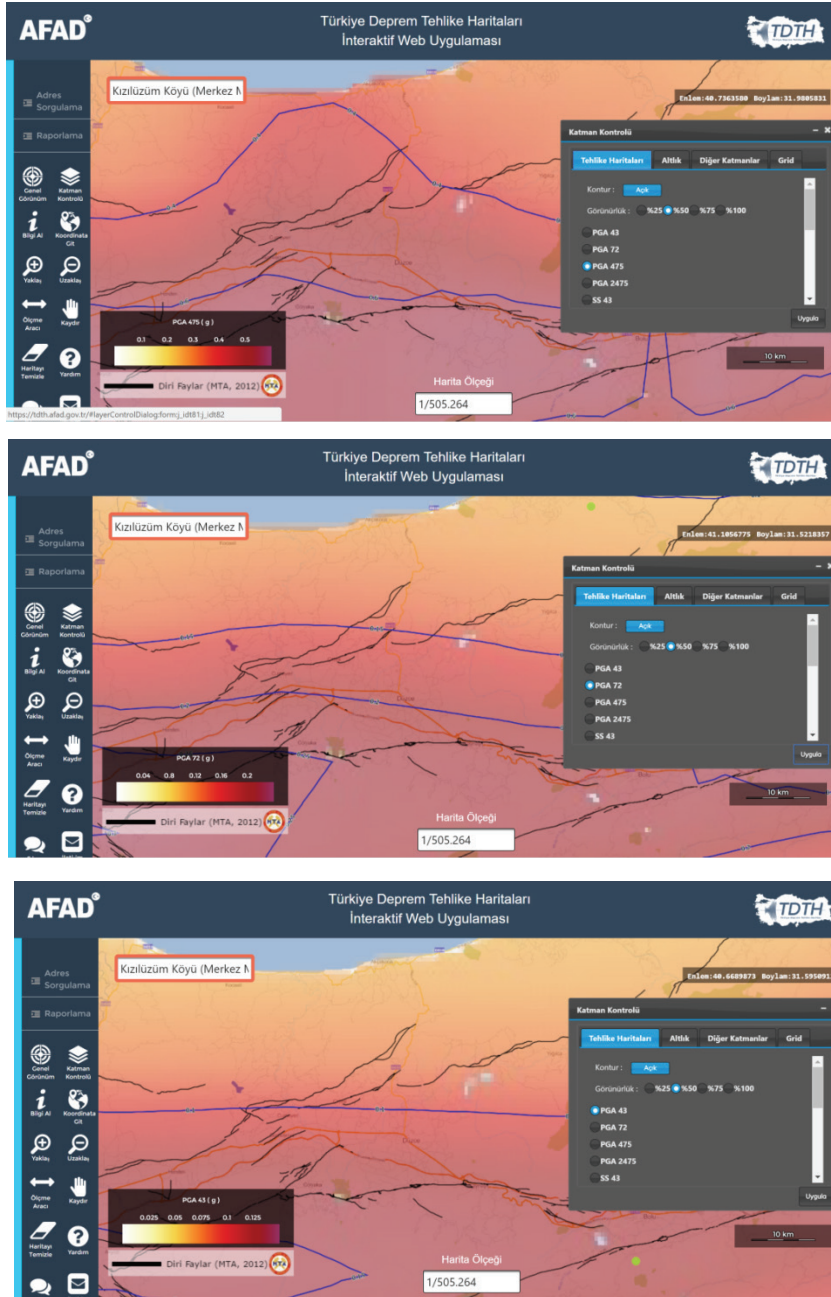
$$L_s = \int_0^{20} P_L(z)W(z)dz \quad (2)$$

$$P_L(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0.96}\right)^{4.5}} \quad (F_L \leq 1.411 \text{ için})$$

$$P_L(z) = 0 \quad (F_L > 1.411 \text{ için})$$

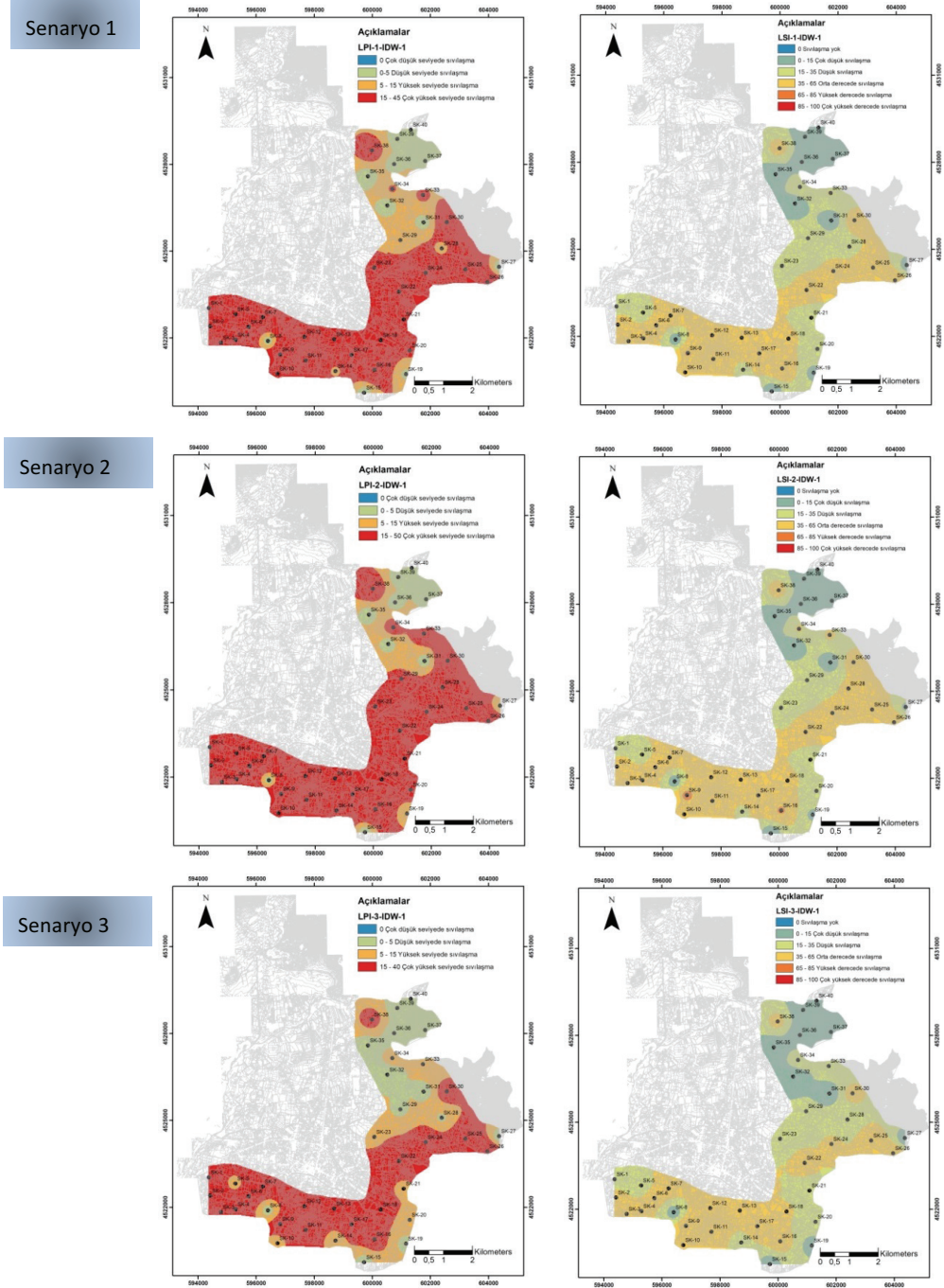
Sıvılaşma analizlerine yönelik olarak yerleşim yeri için elde edilen ayrıntılı saha ve laboratuvar çalışmalarına ait verilerin yanı sıra, 2019'da uygulamaya geçecek olan ülkemize ait güncel Deprem Yönetmeliği (Resmi Gazete, 2018) de dikkate alınarak seçilen farklı deprem senaryoları için Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi ve Sıvılaşma Şiddeti İndeksi değerleri tüm jeoteknik sondaj lokasyonları için hesaplanmıştır. Deprem senaryolarına karar verilmeden önce, yeni deprem yönetmeliğinin web tabanlı uygulaması kullanılarak deprem görülme olasılığının %50 değeri için, olası en büyük yatay yer ivmesinin (Peak Ground Acceleration, PGA) 475, 72 ve 43 gal değerleri için Düzce ve yakın çevresini de içerecek alanda yatay ivme dağılım haritaları değerlendirilmiştir (Şekil 6). Bu değerlendirme ile inceleme alanı ve çevresi için en büyük yatay yer ivmesinin güncel deprem yönetmeliğine göre 0.5 g düzeylerinde gelişebileceği öngörülebilmektedir. Bununla birlikte, 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinin büyüklükleri 7.5 ve 7.2 ve yine ölçülen 0.8 g en büyük yatay yer ivmesi değeri de dikkate alınarak üç farklı deprem senaryosu seçilmiştir (Çizelge 2).

Her üç senaryo deprem için ayrı ayrı olmak üzere, jeoteknik sondajlara ait LPI ve LSI değerleri hesaplanmış ve Ters Mesafe Ağırlık (IDW) yöntemi kullanılarak CBS ortamında, Iwasaki (1982) ve Sonmez ve Gokceoglu (2005) tarafından sırasıyla LPI ve LSI için önerdiği sınıf sınır değerleri dikkate alınarak sıvılaşma haritaları hazırlanmıştır (Şekil 7).



Şekil 6. İnteraktif web uygulamasında farklı aşılma ihtimalleri için maksimum yer ivmesi değerlerinin dağılımı (<https://tdth.afad.gov.tr/>).

Figure 6. Distribution of maximum ground acceleration values for different exceedance probability in interactive web application (<https://tdth.afad.gov.tr/>).



Şekil 7. Farklı deprem senaryoları için LPI (Iwasaki vd.,1982) ve LSI (Sonmez ve Gokceoglu, 2005) yöntemleriyle üretilen sıvılaşma haritalarının karşılaştırılması.

Figure 7. Comparison of LPI (Iwasaki et al., 1982) and LSI (Sonmez and Gokceoglu, 2005) based liquefaction maps with respect to different earthquake scenarios.

Genel olarak deprem senaryosu 1 ve 2 için benzer LPI ve LSI sınıflandırılmış haritaları elde edilmiştir. Buna karşın deprem senaryosu 3 için nispeten daha tutucu sınıflandırılmış haritalar elde edilmiştir. Bu durum, farklı deprem senaryoları için ön görülen moment büyüklüğü (M_w) ve en büyük yatay yer ivmesi (a_{max}) değişimleri ile kontrol edilmektedir. Sonuç olarak sivilaşma haritalaması yapılan alanın güney kesimlerinde olası deprem senaryolarının yaşanması durumunda sivilaşma olayının yüzey etkilerinin daha fazla gözlenebileceği söylenebilir. Önceki bölümlerde sunulduğu üzere sahadaki jeoteknik sondaj derinlikleri genel olarak en fazla 15 m'ye kadar ulaşmaktadır. Buna karşın LPI ve LSI hesaplamalarında 20 m derinliğe kadar uzanan profilin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, 20 m derinliğe kadar değerlendirmelerin yapılması durumunda ön değerlendirme amacıyla bu çalışmada hazırlanan sivilaşma haritalarıyla karşılaştırıldığında derinlerdeki zemin özelliklerine bağlı olarak nispeten daha yüksek LPI ve LSI değerlerinin elde edilmesi olasıdır.

Sivilaşmanın yüzey etkilerinin göreceli değerlendirilmesinde kullanılabilen LPI ve LSI değerleri teorik olarak 0 ile 100 arasında değişebilmektedir. Iwasaki vd. (1982) tarafından LPI'nin sınıflama sınır değerleri "çok düşük", "düşük", "yüksek" ve "çok yüksek" sınıfları için sırasıyla 0, 0-5, 5-15 ve 15'ten büyük arasında önerilmekle birlikte, bu sınırların farklı değerlere sahip olabileceği yönünde bazı güncel çalışmalar da mevcuttur. Diğer taraftan LPI'nin 15'ten büyük geniş bir aralığı "çok yüksek" sivilaşma potansiyeli sınıfına dahil edilmektedir. Sivilaşma olasılığı temelli LSI'ya göre önerilen sivilaşma şiddeti sınıflamasında "yok", "çok düşük", "düşük", "orta", "yüksek" ve "çok yüksek" sınıflarının sınır değerleri ise 0, 0-15, 15-35, 35-65, 65-85 ve 85-100 olarak

önerilmektedir. Bu nedenle, LPI yöntemini temel alan sınıflamada "çok yüksek" sınıfında geniş bir alan belirlenirken, bu alanların LSI yöntemini dikkate alan sınıflamada genellikle "orta" sınıfına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu aşamada LPI'ya göre Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen sınıflamada "orta" sınıfının da tanımlanmadığı dikkate alınmalıdır.

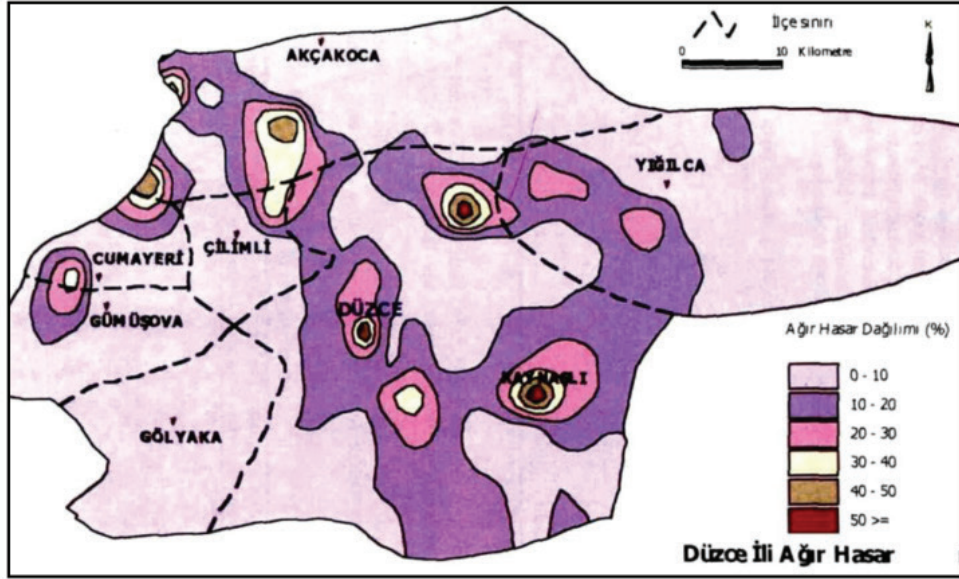
GENEL DEĞERLENDİRME

Düzce ovası 5 milyon yıl kadar önce Kuzey Anadolu fay sistemine bağlı yer kabuğu hareketleriyle meydana gelmiş, derin ve etrafı dağlarla çevrili geniş bir birikim havzasıdır. Oluşumundan bu yana çevredeki dağlardan ovaya yerleşmiş bulunan akarsuların taşıyıp getirdiği alüvyonlarla ve kolüvyonlarla dolmuştur. Bunlara ek olarak ovada oluşmuş geçmişte daha büyük olduğu anlaşılan Efteni gölünün çökeltileri de havzanın dolmasına katkıda bulunmuştur. Ovadaki Kuvaterner birikintilerinin kalınlığı orta kesimlerde 260 m'yi bulmaktadır. Ovaryı dolduran bu gevşek kalın tortuların içinde yeraltı su seviyesi oldukça sıgıdır. Yeraltı suyu tablasının derinliği bazı kesimlerde 0,5 m'ye kadar düşmektedir. Genelde 2.5-3.3 m arasındadır. Tamamen alüvyon zemin üzerinde kurulu il merkezinde 1965 tarihli imar planı gereği en fazla üç katlı yapılaşmaya izin verilirken, 1970'li yılların başlarından itibaren özellikle şehrin merkezi kısımlarında, çoğunluğu 5 ve 6 katlı yapılar hızla artmıştır. Bazı durumlarda kat sayısı eklemelerle 6'nın da üzerine çıkarılmıştır. 1999 deprem felaketlerinde bu çok katlı binaların neredeyse tamamı çökmüş veya ağır hasara uğradığından yıkılarak ortadan kaldırılmıştır (Tatar, 2003). Düzce için Başbakanlık Kriz Yönetim Merkezi'nin açıklamasına göre, ölü sayısı 845, yaralı sayısı 4948 olarak belirtilmiştir. Depremde hasar gören

ve derhal yıkılması gereken bina sayısı 3395, yıkık ya da ağır hasarlı ev sayısı 12939, iş yeri sayısı ise 2450'dir. İlgili hasar dağılım oranı Şekil 8'de verilmiştir (Özmen, 2000).

SONUÇLAR

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında Düzce ilinde yeni yapılaşmaların arttığı



Şekil 8. 1999 Depreminin Düzce ilinde oluşturduğu ağır hasar dağılımı (Özmen, 2000'den alınmıştır).

Figure 8. The heavy damage distribution of the 1999 earthquake in Düzce province (After Özmen, 2000).

Buna göre deprem yüzey kırığına 5-10 km uzaklıkta olan kent merkezi, Düzce ovasını oluşturan gevşek alüvyon zemin üzerindedir. Hasar, kent içerisinde belirli alanlarda yoğunlaşmıştır. Bu yoğunluk zonları olasılıkla yeraltısuyu seviyesi yüksek olan eski akarsu kanal dolgularının oluşturduğu zeminlerdir. Düzce'deki hasarın yerel zemin özelliklerinin belirleyici etkisi olmuştur (Ateş vd., 2013). Düzce'de deprem sonrası sıvılaşmaların yüzeye etkisine yönelik herhangi bir belirti gözlenmemesine karşın, bazı binalarda toplam veya kısmi sıvılaşmaya bağlı olarak oturmalar olduğu gözlenmiştir (Erdik, 2001).

güney ve güneydoğu kesimlerinde sıvılaşma potansiyelinin yüksek-çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, inceleme alanının kuzeyine doğru gidildikçe sıvılaşma potansiyeli azalsa da, LPI ve LSI yöntemlerine göre bu bölgelerin bazı kesimlerinde halen düşük-orta sıvılaşma potansiyeli olduğu görülmektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonu gibi büyük depremler üretebilecek önemli bir sismik kaynak içinde yer alan Düzce ili için gerek parsel ve gerekse planlama bazında farklı deprem senaryolarının dikkate alınması gerekmektedir. Yüksek sıvılaşma riski olan alanlarda yapılacak yapılaşmalarda jeoteknik parametreler ayrıntılı olarak belirlenmeli ve özellikle sıvılaşmaya

yönelik analizler detaylı ve gerçekçi bir şekilde yapılmalıdır. Analizler sonucunda sıvılaşma potansiyeli yüksek olan alanlarda uygun zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanması sağlanmalıdır. Diğer bir ifadeyle zemin-yapı etkileşiminde sıvılaşma ve sıvılaşmaya bağlı yüzey deformasyonları dikkate alınmalıdır.

Çalışmada LSI yöntemine göre hazırlanan haritalarda farklı deprem senaryolarındaki deprem büyüklüğü ve ivme değerlerine rağmen çok farklılık göstermemesi dikkate değerlendirilmelidir. Özellikle farklı deprem senaryoları için ön görülen moment büyüklüğü (M_w) ve en büyük yatay yer ivmesi (a_{max}) değişimleri oluşturulan haritalarda yerel olarak değişikliklere yol açmıştır. Bu değişiklikler özellikle yatay yer ivmesi değerlerine oldukça hassas olduğu tespit edilmiştir ve farklı deprem senaryolarına göre özellikle LPI yönteminden elde edilen sonuçların değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlar, yapılacak detay analizlerle sıvılaşma sonrası meydana gelebilecek yüzey deformasyonlarının (oturma, yanal yayılma) boyutu açısından da incelenmeli ve yerel ölçekte sıvılaşma analizi güvenli tarafta kalınması bakımından zemin büyütme olasılığı da dikkate alınarak yatay yer ivmesi değerlerine dayalı olarak sıvılaşma analizleri ve modelleri gerçekleştirilmelidir.

TEŞEKKÜR

İller Bankası'ndan Sayın Jeoloji Yük. Müh. Tahsin Metin'e ve NEVHÜ'den Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Orhan'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yazar makalenin geliştirilmesindeki değerli katkılarından dolayı editör Prof. Dr. Tamer TOPAL ve hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akbaşı Mühendislik Sondaj İnşaat Madencilik Taahhüt Ticaret Limited Şirketi. Aralık-2008, Düzce (Merkez) Belediyesi-İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu.
- Akin M.K., Topal T., Kramer S.L., 2013. A newly developed seismic microzonation model of Erbaa (Tokat, Turkey) located on seismically active eastern segment of the north Anatolian fault zone (NAFZ). *Natural Hazards*. 65:1411–1442.
- Andrus, R.D., Stokoe II, K.H., 1997. Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, T.L.Youd and I.M. Idriss, (Eds.), Held (1996), Salt Lake City, UT, Buffalo, NY, 89-128.
- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., 2000. Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 11, pp. 1015-1025.
- Ateş, A., Toprak, B., Yeşil, B., 2013. Düzce ilinde yapı hasarlarının zemin büyütme özellikleri ve yapı rezonans uyumu ile ilgisinin araştırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi Cilt 2, Sayı 3*, 76-86.
- Çetin, K. O., 2000. Reliability-Based Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation Hazard, Ph.D. dissertation, Univ. of California, Berkeley (unpublished).
- Çetin K.O., Seed R.B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L.F. Jr., Kayen R.E., Moss R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314-1340.
- Çeken, U., 2000. Türkiye'nin kuvvetli yer hareketi kayıt şebekesi ve 12 Kasım Düzce depreminin ivmesi. 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü DAD, Editörler: B. Özmen ve G. Bağcı, 224 s., Ankara.

- Day, R., 2002. Geotechnical Earthquake Engineering Handbook. McGraw Hill Handbook. pp. 700.
- Demirtaş, R., Erkmen, C., Yaman, M., 2000. 12 Kasım 1999 Düzce Depremi: Yüzey Kırık Geometrisi, Atım Miktarı Dağılımı ve Gelecek Deprem Potansiyeli s:61-99, 12 Kasım Düzce Depremi Raporu (Editör: Bülent Özmen ve Günruh Bağcı), Deprem Araştırma Dairesi, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Emre, Ö. vd. (MTA), Varol, B. vd. (A.Ü.), 1999. 17 Ağustos 1999 Depremi Sonrası Düzce (Bolu) İlçesi Alternatif Yerleşim Alanlarının Jeolojik İncelemesi. TÜBİTAK (MTA Genel Müdürlüğü ve A.Ü. Ortak Araştırma Projesi).
- Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım C., Göktaş F., 2005. Düzce ve çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri. MTA Jeoloji Etüdüleri Dairesi Rapor No: 10754.
- Ergin, K., Güçlü Ü., Uz, Z., 1967. Türkiye ve civarının deprem kataloğu (M.S. 11 1964): İTÜ Arz Fizikçi Enst. Yay. 28, 74 s.
- Erdik, M., 2000. Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes. Boğaziçi University Department of Earthquake Engineering, İstanbul.
- Erdik, M., 2001. Report on 1999 Kocaeli And Düzce (Turkey) Earthquakes. Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering, pp. 149-186.
- Erkman, H.K., 1949, 23.7.1949. Karaburun-Düzce zelzelesi. İstanbul Kandilli Rasathanesi, Jeofizik, No:1.
- ESRI, 2009. ArcGIS Desktop: Release 9.3. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Idriss, I. M., R. W. Boulanger, 2006. Semi Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Soil Dynamics Earthquake Engineering, Vol. 26, Iss. 2-4, pp. 115-130.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K., 1982. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, UK, pp. 925-939.
- Juang, C.H., H., Yuan, D.H. Lee, P.S. Lin, 2003. Simplified Cone Penetration Test-based Method for Evaluating Liquefaction Resistance of Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 1, pp. 66-80.
- Kadirioğlu, F. T., Kartal, R. F., Kılıç, T., Kalafat, D., Duman, T. Y., Özalp, S., Emre, Ö., 2014. An Improved Earthquake Catalogue (M ? 4.0) For Turkey And Near Surrounding (1900-2012). 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, İstanbul Aug. 25-29, 2014. Page:411-422 (Proceedings Book).
- Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 653.
- Moss, R.E.S., 2003. CPT-Based Probabilistic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- Moss, R. E. S., Seed, R. B., Kayen, R. E. , Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., Cetin, K.O., 2006. CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of in situ Seismic Soil Liquefaction Potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132, 8, 1032–1051.
- NCEER. 1997. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Edited by T.L. Youd and I.M. Idriss. National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), N.Y. Technical Report NCEER-97-022.
- Olsen, R. S., 1984. Liquefaction analysis using the cone penetrometer test. Proceedings 8th World Conference, on Earthquake Engineering EERI, San Francisco, 247–254.
- Olsen, R. S., 1997. Cyclic Liquefaction based on the Cone Penetrometer Test IN Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils 1997. Edited by T.L. Youd and I.M. Idriss. Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.

- Özaslan, M., Erşahin G., Akkahve D., Sabuncu, A., 2001. Düzce ili raporu. Başbakanlık DPT, Yayın No: 2578.
- Özmen, B., 2000. Düzce-Bolu Bölgesi'nin Jeolojisi, Diri Fayları ve Hasar Yapan Depremleri s:1-14, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi Raporu (Editör: Bülent ÖZMEN ve Günruh BAĞCI). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, Ankara.
- Özden, S., Tatar, O., Mesci, B. L., Koçbulut, F., Tutkun, S. Z., Doğan, B., Tüvar, O., 2000. 12 Kasım 1999 Düzce Depremi ve Bölgesel Tektonik Anlamı. Türkiye Jeoloji Bülteni, C.43, Sayı:2.
- Öztürk, E., 2016. 1999 Düzce Depreminde Zemin Büyütmesine Bağlı Gelişen Yapı Hasarlarının Araştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4, 264-277.
- Poulos, S.J., G. Castro, J. W. France, 1985. Liquefaction Evaluation Procedure Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 6, pp. 772-792.
- Resmi gazete, 2018. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Sayı: 30364 (mükerrer). <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>.
- Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35, 442-459.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 97(SM9), 1249-273.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 134 pp.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. Jr., Chung, R., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 111(12), 1425-445.
- Sonmez, H., 2003. Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). Environmental Geology, 44(7), 862-871.
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. Environmental Geology, Volume 48, Issue 1, pp 81-91.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ. 1987. Türkiye'nin diri fayları ve deprem şekilleri. MTA, Der.no:8174.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. Türkiye Diri Fay Haritası. MTA, Ankara.
- Şengör, A.M.C., Yılmaz. Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. Tectonophysics, 75, 181-241.
- Şimşek, O., Dalgıç, S., 1997. Düzce Ovası killerinin konsolidasyon özellikleri ve jeolojik evrim ile ilişkisi. Türkiye Jeoloji Bülteni, C:40 Sayı:22 Sayfa:29-38. <https://tdth.afad.gov.tr/erişim-tarihi> : 20.12.2018.
- Tatar, Y., 2003. Düzce İl Gelişme Planı. Çevre ve Mekansal Gelişme Sektörü Raporu, Düzce, 103 s.
- Toprak, S., Holzer, T. L., Bennett, M. J., Tinsley, J. C., 1999. CPT- and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential. Proceedings of Seventh US Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Counter-measures Against Liquefaction, T. D. O'Rourke, J. P. Bardet, and M. Hamada, eds., Report MCEER-99-0019, MCEER, NY.
- Uysal, K., Herece, E., 1999. 12 Kasım 1999 Düzce depremi ön değerlendirme MTA raporu.
- Yılmaz, Y., Tüysüz, O., Yiğitbaş, E., Genç, C., Şengör, C., 1997. Geology and tectonic evolution of the pontides, in A. G. Robinson, ed., Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region, AAPG Memoir, 68, p. 183-226.
- Youd, T. L., Noble, S.K., 1997. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. Proceedings, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Natural Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, 201-215.

Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., et al., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(10): 817-833.



Araştırma Makalesi / Research Article

Determination of Engineering Geological Conditions of A Plant-Site: A Case Study in an Open Pit Mine in Çine, Aydın

Bir Tesis Alanının Mühendislik Jeolojisi Koşullarının Belirlenmesi: Örnek Çalışma, Çine, Aydın'da Yer Alan Bir Açık Ocak Feldspat Maden Sahası

Saffet Deniz KARAGÖZ¹ , Mehmet Yalçın KOCA^{2*} 

¹ Dokuz Eylül Univ. Natural and Applied Sciences, Geological Engineering Dept. Buca-İzmir/TURKEY

² Dokuz Eylül Univ. Engineering Faculty, Geological Engineering Dept. Buca-İzmir/TURKEY

Geliş (Received): 27 Kasım (November) 2018 / Düzeltme (Revised): 08 Ocak (January) 2019 / Kabul (Accepted): 22 Ocak (January) 2019

ABSTRACT

A plant will be constructed between the Alipasa and Sarıkısık feldspar open-pit mines in Karpuzlu-Çine (Aydın) to conduct the works of crushing-grinding and flotation. An investigation was carried out to determine engineering geological conditions at and below the plant-site using scan-lines, geophysical measurements, and three inclined borehole data. Geological structure and ground conditions including geotechnical data such as discontinuity frequency and spacing, RQD% and CR% acquired from the drill hole exploration and geophysical survey are determined. Along the inclined drill holes, true discontinuity spacing values computed for each core run represent the most intersected discontinuities. In these calculations, determination of the acute angles between the axes of drill holes and strikes of the discontinuity sets are important as much as the investigation of fracture distributions in the subsurface. For this reason, the stereographic projection techniques were used to determine the true acute angle in this work. The purpose of the investigation is to identify and mitigate difficulties caused by ground conditions. The rock conditions comprise heavily jointed and weathered metamorphic rocks and the ability of these to support the foundations is considered. It was determined that the bearing capacity values obtained from the geotechnical computations considering RQD values agree with the ones acquired from the geophysical measurements, except the weakness zones (sheared zones). It was also determined that the values of allowable bearing pressure based on the geotechnical works are more conservative than the ones from the geophysical measurements. When all results are considered, the ratio between the allowable bearing capacity (q_a) values acquired from geotechnical and geophysical measurements is close to 0.65.

Keywords: Site Investigation, Inclined Borehole, Geotechnical Data, Stereographic Projection, Geophysics, Bearing Capacity

ÖZ

Karpuzlu, Çine/Aydın'da Sarıkısık ve Alipaşa feldspat açık ocak madenleri arasında yer alan sahada kırma-öğütme ve flantasyon işlerini yürütmek için bir tesis inşa edilecektir. Hat etütleri, jeofizik ölçümler ve açılan üç eğimli sondajın verileri kullanılarak tesis alanında ve altındaki mühendislik jeolojisi koşullarını belirlemek için bir araştırma yapılmıştır. Jeofizik çalışması ve sondajlardan elde edilen süreksizlik sıklığı, aralığı, RQD ve karot verimi (CR) gibi jeoteknik verileri içeren yer koşulları incelenmiş ve sahanın jeolojik yapısı ortaya çıkartılmıştır. Eğimli sondajlar boyunca, en çok kesilen süreksizlikleri temsil eden her bir ilerleme için gerçek süreksizlik aralığı değerleri

hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, süreksizlik setlerinin doğrultusuyla sondaj eksenlerinin arasındaki dar açıların belirlenmesi yer altındaki süreksizlik dağılımının araştırılmasında oldukça önemlidir. Söz konusu gerçek dar açıların belirlenmesinde stereografik iz düşüm teknikleri kullanılmıştır. Araştırmanın amacı, yer koşulları nedeniyle ortaya çıkan zorlukları tanımlamak ve bu zorlukları en aza indirmektir. İnceleme alanı sık çatlaklı, ayrıışmış metamorfik kayalardan oluşmaktadır. Bu kayaların temel olma açısından bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Makaslama zonları hariç, jeofizik ve RQD değerlerini dikkate alan jeoteknik yöntemlerle yapılan taşıma gücü analizlerinin sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Jeoteknik çalışmalar üzerine temellendirilmiş izin verilebilir taşıma gücü değerlerinin jeofizik çalışmalardan elde edilen değerlere göre; güvenli tarafta kalma açısından çok daha muhafazakâr sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Tüm sonuçlar dikkate alındığında, jeoteknik ve jeofizik ölçümlerden elde edilen izin verilebilir taşıma gücü değerlerinin oranı 0.65'e yakın bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alan Araştırması, Eğimli Sondaj, Stereografik Projeksiyon, Jeofizik, Taşıma Gücü

INTRODUCTION

The location of the site between the existing Alipasa and Sarıkısık open-pit mines in Karpuzlu-Aydın, western part of Turkey is shown on Figure 1. The topography (platform) on which the plant will be built after the excavations is also shown on the cross-sections in Figure 2. It has been planned that the excavations will be made with depths reaching up to 26 m below the ground surface level (Figure 2). Three boreholes inclined up to 100 m. long were drilled in the plant site (BH-1, BH-2, and BH-3), (Figure 1). Declination angles (deviation angles from vertical) of the BH-1, BH-2, and BH-3 boreholes are 11°, 15°, and 45°, respectively. Geotechnical investigations are based on the ground conditions depending on the borehole data. The loggings of boreholes were performed and assessed from the geotechnical point of view. The rock quality designation (RQD %) and core recovery (CR %) values of the cores from which three inclined boreholes were obtained, were determined, and core losses (core loss = 100 – CR %) were also computed for each length of core run.

The objective of the study involves exploring the ground conditions at and below the surface. This site investigation was performed to provide design information on: i) Three inclined boreholes were drilled in the plant-site. The boreholes were not only drilled to determine

the existence of the ore body, but also to find its vertical extent and to use it for mining purposes. In addition, geological structure and ground conditions including geotechnical data such as fracture frequency (λ), spacing, RQD %, CR % acquired from the borehole exploration and from a geophysical survey. Thus, the zones of weakness beneath the foundation in terms of the fracture frequency were also determined. ii) Foundation bearing capacities of the rock units. The data utilised in engineering geology evaluations involved RQD %, CR %, and some mechanical properties. In this manner, the zones that are problematic in terms of bearing capacity were identified. The site investigation was undertaken to identify and mitigate difficulties that may arise during construction due to the ground conditions, and to mitigate risk associated with the crushing-grinding and flotation project.

Ground conditions were determined by drilling three inclined rotary boreholes to depths ranging from 100 m to 184.35 m (Figure 1). First aim of the borehole drills is to cut vertically the shear zone as much as possible because the albite ore body exists in this zone. It is required that the thickness of the albite ore body into the shear zone is determined in terms of mining operations. The boreholes were drilled to understand whether the thickness of ore body from the mining operations point of view is enough or not. The

orientations of boreholes are determined such a manner that they vertically cut the shear zone as much as possible without considering the in-situ distribution of other discontinuity sets in the subsurface. Second scope of the borehole drills is to investigate orientations of the discontinuity sets in the subsurface and to determine the acute angles between the borehole axes and the joint

sets to find true discontinuity spacing values of the sets. The boreholes were drilled along the geophysical measurement lines (line-1, line-2, and line-3) to match the results each other acquired from both methods (Figure 1). BH-2, BH-3, and BH-1 are located on the line-1, the line-2, and the line-3, respectively.

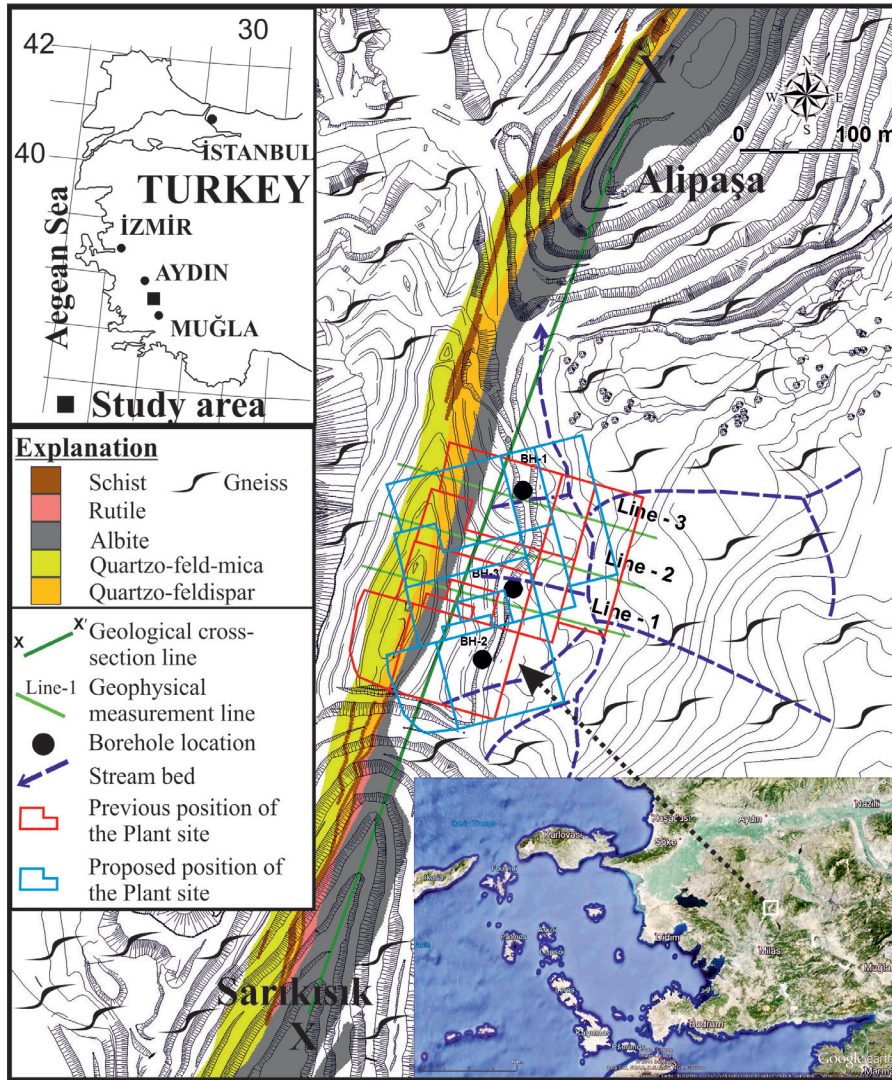


Figure 1. Geological and location map of the plant-site, general topographic conditions of the area, borehole locations and geophysical measurement lines.

Şekil 1. Tesis sahasının lokasyon ve jeoloji haritası, alanın genel topoğrafik koşulları, sondaj lokasyonları ve jeofizik ölçüm hatları.

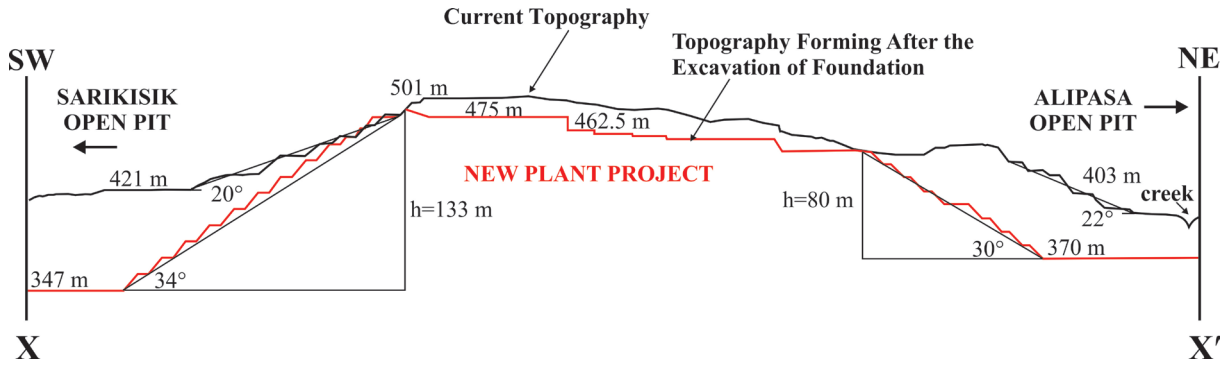


Figure 2. Current topography and the topography forming after the excavation of foundation.

Şekil 2. Güncel topoğrafya ve temel kazısı sonrası oluşan topoğrafya.

While the trends of borehole axes are the same (N70W), plunge angles of them are different from each other. The axis of each drill hole and the joint sets on the stereographic net are considered as a linear element and planar element, respectively. Determination of the acute angle between the axis of drill hole and strike of the discontinuity sets is important in terms of the investigation of fracture distributions in the subsurface. Orientations of the joint sets and shear zone (weakness zone) trending in nearly N-S direction in the plant site have been already known from the scan-line works which will be given in the following sections. In here, what is unknown is the thickness of which is variable along the length of it due to the shear deformation. In this point, the problem is reduced to find the acute angle between a linear element (borehole axis) and a planar element (discontinuity planes). For this reason, the stereographic projection technique was used to determine the true acute angle in this work. The problems involved in interpreting borehole data such as mathematical relationships, the strictly graphical techniques, and the stereographic projection technique. The problems can be solved much more rapidly on the stereographic projection net. It is determined that there are three problems to be solved about the fracture patterns in 3D; *i*) Which discontinuity

set, the value of fracture frequency at any core advance was computed for? Four different discontinuity types were identified during the site investigation works; 1. Discontinuities of the shear zone, 2. Joint sets, 3. Foliations, 4. Mica veins. *ii*) Which discontinuity set was mostly cut along the inclined borehole? *iii*) What are the acute angles between the shear zone, four discontinuity sets and the axes of the drill holes? Three inclined boreholes and the topography of the plant-site were loaded to the Micromine (2014) software. The software provides a useful and straightforward way to investigate fracture distributions in the subsurface in 3D. Thus, the orientations of the discontinuity sets, foliations, shear zone, inclined boreholes in three dimensions (isometric view), and the angular relations with each other were obtained.

The bias introduced by sampling discontinuities along lines, cylinders, and planes has been investigated by such authors as Terzaghi (1965), Priest (1994), Martel (1999), Zhou and Maerz (2002), Haneberg (2009). Martel (1999) developed a particular model for in situ distribution of fractures to analyze fracture pole orientations distributed on a hemisphere, with borehole bias being accounted for. Thus, one can not only predict the distribution and statistics

of fractures poles at a borehole survey but also modify the model based on the mismatch between observations and predictions. This approach presented by Martel (1999) provides a useful way to investigate fracture distributions in the subsurface. Zhou and Maerz (2002) and Haneberg (2009) indicate that the best strategy is to select a combination of different borehole orientations that minimizes the changes that average orientation of any discontinuity set falls into “a blind zone”. The prediction of statistical distribution of fractures’ poles at a borehole survey is beyond the scope of this paper. However, boreholes predominantly intersecting certain joint set /sets were determined using the stereographic projection techniques in this work.

Whether which discontinuity set mostly cut along the inclined borehole or cannot be determined before the borehole planning by using the projection techniques. For this aim,

there are two ways; a) Determination of true acute angle between axis of inclined borehole (linear element) and discontinuity set (planar element). If the true acute angle increases (if it is close to 90°), mostly discontinuity intersects along the inclined borehole, b) Drawing the blind zones around the inclined boreholes. Discontinuity separated from boreholes by angles of 30° or less fall into “a blind zone”. Discontinuity data relevant to the discontinuities fall into this zone are difficult to interpret. As shown by Terzaghi (1965), discontinuities separated from boreholes fall into “a blind zone” and are likely to be statistically under-represented or completely missed in subsurface exploration programs. Subsequent authors confirmed her conclusion. A single inverse technique was described by Terzaghi (1965) in order to reduce this observational bias. If the Figure 3A is rotated at an angle of as much as “90°- plunge angle”, the case of Figure 3B is obtained .

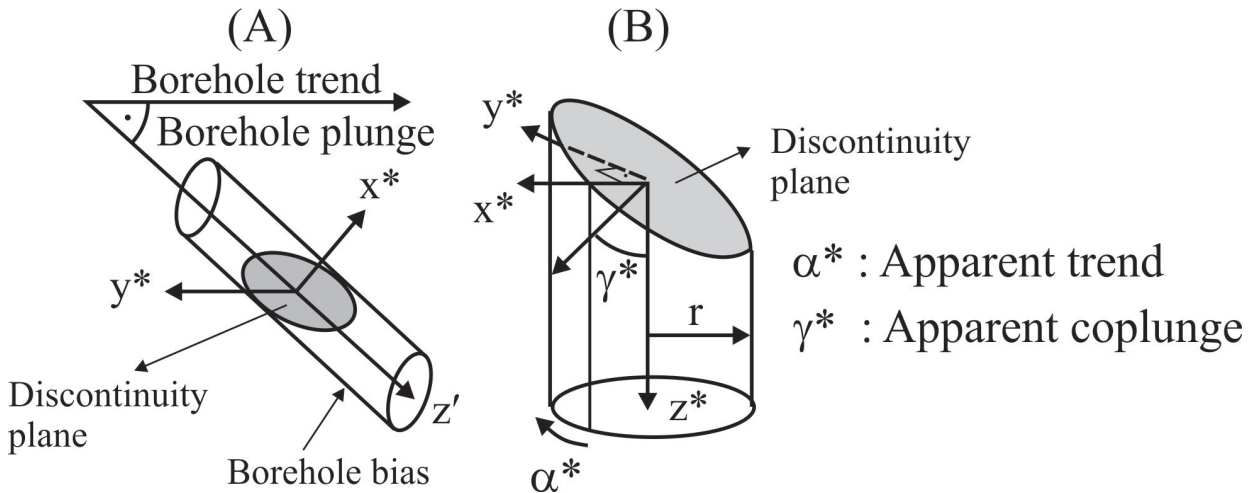


Figure 3. Representation of a discontinuity plane intersecting a borehole (modified from Martel, 1999).

Şekil 3. Bir sondajı kesen süreksizlik düzleminin gösterimi (Martel, 1999'dan değiştirilerek).

The value of true discontinuity spacing for each set was considered in bearing capacity numerical analyses of the weathered metamorphic rock. Bearing capacity is an important factor for the design of engineering structures, particularly when large rock masses are the foundation material (El-Naga, 2004). Bearing capacity values and stresses induced by the bearing loads were determined for heavily-jointed and weathered metamorphic rocks at the site. Bearing capacity analyses were performed using geotechnical methods that utilise RQD values and geophysical method proposed by Tezcan et al. (2006). These methods are suggested by Peck et al. (1974), Bowles (1988; 2001). The factor of safety in the first, second and third methods should be somewhat dependent on RQD %. RQD % is used to reduce the ultimate bearing capacity. Safety factor for rocks is selected between 3 and 6 (Bowles, 1988). This value for soils is selected between 2 and 3. The foundation response and bearing capacity of rock mass near ground surface is greatly influenced by discontinuities and their orientations. On the other hand, the zones with low RQD values indicate the weakness zones under the foundation in rock media. These zones which are in a discontinuous nature and have very high fracture frequency are problematic in terms of bearing capacity due to the low shear strength parameters developed depending on fracturing. Maximum foundation pressure is assigned to the bunker-hopper (width: 6.05 m, length: 6.3 m) which is a unit of the plant (0.51 MPa \approx 51 ton/m²). Other units of the plant will apply lower pressures than the one of bunker.

GEOLOGY

The geology of the plant-site and its surrounding area is dominated by the gneisses. Gneisses are characterised by their massive

structure. The ore bearing zone with a mineralogical composition of Na-feldspar was developed along the shear zone trending NE-SW in the area (Figure 1). It is seen that three rock units crop out in the site: ore body, quartzite-feldspar zone (tectonic zone, shear zone), and gneiss. In addition, mica zones are also seen along the contacts between the quartzite-feldspar zone and the gneiss unit (Figure 1 and 4).

The tectonic zone contains features such as quartzite lenses, rutile and thin mica veins, and albite ore body. Orientation of the albite ore body was determined from the geological investigation performed in the Alipasa open-pit beforehand (Kadağcı, 2011; Koca et al., 2014). Orientation of the ore body (N20-25E/50-70SE) in the plant-site, which locates in the middle of the pits, remains the same (Figure 1). The long axis of the plant is also trending along the same direction. Ore bearing zone was developed along the shear zone with 2.5 km length in the field. For this reason, there are discontinuities with nearly vertical position in both sides of the shear zone. However, the thicknesses of heavily fractured zones present in both sides of the shear zone are not well-known. The thickness of this zone varies due to the structural deformation (Figure 4).

Geological cross-sections were prepared using the borehole data and geological map of the plant area (Figure 4). The A-A', C-C', and E-E' geological cross-section lines are fitted to the geophysical measurement line-1, line-2, and line-3, respectively (Figure 1). In addition, the new topography resulting from the planned excavation works is recorded on these cross-sections. Foundation depths (elevations) of the units on the new topography are also illustrated on the cross-sections (Figure 4).

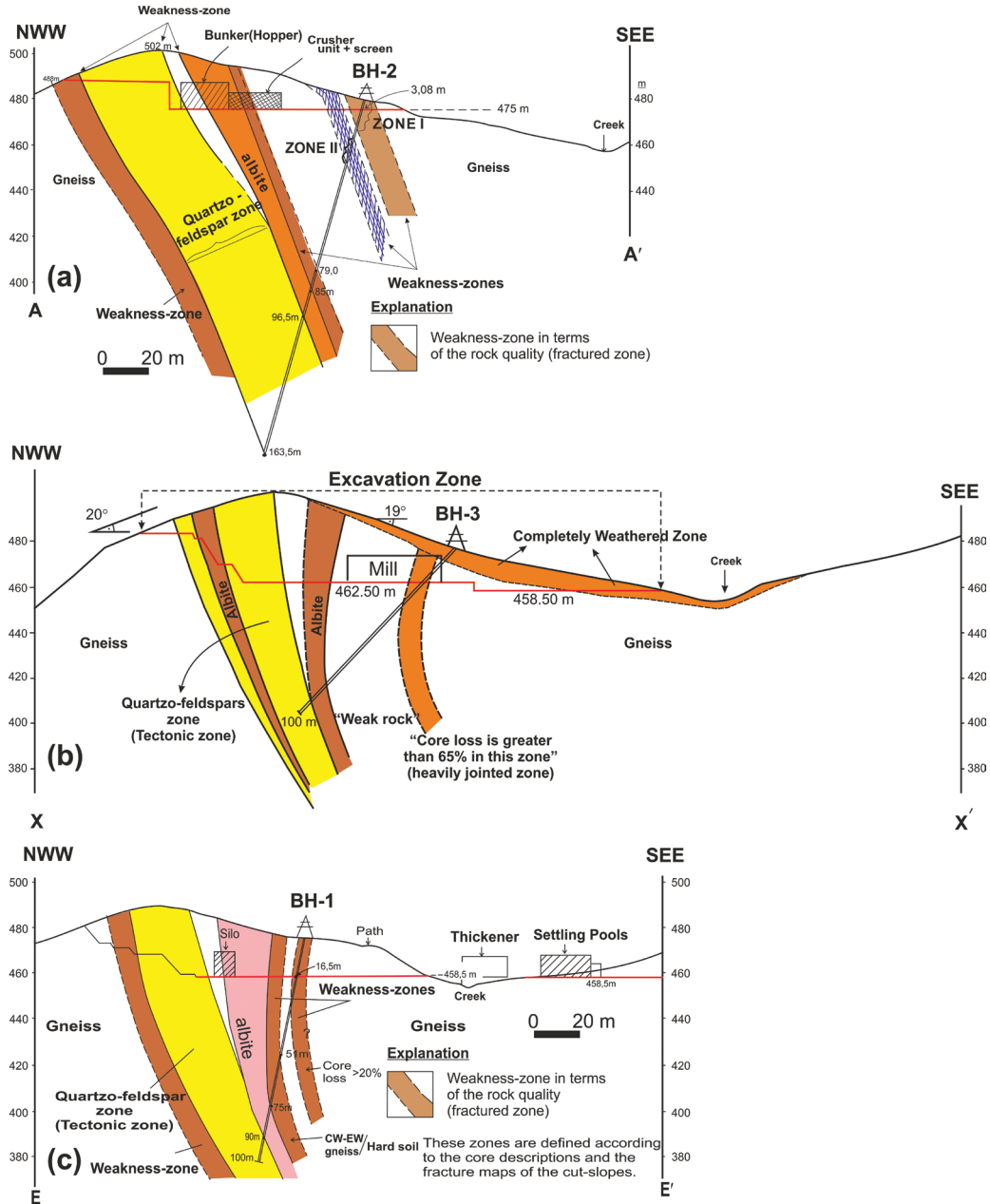


Figure 4. (a) The weakness zones placed at different depths along the BH-2 borehole profile and the locations of some units of the plant (A - A' cross-section), (b) The C - C' cross-section showing the heavily jointed rock zone along the BH-3 borehole, (c) The weakness-zones at different depths along the BH-1 borehole profile and the locations of some units of the plant (E - E' cross-section).

Şekil 4. (a) Tesisin bazı ünitelerinin lokasyonları ve BH-2 sondajının profili boyunca farklı derinliklerde yer alan zayıflık zonları (A - A' kesiti), (b) BH-3 sondajı boyunca yoğun çatlaklı kaya zonunu (gösteren C - C' kesiti), (c) BH-1 sondajı boyunca farklı derinliklerde gözlenen yoğun çatlaklı kaya zonu (zayıflık zonu) ve tesisin bazı ünitelerinin lokasyonları.

METHODS

Field observations, discontinuity surveying including a quantitative description of discontinuities following ISRM (2007), core drilling and laboratory tests were undertaken in this study. Reliable determination of the main discontinuity orientations is very important in terms of the assessment of the subsurface geology. Discontinuity orientations were processed using Dips 6.0 (Rocscience, 2015). Orientations of the main discontinuity sets are determined from statistical interpretation of the discontinuity data acquired from the scan-line works. For this purpose, pole concentration points which represent the discontinuities are obtained by drawing the contour diagrams of the discontinuities by means of stereographic projection net. Thus, the number of joint sets and their orientations are revealed. To determine which discontinuity set will be intersected along the drilling directions of the boreholes are very important in terms of the true interpretation of each discontinuity set. In this work, boreholes predominantly intersecting certain tectonic joint set/sets were determined using the stereographic projection techniques because some boreholes predominantly intersect foliation planes and rarely intersect tectonic joint set/sets. In this case, along a certain borehole, fracture frequency and discontinuity spacing values computed for each core run represents the most intersected discontinuities.

Core samples obtained from the boreholes were investigated and assessed from geotechnical point of view. Discontinuity frequency (λ), RQD %, and CR % (total core recovery) values were determined from the core samples. Core recovery as defined by ASTM D 2113 (1990) is the ratio between the length of recovered core and total

length of core run. The fractured rock mass is described using parameters such as discontinuity frequency (λ) and discontinuity spacing (d), etc. (Hudson and Priest, 1979; Stavropoulou, 2014);

$$\lambda = \frac{\text{No. of discontinuity}}{\text{logging interval}} = \text{No. of disc.} \times m^{-1} \quad (1)$$

Number of discontinuity was directly counted for each length of core run without considering the discontinuity orientation during the core logging. Intersected over an interval of length (the length of core run) along a borehole was only considered. Firstly, the aim in here is to find both the thickness of shear zone along the inclined boreholes and its depth from the ground surface. Secondly, the true thickness of shear zone is computed with help of the formula; $x = y \times \text{Cos}\alpha$. Where, x is the true thickness of weakness zone, y is apparent thickness of weakness zone, " α " is defined as the solid acute angle between the orientation of the borehole and strike of the shear zone.

It was noted by Terzaghi (1965) that the distance between discontinuities on a given discontinuity set along the length of a borehole depends on the orientation of the borehole relative to the discontinuities. For a set of extensive discontinuities having uniform discontinuity spacing, d , the number of discontinuities, N , intersected over an interval of length, L , along a borehole is;

$$N = \frac{L \times \sin\alpha}{d} \quad (2)$$

where, " α " is the acute angle between the strikes of discontinuity and the borehole's axis as a linear element. For a vertical borehole, " α " equals the plunge of the pole point of discontinuity. Therefore, it is supposed that the interval

intersects a large number of discontinuities. Thus, a good approximation is acquired from the Equation 2. Using the angle instead of “ α ”, Equation 3 can be explained in a more general form useful for boreholes’ bias;

$$N = \frac{L \times \cos \gamma^*}{d} \quad (3)$$

where γ^* is the dip angle of discontinuity. The term of \cos in Equation 3 serves as a relative probability and ranges from zero to one ($0 \leq \cos \leq 1$). Relative probability of intersecting a fracture where $\alpha = 90^\circ$ (Borehole axis is just vertical to the discontinuity planes) ($= 0$) is twice that where $\alpha = 30^\circ$ ($= 60^\circ$). A uniform change in the spacing between discontinuities or in their size changes the absolute probability of an intersection for an interval of length but not the relative probability \cos (Martel, 1999).

Terzaghi (1965) suggested that the discontinuities can be divided into groups of essentially the same orientation and the number of discontinuities in a given group, N (apparent), be replaced by (true),

$$\text{where } N^* = \frac{N_{app}}{\sin \alpha} \quad (4)$$

The term of “ $\frac{1}{\sin \alpha}$ ” in Equation 4 is a correction factor (it is also known as Terzaghi correction). The correction factor is large if “ α ” is small. Terzaghi contended that this should give a more representative picture of in-situ distribution of discontinuity orientations. In defining the number and size of groups of fractures with essentially the same orientation, and generally will not be a whole number. Also she cautioned against blind application of her inverse method for discontinuities nearly parallel to a borehole. She considered discontinuities oriented at less than 30° to a borehole to fall in

“a blind zone” where discontinuity data would be difficult to interpret. Equations 3 and 4 suggested by Terzaghi (1965) are used in order to determine the values of discontinuity spacing (d) and fracture frequency (λ) for each core run along the boreholes in this work.

Peck et al. (1974) suggested an empirical correlation between the rock quality designation (RQD %) and allowable bearing capacity stress (q_a), which has a significant influence on the bearing capacity of a rock mass as given in Equation-5. Peck et al. (1974) is a commonly used method, however it is not considered appropriate for detailed design. The RQD has no meaning in terms of bearing capacity evaluations mechanically at a certain level. For this reason, second method proposed by Bowles (1988) is also used in this study.

$$q_a = 1 + \frac{(RQD/16)}{1 - (RQD/130)} \quad (5)$$

The relationship between ultimate bearing capacity (and RQD is made meaningful by means of Equation 6 suggested by Bowles (2001). The second method proposed by Bowles (2001) is based on a limit equilibrium expression for the ultimate bearing capacity of strip footings (Equation 7). The method considers the strength parameters of rock (c , ϕ) and RQD values obtained from core logging (Equation 6). This method can be useful in terms of comparing the q_{ult} values for various foundation types obtained from the other empirical equations considering the RQD values.

$$q'_{ult} = q_{ult} \times (RQD)^2 \quad (6)$$

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \gamma \times B \times N_\gamma \times S_\gamma + c \times N_c \times S_c + \bar{q} \times N_q \quad (7)$$

where, S_c and S_γ denote the Terzaghi shape factors, $S_c = 1.3$ and $S_\gamma = 0.6$ for the circular foundation, $S_c = 1.12$ and $S_\gamma = 0.85$ for the

rectangular foundation, N_c , N_q , and N_γ are the bearing capacity factors for rocks,

$$N_c = 5. \tan^4 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right),$$

$$N_q = \tan^6 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right),$$

$$N_\gamma = N_q + 1, \quad (8)$$

\bar{q} = vertical stress at the base of foundation, q_{ult} is the value of ultimate bearing capacity of rock (Merifield et al. 2006; Saada et al. 2008), and q_{ult}' is the reduced ultimate bearing capacity of the rock. Bowles (1988) proposed Equation 8 also based on

$$\text{RQD}\%: q_{ult} = q_r \times (\text{RQD})^2 \quad (9)$$

The term of “ q_r ” in the Equation 9 is the ultimate strength of rock material determined by uniaxial compressive strength test. Some physical and mechanical properties of the gneisses, ore body, and the zones with mica (micaceous material) were determined by laboratory tests performed according to the suggestions by ISRM (2007).

Numerical analysis was also performed by using Phase² software (Rocscience, 2010) in order to compare the values of allowable bearing capacity computed from the empirical equations considering RQD-value and geophysical measurements. The rock mass was modelled based on the Generalized Hoek-Brown Criterion and the joint sets were imported with regard to the Mohr-Coulomb Criterion.

Geophysical surveys were planned along the profiles that intersect both the plant-site and the shear zone (Figure 1). Geophysical measurement lines were selected at nearly vertical position to the shear zone due to the unknown thickness of heavily fractured zones (weakness zones) present in both sides of the shear zone. The ore body and

the shear zone trends along N 25 E direction in Alipasa and Sarıkısıık open-pits (Koca et al., 2014). This geological structure having a large lenticular mass (a dome-like structure) is confirmed by the current study. In addition, the trend of the shear zone in the N 25 E direction is observed in both the benches of the adjacent mine slopes and the ground surface of the plant-site. The thickness of weakness zones in lateral direction (NW-SE direction) in the gneiss rock mass in the plant site is unknown. Different geophysical methods were applied in this study; the first one is the reciprocal method, and the second one is multi-channel analysis of surface waves (MASW method). The first method is focused on the analysis of structural changes in lateral direction in the field. This method considers the compression wave velocity (V_p), (Palmer, 2001). The second method (MASW) is one of the seismic survey methods for evaluating the elastic condition of the ground for geotechnical engineering purposes. Shear wave velocity (V_s) is a direct indicator of the ground strength (stiffness) and is therefore commonly used to derive load-bearing capacity, especially on rocky formations; the empirical expression given in Equation 10, (Tezcan et al., 2006) is used. In Equation 10, S_v is a reduction factor for materials in which shear wave velocities are greater than 500 m/sec (Equation 11).

$$q_{all} = 0.024 \times \gamma_n \times V_s \times S_v \quad (10)$$

Where γ_n is equal to $[0.44 \times V_s^{0.25}]$.

$$S_v = 1 - 3 \times 10^{-6} \times (V_s - 500)^{1.6} \quad (11)$$

Although, the empirical expressions of Equation 10 are proposed by the writers, on the basis of extensive geotechnical and geophysical soil investigations at 14 different sites, they should be used with caution. For relatively important buildings, and especially until a stage

when the validity of these simple empirical expressions are amply tested and calibrated over a sufficient period of time, the allowable bearing pressure should be determined also by means of conventional methods considering the bearing capacity factors for rocks.

ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE SITE

Firstly, discontinuity scan-line surveys were performed at the site, and the results of

this work are presented in Table 1. The shear zone (tectonic zone) with the properties of the closely-jointed rock mass is trending in a nearly NW-SE direction at the plant-site (Figure 5). The zone has a problem from the perspective of the bearing capacity (Figure 5). Generally, this zone does not behave as a rock mass; in contrast, the zone behaves like a transitional material between weak rock and stiff to very stiff silty clay soil due to closely and very closely spaced discontinuities (Table 1).

Table 1. Quantitative descriptions and statistical distributions of discontinuities of tectonic zone at the plant site.
Çizelge 1. Tesis sahasındaki tektonik zona ait süreksizliklerin istatistiksel dağılımları ve sayısal tanımlamaları.

Range	Description	Distribution (%)	
-	-	Gneiss	Quartzo-feldspar zone with thin mica veins (shear zone)
Spacing (mm)			
< 20	Extremely close	03	04
20-60	Very close	10	20
60-200	Close	40	68
200-600	Moderate	47	?
Persistence (m)			
3-10	Medium	60	34
10-20	High	24	58
> 20	Very high	16	?
Aperture (mm)			
0.25-0.50	Partly open	26	49
0.50-2.5	Open	55	31
2.5-10	Moderately open	19	20

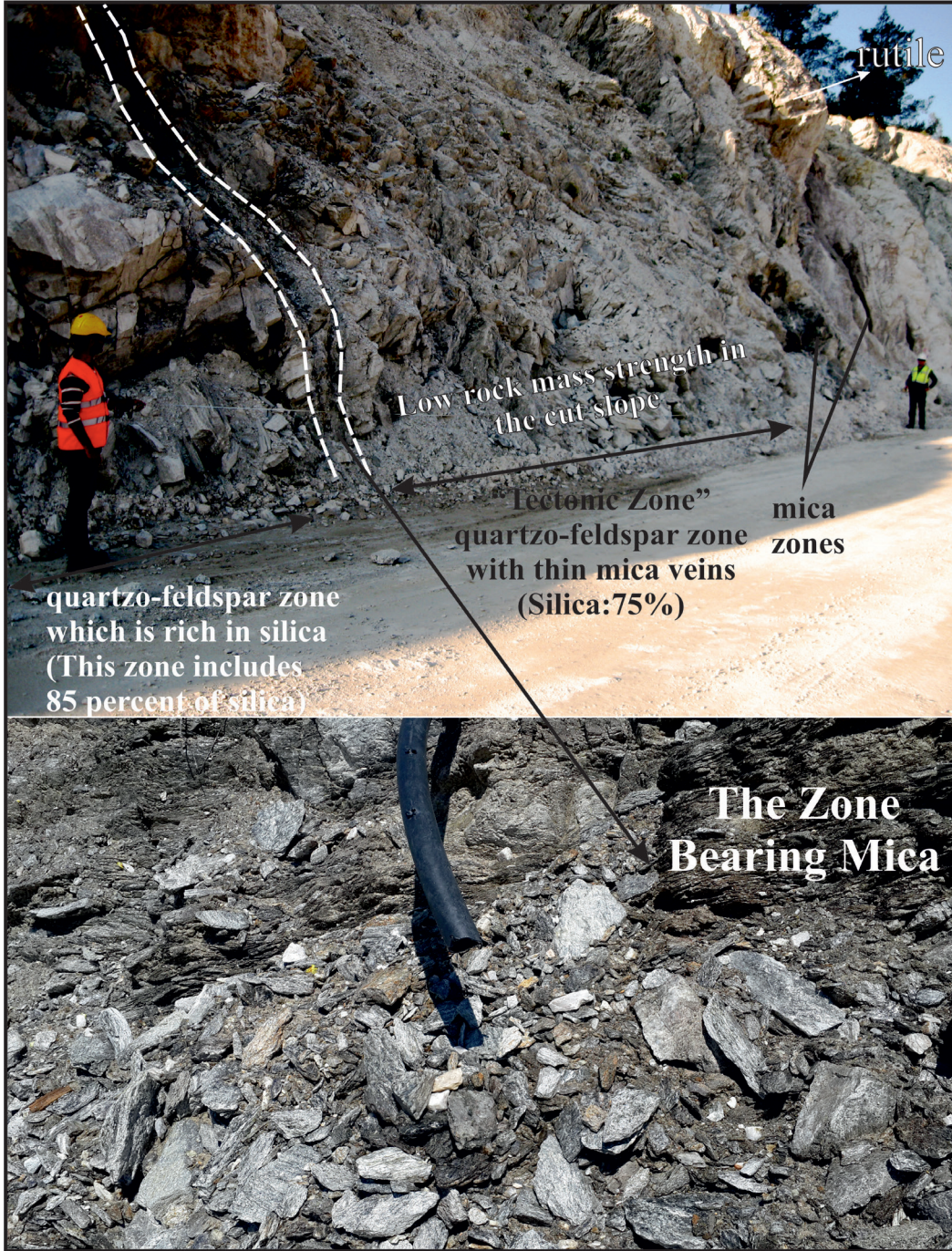


Figure 5. Relationships between the contacts of quartz-feldspar, mica zones and the tectonic zone on the cut-slope located at the Sarıkısık side.

Şekil 5. Kuvarso-feldspatik zon, mikalı zon ve Sarıkısık tarafında yer alan şev basamağı üzerindeki tektonik zon arasındaki ilişkiler.

Secondly, 440 discontinuity measurements were taken from the eastern and southern slopes of the plant-site. Initially, a contour diagram was prepared using all of the discontinuity data (Figure 6). Afterwards, the contour diagrams belonging to the eastern and southern slopes were prepared separately (Figure 7a and b). It is understood from the discontinuity measurements that there are four discontinuity sets that intersect one another.

- I) 47-32/270 and 36/250 Foliations with slightly undulated- smooth surfaces.
- II) 52/21, 86/14 Strikes of the joint sets are the same but their dip directions.
- III) 88/196 Both of them can be considered as one joint-set.
- IV) 65-83/160, 78/342 Both of the joint sets can be considered as one joint-set due to having similar strikes and different dip angles.
- V) 82 / 294

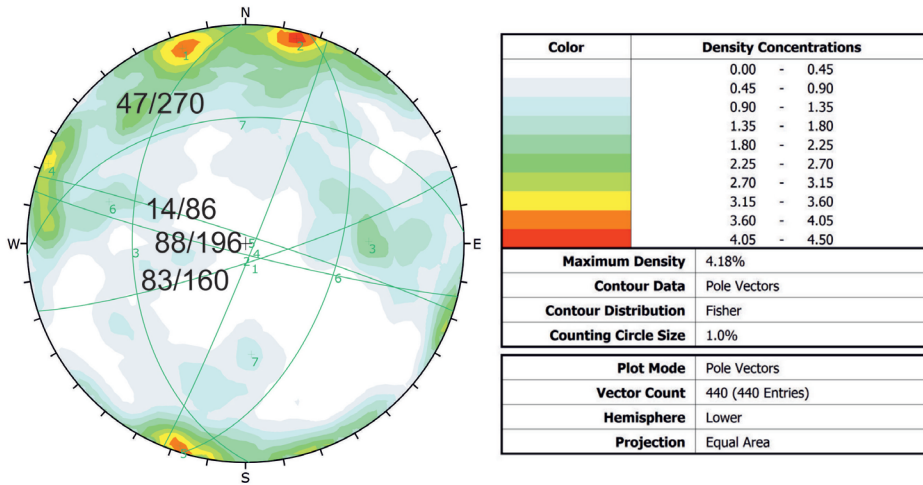


Figure 6. Contour diagram prepared using total discontinuity measurements (440) from the plant area and pole concentration points.

Şekil 6. Tesis alanından alınmış süreksizlik ölçüleri (440) kullanılarak hazırlanmış kontur diyagramı ve kutup yoğunlaşma noktaları.

Strikes of the discontinuities forming the pole concentration points, (and vertically cut into the long axis of the plant-site, and slopes are located at both sides of the site. However, strikes of the discontinuities forming the - pole concentration point are parallel to the long axis of the plant. Orientations of the main discontinuity sets affecting the bearing capacity values and stresses induced by surcharge loads are described below. This case is important in terms of the shear strength of discontinuities affecting the bearing capacity of the rock mass beneath the foundation.

The X-X' geological cross-section with a NE-SW direction (Figure 8) was constructed to investigate fracture distributions in the subsurface. Set of joints appearing in this cross section are very important in terms of the determination of whether the sliding failure from the joints occur beneath the foundation under the axial stress condition or not. It should be noted that the shear stress caused of failure reaches the maximum value when -angle is equal to 45°.

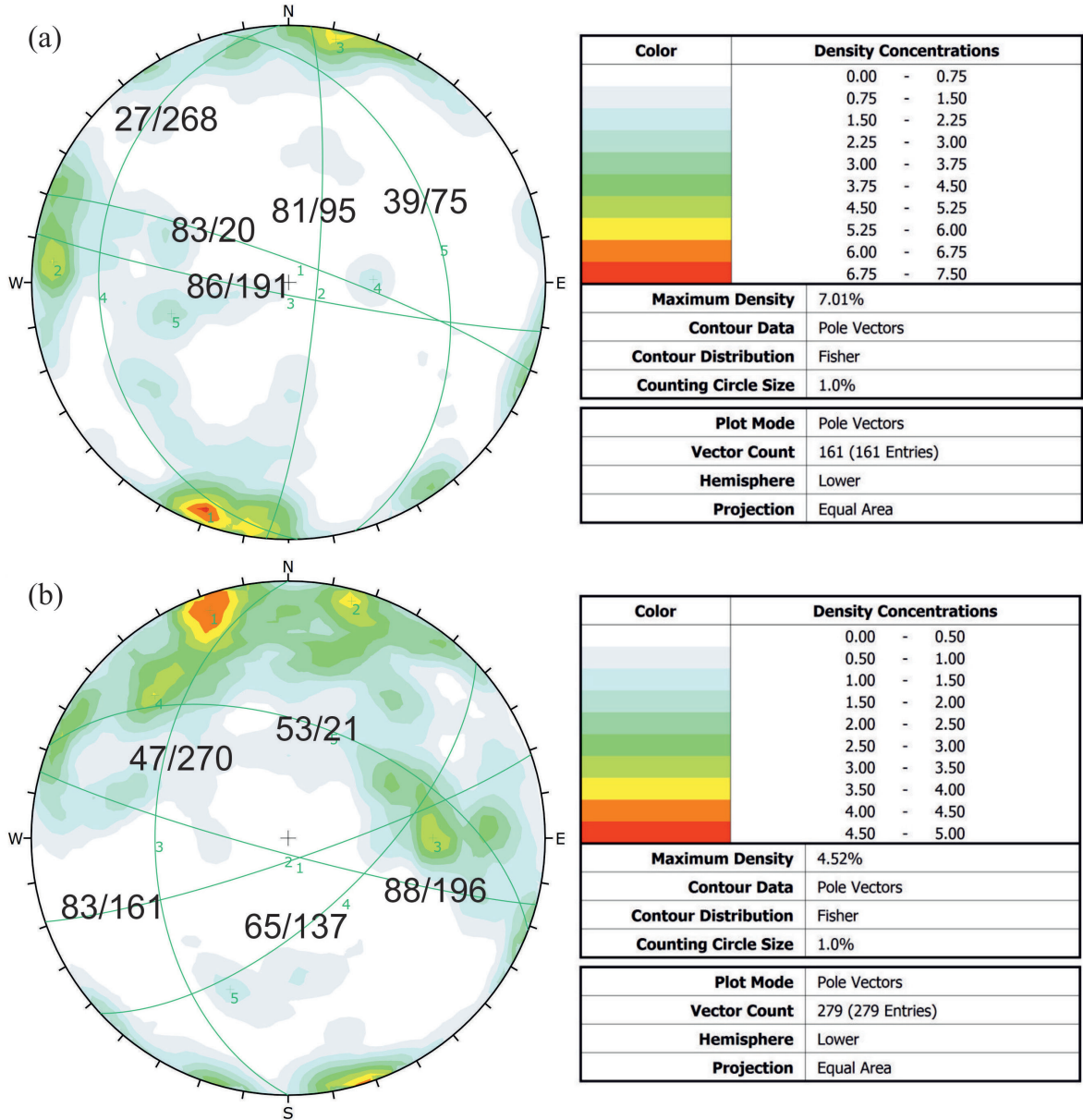


Figure 7. (a) Contour diagram prepared using the discontinuity measurements (161) from the eastern part of the plant area; (b) Contour diagram prepared using the discontinuity measurements (279) from the southern part of the plant area.

Şekil 7. (a) Tesis alanının doğu kesiminden alınmış süreksizlik ölçüleri (161) kullanılarak hazırlanmış kontur diyagramı, (b) Tesis alanının güney kesiminden alınmış süreksizlik ölçüleri (279) kullanılarak hazırlanmış kontur diyagramı.

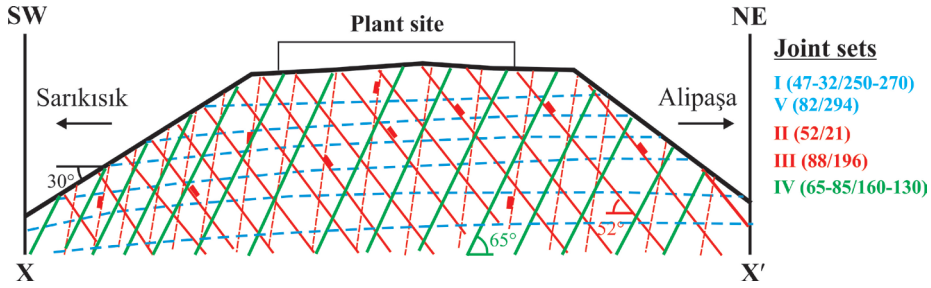


Figure 8. Discontinuity pattern along the X - X' cross-section line.

Şekil 8. X - X' kesit hattı boyunca süreksizlik ağı.

Foliations (set-I) and the discontinuities belonging to the set-V are stayed in nearly horizontal positions at the cross-section since the strikes of the cross-section line and the joint sets-I and V are parallel to each other Figure 8. For this reason, both of them are considered as only one joint-set. Discontinuities of the set-II appear at true dip angles, and their dip directions are towards to the Alipaşa mine. Dip directions of the discontinuities of the set-III lead to the slope-base at high dip angle. For this reason, they are not cut to the overall slope face. Set of joints appear along the X-X' cross-section line (Figure 8).

As a result of the surface water effect on the gneisses, the rock mass weathers to highly (HW) and/or completely weathered (CW) rock mass. On the other hand, the previously weathered or altered gneisses are affected by the present weathering process very quickly. Weathering changes the original colour of gneisses. Generally, gneisses show discoloration at the start of weathering. The discoloration usually starts

from the foliations and tectonic joint surfaces and extends inwards into the blocks. Porosity and microfractures of gneisses are increased by weathering. It is recorded an increase in porosity of as much as 34% in gneisses at advanced stages of weathering from moderately-highly (MW-HW) to highly-completely (HW-CW). The increase of 34% in porosity resulted in a decrease of 41.4% in strength of weathered gneisses (Table 2). In addition, the mean porosity and UCS values of moderately weathered (MW) gneisses are obtained as 2.84 ± 0.94 (n=12) and 27.34 ± 5.30 MPa (n=12, maximum 34.5 MPa, minimum: 23.0 MPa), respectively.

LABORATORY TEST RESULTS

Bearing capacity analyses were performed using some physical and mechanical properties of the geologic units and discontinuity sets at the plant-site. Physical and mechanical properties of the gneisses, ore body, and the zones with mica, and three discontinuity sets were determined in the laboratory (Table 2).

Karagöz, Koca

Table 2. Physical and mechanical properties of gneiss, ore body, and micaceous material.

Çizelge 2. Gnays, cevher ve mikalı malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Some engineering properties of the gneisses, ore body, and weathered mica schist		Test results	
γ_n (kN/ μ^3)	n: 6	25.0 \pm 0.89	
n %	n: 6	3.42 \pm 0.92	
σ_c (MPa) (The gneiss unit with different weathering grades)		Unit weight (γ_n): 0.0235 MN/m ³ Mean: 10.0 \pm 1.50 (n = 7) Maximum: 12.0, Minimum: 8.0 Weathering grade: CW-HW	Unit weight (γ_n): 0.025 MN/m ³ Mean: 17.06 \pm 2.19 (n = 7) Maximum: 20.4, Minimum: 14.0 Weathering grade: HW-MW
σ_c (MPa) (The orebody)	n: 4	Unit weight: 0.027 MN/m ³ Mean: 75 \pm 12.5 "strong rock" in the R4-grade Maximum: 89.4, Minimum: 60.5	
		Foliation Planes	Intact rock material
Shear strength parameters according to the Mohr - Coulomb failure envelope (c' , ϕ')		$\phi' = 36^\circ$ $c' = 0.027$ MPa $\tau = 0.027 + \sigma \tan 36$, $R^2 = 0.97$, n=8	$\phi' = 41^\circ$ $c'_p = 0.05$ MPa $\tau = 0.30 + \sigma \tan 41$, $R^2 = 0.99$, n=6
			Micaceous material
			$\phi'_p = 30^\circ$, $\phi'_r = 22$ $c'_p = 0.05$ MPa $\gamma_n = 0.021 \pm 0.0012$ MN/m ³ $\tau = 0.05 + \sigma \tan 30$, $R^2 = 0.90$, n=4

n: Test number

Rock mass strength of the gneisses in the field is generally much lower due to the abundance of mica-coated joints and micaceous parting planes. However, the shear strength of the discontinuities in all rock types indicates little cohesion, with friction angles ranging from 30° to 41°, depending on rock type and infilling. Shear strength parameters were obtained as cohesion (c) 0.05 MPa and internal friction angle (internal friction angle) 30° from shear strength tests performed on the samples taken from the zones containing mica (Table 2). The strength of a rock material is determined in the laboratory on representative standard samples. In the case of a closely-jointed and/or highly-weathered rock

mass, it is not possible to obtain a sample with suitable dimensions to represent the entire rock mass. Accordingly, the uniaxial compressive strength values of the gneisses were determined as a mean value of 10.0 \pm 1.5 MPa for the CW-HW gneisses and 17.06 \pm 2.19 MPa for HW-MW gneisses (Table 2). In addition, micaceous deposits in the contact between the gneisses and the quartzite unit, as a soft vein or parting planes, are transitional material between very weak rock (UCS < 1.25 MPa) and stiff to very stiff soil. Due to above-mentioned reasons, the elastic modulus (E_s) of the micaceous deposits was estimated at 0,13 \times 10⁶ kPa (130 MPa) as like as silty soil material (Table 3). After that, the value of elastic

modulus was taken as 0.13 kPa for the numerical analysis. In addition, the bulk unit weight of this material was determined as 0.024 ± 0.0012 MN/m³ (Table 2). Input data of the discontinuity sets used in the numerical analyses is given in Table 4. The lower internal friction angle value as $\varphi = 26^\circ$ was determined for the slightly undulated-smooth discontinuity surfaces belonging to the joint set-3. The value of friction angles both for the joint set 1 and 2 were also determined as 36° . As a result of the shear box tests (rock on rock), the values of cohesion of the discontinuities for the joint set-1, joint set-2, and joint set-3 were determined as 100 kPa, 150 kPa, and 150 kPa, respectively. These values are of great importance for the numerical analyses performed by using Phase² software.

Drilling Strategy

First aim of the drilling strategy for this work is to determine the drilling direction such a manner that most nearly perpendicular to the shear zone and ore body trending nearly parallel to the shear zone. Second aim is to determine which discontinuity set will be intersected along the drilling directions of the boreholes. In this work, two different methods based on the stereographic projection techniques were used to provide the aims mentioned above; *i*) Drilling strategy including the determination of the acute angles between the discontinuity sets and axes of the boreholes. The acute angle determination method based on the fixing of the acute angle between linear and planar elements is a new approach in terms of the drilling strategy.

Table 3. Input data of the rock materials used in the numerical analyses.

Çizelge 3. Nümerik analizlerde kullanılan kaya malzemelerine ait yazılım girdileri.

Material parameters (input data)	Rock Units		
	Gneiss	Ore Body	Tectonic Zone
Unit weight (kN/m ³)	25	27	24
Initial void ratio, e %	0.035	0.035	0.035
Deformation modulus (kPa)	1.64×10^6	1.24×10^6	0.13×10^6
Poisson's ratio (ν)	0.28	0.30	0.23

Table 4. Input data of the discontinuity sets used in the numerical analyses.

Çizelge 4. Nümerik analizlerde kullanılan çatlak takımlarına ait yazılım girdileri.

Number of joint sets	Joint plane-1	Joint plane-2	Joint plane-3
Dip/Dip direction	36/250	21/52	78/342
Cohesion (kPa)	100	150	150
Angle of friction ($^\circ$)	36	36	26

This method includes the numerical comparison of acute angle with the limitation of 30° of Terzaghi (1965). *ii*) Drilling strategy considering the plot of “blind zones” around the boreholes and great circles of the discontinuity sets (dip-lines). On the other hand, when these strategies are put forward, drilling cost should be also considered. As known, as the declination angle from the verticality of a borehole increases, drilling cost of it also increases. This case given above is considered in this work. In other words, the applications in the site were performed by reducing the drill angle of a borehole.

Declination angles of BH-1, BH-2, and BH-3 boreholes are 11° , 15° , and 45° , respectively (Figure 4). The acute angles between trend of borehole axis and strikes of discontinuities should not be less than 30° according to the method suggested by Terzaghi (1965). If not, discontinuities belong to any joint set lie in “a blind zone” around a borehole. For this reason, acute angles between the borehole axes (the boreholes’ azimuths are the same - N70W but their plunge angles) and the discontinuity sets are determined by using the stereographic projection technique in this study. Angular relationships between the axes of the drill holes BH-3, BH-2 and bearings of the joint sets are determined as follows in Figure 9. While the BH-3 borehole cuts the shear zone and the discontinuities belongs to the joint set-4 (82/294), the BH-2 borehole cuts the shear zone and the foliation planes into the gneiss rock unit at different angles (35° and 40°) (Table 5, Figure 9 and 10). The acute angles between the shear zone and the axes of the drill holes BH-3, BH-2, and BH-1 are determined as 65° , 35° , and 31° , respectively (Figure 10). The

acute angles for the foliation planes are also determined as 16° , 40° , and 44° , respectively. It should be noted that the plunge angle of BH-3 borehole (45°) is far smaller than the dip angles of the discontinuities that belong to the joint sets.

The distance between discontinuities of a given set along the length of a borehole depends on the orientation of the borehole relative to the discontinuities. The plunge angle of borehole BH-3 (N70W/45NW) is quite close to the dip angles (26° - 42°) of the foliations. The acute angle between the strikes of the foliations and the axis of the BH-3 borehole is determined as 16° (Figure 10). This case given above decreases the probability of BH-2 borehole cut the foliation planes considerably (Figure 10). However, it was found that BH-2 borehole intersected the foliation planes and the shear zone (Figure 10). Foliation planes are cut along the BH-1 and BH-2 boreholes mostly. The discontinuities belonging to the joint set-4 are, on the other hand, cut along the BH-3 borehole mostly (Table 5). The borehole axes of BH-3 and BH-2 boreholes seem to be nearly vertical to the strike of the joint set-4 from Figure 9d. In addition, trend of the borehole axis (N70W) in 3D is nearly the same with dip directions of the discontinuities belonging to the joint set-4. For this reason, they cut each other at small acute angles such as 36° and 7° (Figure 9d). Acute angles between them are determined as to be fairly low on the stereographic net (Figure 9d). A similar case to the one given above is also seen for the joint set-3 (78/342). Acute angles between joint set-3 (planar element) and axes of the boreholes BH-3, and BH-2 are determined as to be 16° and 2° , respectively (Table 5, Figure 9c).

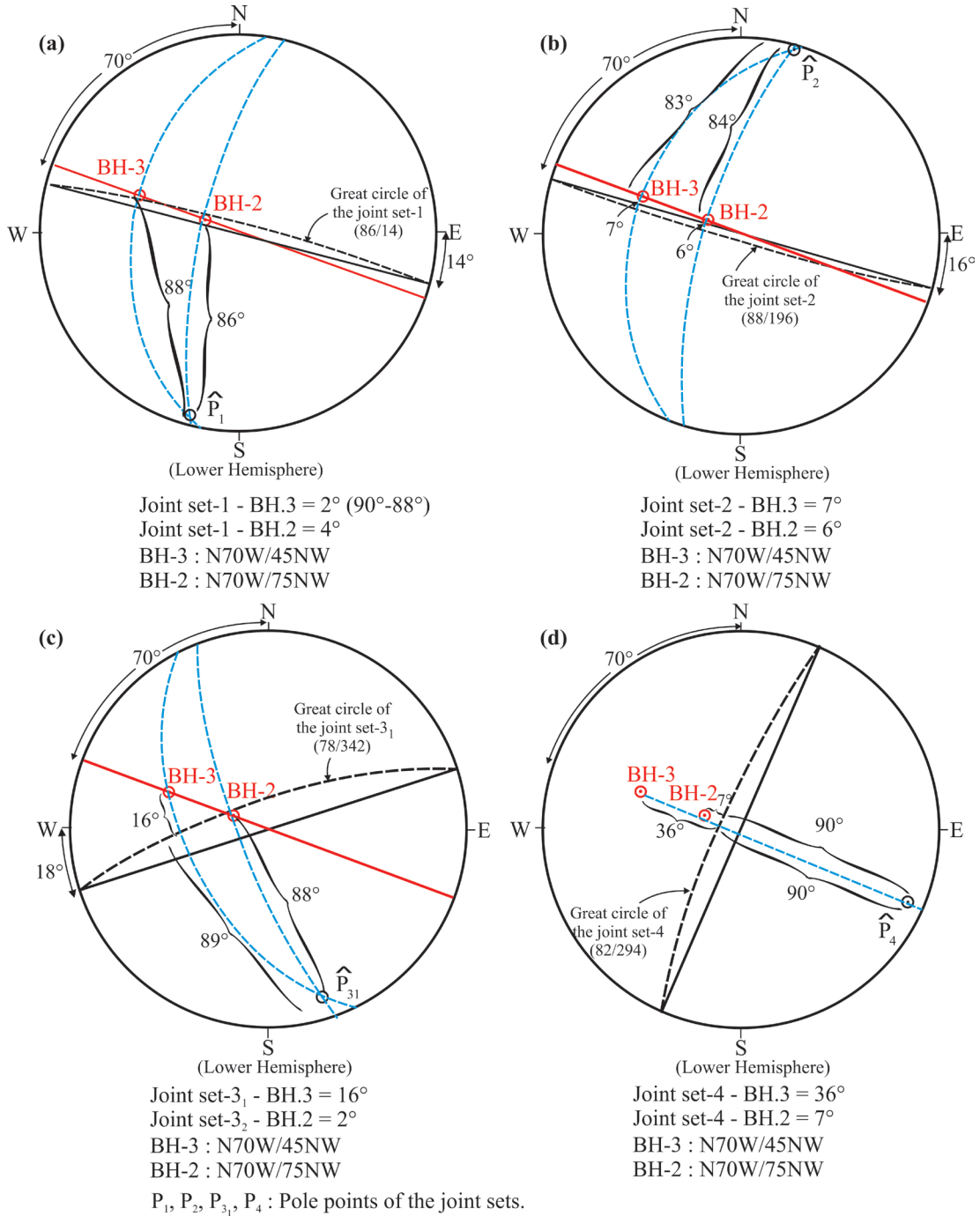


Figure 9. Determination of the acute angles between the borehole axes and the joint sets by means of the stereographic projection technique.

Şekil 9. Stereografik projeksiyon tekniği yardımıyla çatlak setleri ve sondaj eksenleri arasındaki dar açılarının belirlenmesi.

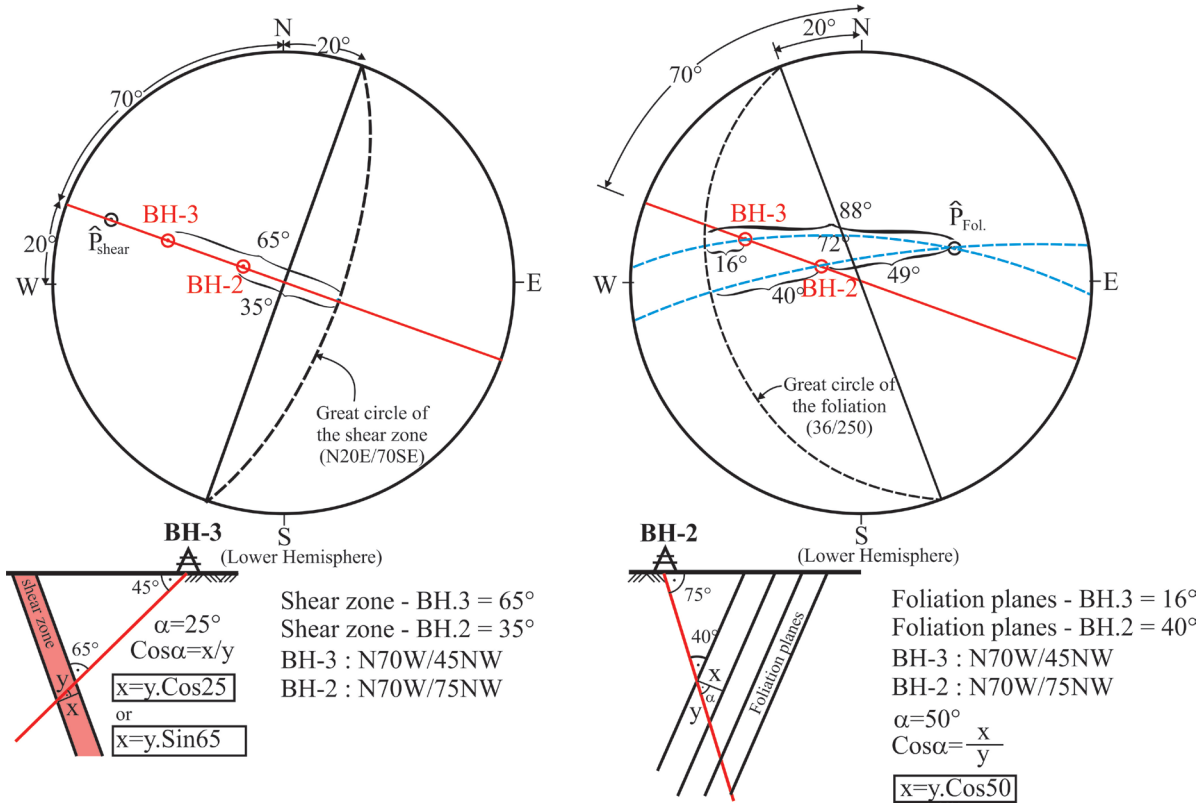


Figure 10. Determination of the acute angles between the borehole axes and the shear zone, and foliation plane by means of the stereographic projection technique.

Şekil 10. Stereografik projeksiyon tekniği yardımıyla foliasyon düzlemleri, makaslama zonu ve sondaj eksenleri arasındaki dar açılardan belirlenmesi.

It will be noticed that BH-2 and BH-1 boreholes intersect the shear zone and the foliation planes mostly. On the other hand, these boreholes cut rarely the discontinuity sets of 86/14 (set-1), 196/88 (set-2), and 78/342 (set-3) (Figure 9 and 10). On the other hand, these boreholes do not cut the discontinuities tagged as 86/14 (set-1) and 88/196 (set-2) since the trends of the axes of BH-2 and BH-1 drill holes are nearly parallel to the strikes of discontinuities belong to the joint set-1 and set-2 (196/88), (Table 5). In addition, BH-2 and BH-1 boreholes rarely cut the discontinuities belong to the joint set-4

(294/82) since the dip angles of joints are nearly equal to the plunge angles of the boreholes and trends of the boreholes are nearly parallel to the dip directions of the discontinuities. This case given above decreases the probability of getting cut of the discontinuities by the boreholes.

All angular relationships at and below the surface are noticed in Figure 11. Isometric views of the ground conditions which include the orientations of the discontinuity sets, shear zone, and inclined boreholes in 3D are presented (Figure 11).

Table 5. The acute angles between the borehole axes (linear elements) and the joint sets, the shear zone and the foliation planes (planar elements).

Çizelge 5. Sondaj eksenleriyle çatlak takımları, makaslama zonu ve foliasyon düzlemleri arasındaki dar açılar.

Type and orientation of discontinuity (dip direction/dip angle)	Orientation of borehole axis (azimuth/plunge)	Measured acute angle (a°)	Numerical comparison	Explanation
Shear zone (110/70)	BH-3 (N70W/45NW)	65	$a > 30^\circ$	Strike of the shear zone is exactly vertical the trend of borehole axis
	BH-2 (N70W/75NW)	35	$a > 30^\circ$	
Foliation plane (250/36)	BH-3 (N70W/45NW)	16	$a < 30^\circ$	BH-2 borehole cuts the foliation planes at a considerably angle (40°).
	BH-2 (N70W/75NW)	40	$a > 30^\circ$	
Joint set-1 (14/86)	BH-3 (N70W/45NW)	2	$a < 30^\circ$	The trend of borehole axis is nearly parallel to the strike of the discontinuity set. Boreholes rarely cut this set for each length of core run.
	BH-2 (N70W/75NW)	4	$a < 30^\circ$	
Joint set-2 (196/88)	BH-3 (N70W/45NW)	7	$a < 30^\circ$	
	BH-2 (N70W/75NW)	6	$a < 30^\circ$	
Joint set-3 ₁ (342/78)	BH-3 (N70W/45NW)	16	$a < 30^\circ$	Boreholes rarely cut this set for each length of core run.
	BH-2 (N70W/75NW)	2	$a < 30^\circ$	
Joint set-4 (294/82)	BH-3 (N70W/45NW)	36	$a > 30^\circ$	The trend of borehole axis and the dip directions of discontinuities are nearly the same. The borehole intersects both the shear zone and joint set-4.
	BH-2 (N70W/75NW)	7	$a < 30^\circ$	

Drilling Strategy Considering the Acute Angles Between the Axes of the Boreholes and Discontinuity Sets

The light gray circles represent 30° cones defining the blind zones (shadow zones) around the BH-3 and BH-2 inclined boreholes (Figure

12). Cones (Cone-1 and Cone-2) representing the shear zone intersected by the drill holes 2 and 3 are presented in Figure 12. The representation of these cones at the earth's surface is also presented in the same figure. The discontinuities separated from the boreholes by an angle of 30° lie in this zone.

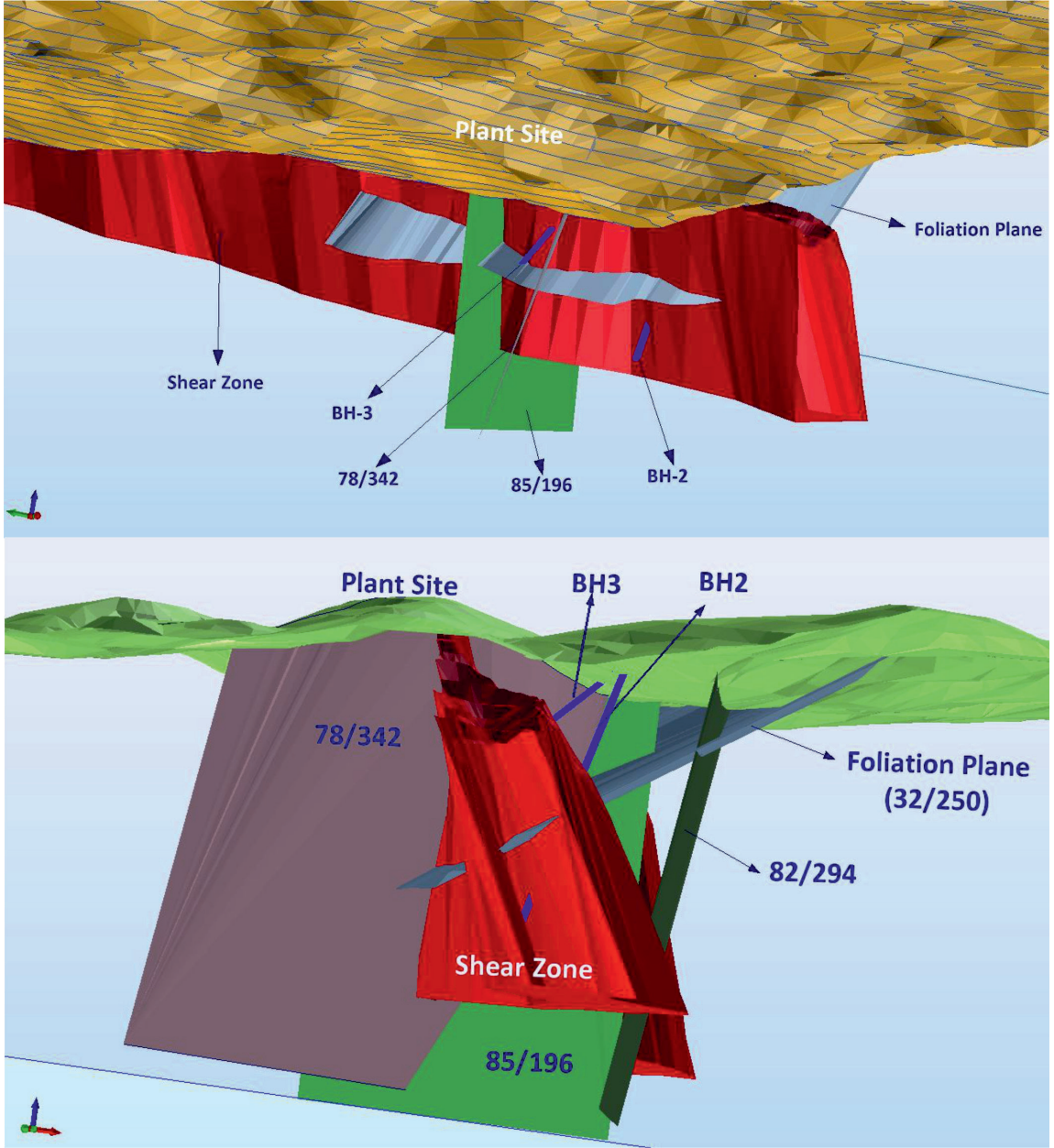


Figure 11. Isometric views of the ground conditions at and below the surface which include the orientations of the discontinuity sets, shear zone, foliation planes and inclined boreholes in three dimensions (3D).

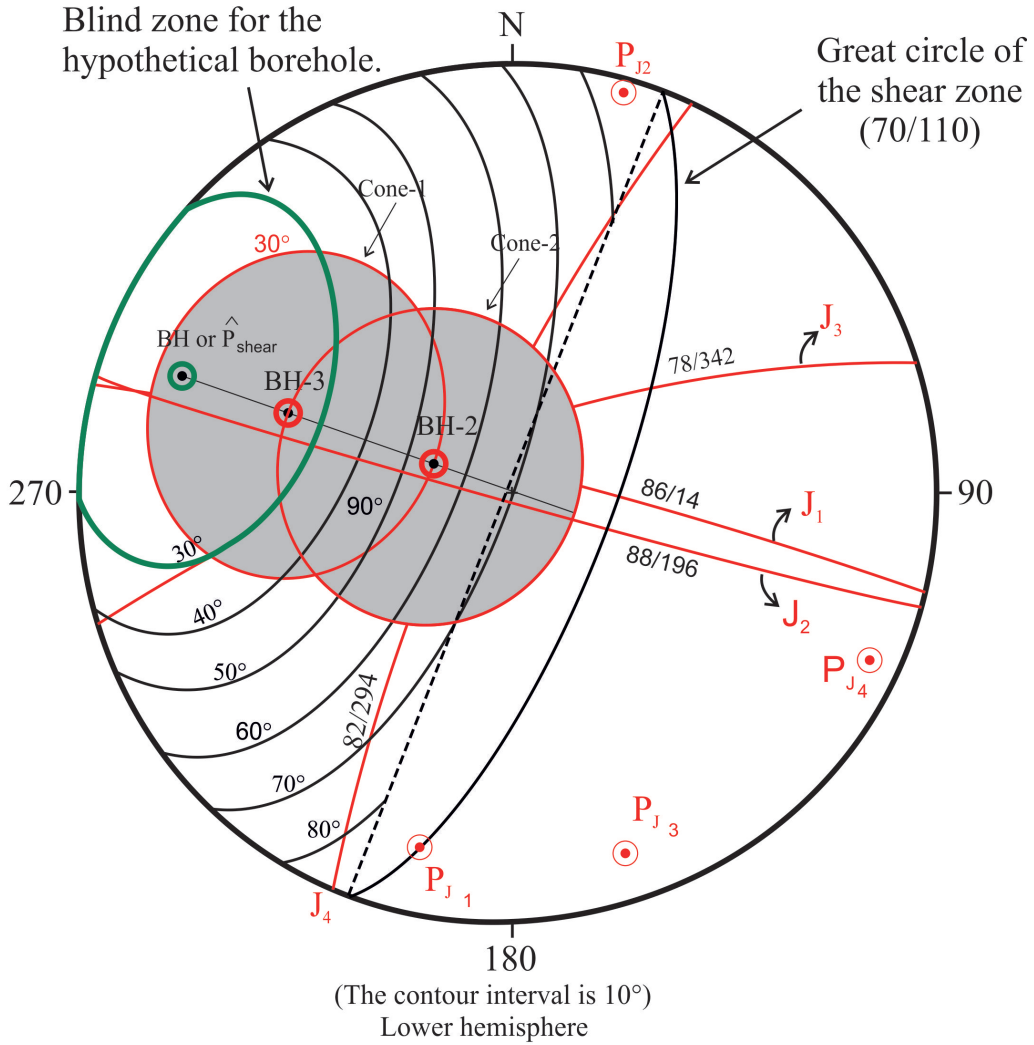
Şekil 11. Süreksizlik takımları, makaslama zonu, foliasyonlar ve eğimli sondajların konumlarını içeren 3D görüntüsü.

Except the shear zone and the joint set 4 (Joint set 4 – BH-3 = 36°), the acute angles between the trends of boreholes axes and the strikes of the joint sets are determined to be less than 20° (Figure 12). If the borehole had just been drilled in this point, a single minimum at 20/290 (shear) for the shear zone (70/110) would have been produced according to the method suggested by Haneberg (2009) (Figure 12). In here, the drilling direction that is most likely to minimize bias is described as the minimum (20/290). Borehole bias is normal to a discontinuity in which case the borehole point and the pole point of discontinuity coincide. Minima are sought because they represent drilling directions that should produce the smallest aggregate difference between the borehole and the poles of the discontinuities. In this study, the most suitable drilling direction is that of the BH-3 borehole because orientation of the BH-3 borehole is more close to the point of shear than that of the BH-2 borehole. Lower hemisphere equal area projection illustrating a drilling strategy for the shear zone is represented in Figure 12.

It should be noted that the boreholes rarely cut the discontinuities belong to the joint sets due to the orientation of the boreholes relative to the discontinuities, except the case between the borehole axis of BH-3 and the joint set-4. The borehole axis of BH-3 cut at a certain degree the joint set-4 (acute angle: 36°). The highest acute angle value is obtained as 65° from the relationship between the trend of BH-3 borehole axis and the shear zone. For this reason, the values of discontinuity spacing (d) and frequency


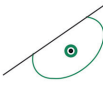
(λ) for each core run along the BH-3 borehole are determined according to the number of discontinuities, N, intersected over an interval of length, L, and acute angle (α) between the trend of BH-3 borehole axis and the shear zone (Table 7). In order to match the data acquired from both boreholes, the values of “d” and “ λ ” for each core run along the BH-2 borehole are also determined (Table 6).

While the BH-3 borehole cut the shear zone at fairly high angle (65°), BH-2 and BH-1 boreholes cut both the shear zone and the foliation planes into the gneiss rock mass relatively at low angles (35° and 40°), (Table 6 and 7). As a result, of this case, much more number of discontinuity (discontinuity number: 143) is intersected along the BH-3 borehole than the ones (discontinuity number: 105) along the BH-2 borehole for the depth of 25.5 m from the ground surface level (Table 6). At depths ranging from the surface to 25.5 m for two boreholes, discontinuities are intersected at different number for each borehole due to the different acute angles between the trend of borehole axis and the strikes of discontinuities. For this reason, it is determined that the values of fracture frequency belonging to the BH-2 borehole for each core run are greater than the ones for the BH-3 borehole, except the shear zone (Table 6 and 7). BH-3 borehole cut more number of discontinuities at the ratio of 26.57 % than that of the BH-2 borehole. The values of fracture frequency along the shear zone are nearly the same for both boreholes because the zone has a rock mass including very closely spaced discontinuities.



J_1, J_2, J_3, J_4 : Great circles of the joint sets

$P_{j1}, P_{j2}, P_{j3}, P_{j4}$: Pole points of the joint sets

 : Blind zones for the BH-2 and BH-3 boreholes.
 : The case that a hypothetical borehole and pole point of the shear zone coincide.
 (The most suitable borehole location because angular deviation for the shear zone is minimum in the pole point of the shear zone (P_{shear})).



 ,  : borehole (BH-3, N70W/45NW,
 : BH-2: N70W/75NW, BH: N70W/20NW)

Figure 12. Lower hemisphere equal area plot illustrating a drilling strategy for the shear zone and joint sets.

Şekil 12. Makaslama zonu ve çatlak takımları için bir sondaj stratejisini gösteren eş alan projeksiyonu.

Table 6. The values of discontinuity spacing and frequency for each core run along the BH-2 borehole (acute angle between the BH-2 borehole and the shear zone = 35°, $\text{Cos } \gamma^* = 0.5725$).

Çizelge 6. BH-2 sondajı boyunca makaslama zonundaki her bir ilerleme için süreksizlik sıklığı ve süreksizlik ara uzaklığı değerleri (BH-2 sondajı ve makaslama zonu arasındaki derece 35°).

Core run (m)	L (m)	N*	N	d (cm)	λ (m ⁻¹)	Joint spacing (ISRM 2007)
2 - 4	2	17.5	10	6.5	15.4	
4 - 7	3	16	9	10.7	9.3	
7 - 10.5	3.5	24.5	14	8.2	12.2	
10.5 - 13	2.5	10.5	6	13.6	7.3	
13 - 14.5	1.5	7	4	12.3	8.1	
14.5 - 17.5	3.0	17.5	10	9.8	10.2	
17.5 - 18.5	1.0	7	4	8.2	12.2	Close spacing (closely jointed rock mass)
18.5 - 20.0	1.5	9	5	9.5	10.5	
20.0 - 21.5	1.5	9	5	9.5	10.5	
21.5 - 24.0	2.5	10.5	6	13.6	7.3	
24.0 - 25.5	1.5	7	4	12.2	8.2	
25.5 - 27.0	1.5	9	5	9.5	10.5	
27.0 - 30.0	3.0	14	8	12.2	8.2	
30.0 - 31.5	1.5	10.5	6	5.4	18.5	Very close spacing
31.5 - 36.5	5.0	16	9	17.9	5.6	Close spacing
			105	10.6 ± 3.15	10.3 ± 3.33	

d: Discontinuity spacing = $\frac{L \cdot \text{xcos}\gamma}{N}$, $N = N \cdot \frac{1}{\text{sin}\alpha}$, $\frac{1}{\text{sin}\alpha}$ = Correction factor.

Table 7. The values of discontinuity spacing and frequency for each core run along the BH-3 borehole (acute angle between the BH-3 borehole and the shear zone = 65°, $\text{Cos } \gamma^* = 0.9063$).

Çizelge 7. BH-3 sondajı boyunca makaslama zonundaki her bir ilerleme için süreksizlik sıklığı ve süreksizlik ara uzaklığı değerleri (BH-3 sondajı ve makaslama zonu arasındaki derece 65°).

Core run (m)	L (m)	N*	N	d (cm)	λ (m ⁻¹)	Joint spacing (ISRM 2007)
0 - 6.0	6.0	31	28	17.5	5.7	Close spacing
6.0 - 7.0	1.0	3.3	3	27.5	3.6	Moderate spacing
7.0 - 9.5	2.5	20	18	11.3	8.8	
9.5 - 12.5	3.0	21	19	12.9	7.8	
12.5 - 15.5	3.0	24	22	11.3	8.8	Close spacing
15.5 - 17.5	2.0	10	9.0	18.1	5.5	(closely jointed rock mass)
17.5 - 18.5	1.0	12	11	7.5	13.3	
18.5 - 21.5	3.0	17	15	16	6.2	
21.5 - 24.5	3.0	13	12	21	4.8	Moderate spacing
24.5 - 25.5	1.0	6.6	6	13.7	7.3	Close spacing
			143	15.7 ± 5.71	7.2 ± 2.74	

Drilling Strategy Considering the Blind Zones

A drilling strategy for situation in which discontinuity orientation is unknown, was outlined by Terzaghi (1965). Two stereographic projections (stereograms) showing the right and the wrong drilling strategies are presented in Figure 13 and 14, respectively. Figure 13 and 14 show two lower hemisphere equal area projections with 30° blind zone for the inclined boreholes. Discontinuities for which dip-lines (defined by a dip and dip direction) fall into the blind zones for the boreholes are unlikely to be encountered in that boreholes. Those discontinuities will, however, be encountered in other boreholes as long as the blind zones do not overlap.

In the right strategy, position of the shear zone (shear zone:70/110) is considered as in Figure 13. On the other hand, if the dip direction of the shear zone had been rotated at an angle of 180° with the same strike, the inclined boreholes would not intersect the shear zone (wrong strategy) as illustrated in Figure 14 (shear zone: 70/290). There are two reasons to distinguish right and wrong strategies. *i)* While BH-2 borehole does not cut the shear zone in the wrong strategy, in the right strategy, the borehole cut the shear zone. *ii)* While BH-3 borehole cut very few numbered discontinuity in the shear zone in the wrong strategy, the borehole cut considerably the discontinuities in the shear zone, but as much as at BH-2 borehole in the right strategy. In the right strategy, the acute angle between BH-3 borehole and the discontinuities in the shear zone is 65° (Figure 13). This angle in the wrong strategy is 25° (Figure 14). This case indicates that BH-3 borehole will cut most discontinuity along the shear zone at the right strategy. This case also affect the values of discontinuity frequency and spacing along the boreholes.

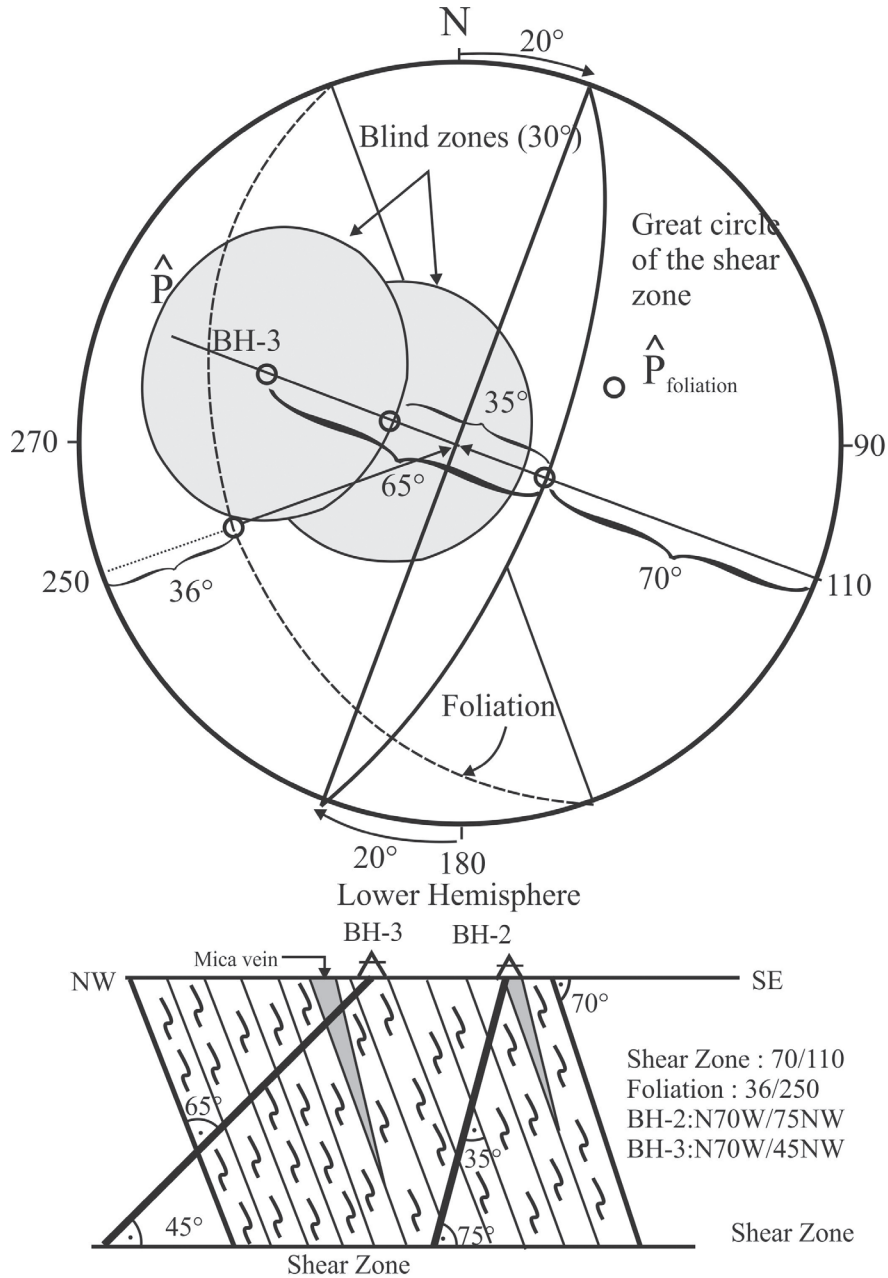
In situations in which there is no knowledge of the discontinuities to be encountered during subsurface exploration, the best strategy is to select a combination of different borehole orientations that minimizes the changes that the average orientation of any discontinuity set falls into a Terzaghi (1965) blind zone.

Bearing Capacity Analyses Performed by Using the Equations Considering the RQD Value

Discontinuity numbers were counted along the borehole profiles. Thus, the value of discontinuity frequency (λ) and spacing (d) were computed for each core run. Variations of the fracture frequency (λ), spacing (d), RQD %, CR %, and core loss (CL % = 100 - CR %) with depth along the borehole profiles are presented in Figure 15. Zones where the core loss is greater than 30% are observed in three levels located at the different depths of the boreholes (Figure 15). These zones are located in the highly-weathered gneisses. The increase of fracturing in these zones (weakness zones) relative to the adjacent rock is up two to three times (as revealed by the core logs). These zones are as follows; in the BH-1, zone-I: 0-8 m, zone-II: 14- 22 m, and zone-III: 23.40-28 m; in the BH-2, zone-I: 0 -7.40 m, zone-II: 10.50-18.70 m, and zone-III: 25-30 m; in the BH-3, zone-I: 0 - 9.50 m, zone-II: 15.50-17.50 m, and zone-III: 21.50-25.50 m. If these zones mentioned above are correlated, they appear to exist in the three weakness-zones in the gneisses trending in NE-SW direction. The weakness zones both in the gneiss unit and in the contacts between the geological units are shown in the A-A', C-C', and E-E' cross-sections (Figure 4). It is determined that the geological structure, which has a large lenticular mass similar to a salt plug, rose towards the surface and the weakness zones in terms of the fracture intensity. Weakness

zones are in accordance with the geologic structure (Figure 4). It should be noted that this

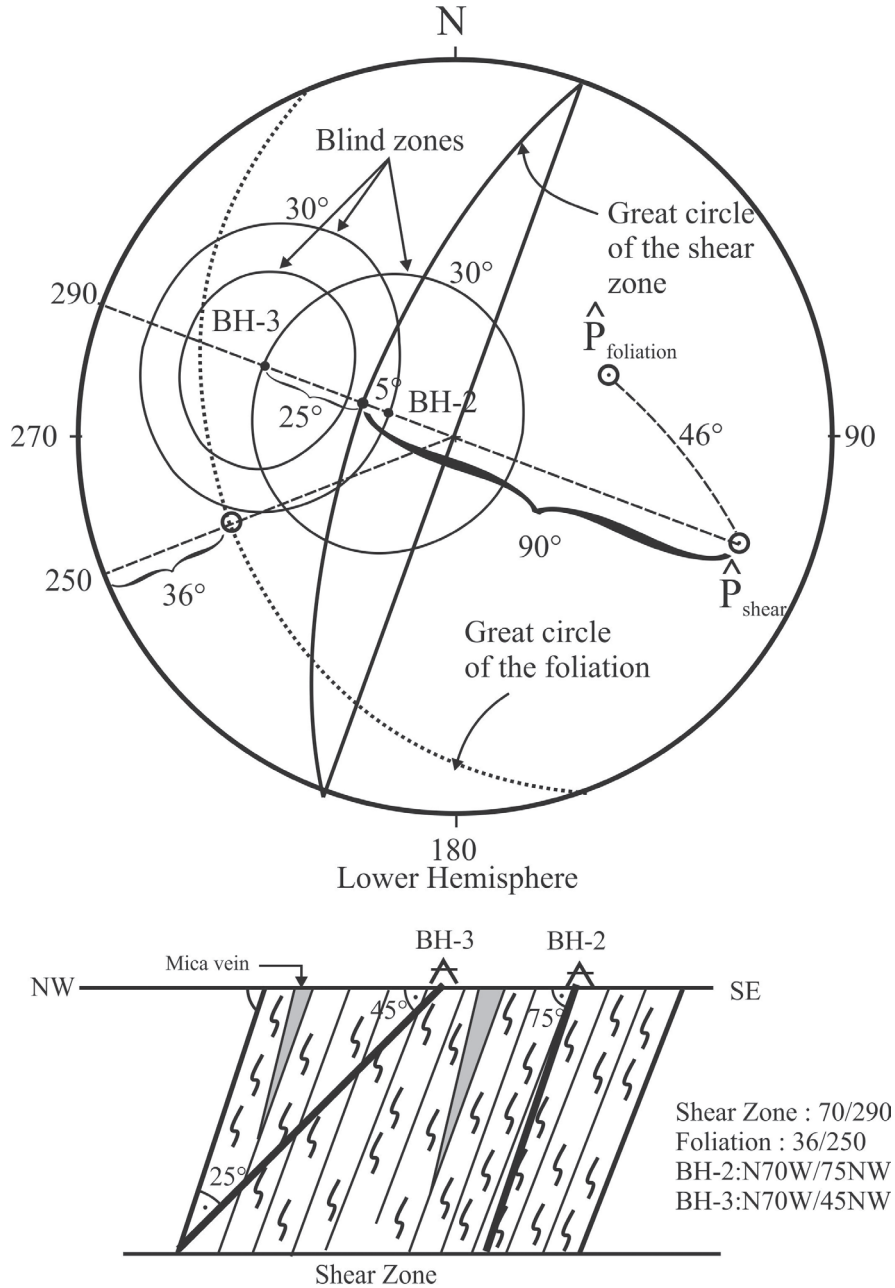
structure consisting of the weakness zones is also determined by the geophysical survey.



Both inclined boreholes intersect the shear zone. The BH-3 borehole cut more numbered discontinuity along the zone than the one of the BH-2 borehole.

Figure 13. The right drilling strategy for the shear zone and its lower hemisphere projection.

Şekil 13. Makaslama zonu için doğru sondaj stratejisi ve onun alt yarım küre projeksiyonu.



BH-2 borehole does not cut the shear zone. It should be noted that the great circle of shear zone (70/290) fall into the blind zone of BH-2 borehole (acute angle : 5°). BH-3 borehole however, cut very few numbered discontinuity along the zone.

Figure 14. The wrong drilling strategy and its lower hemisphere (If the shear zone had been inclined to the NW direction, BH-3 borehole would intersect very few numbered discontinuity).

Şekil 14. Yanlış sondaj stratejisi ve ona ait alt yarım küre projeksiyonu (Makaslama zonu KB'ya eğimli olsaydı BH-3 sondajı çok daha az sayıda süreksizlik keserdi).

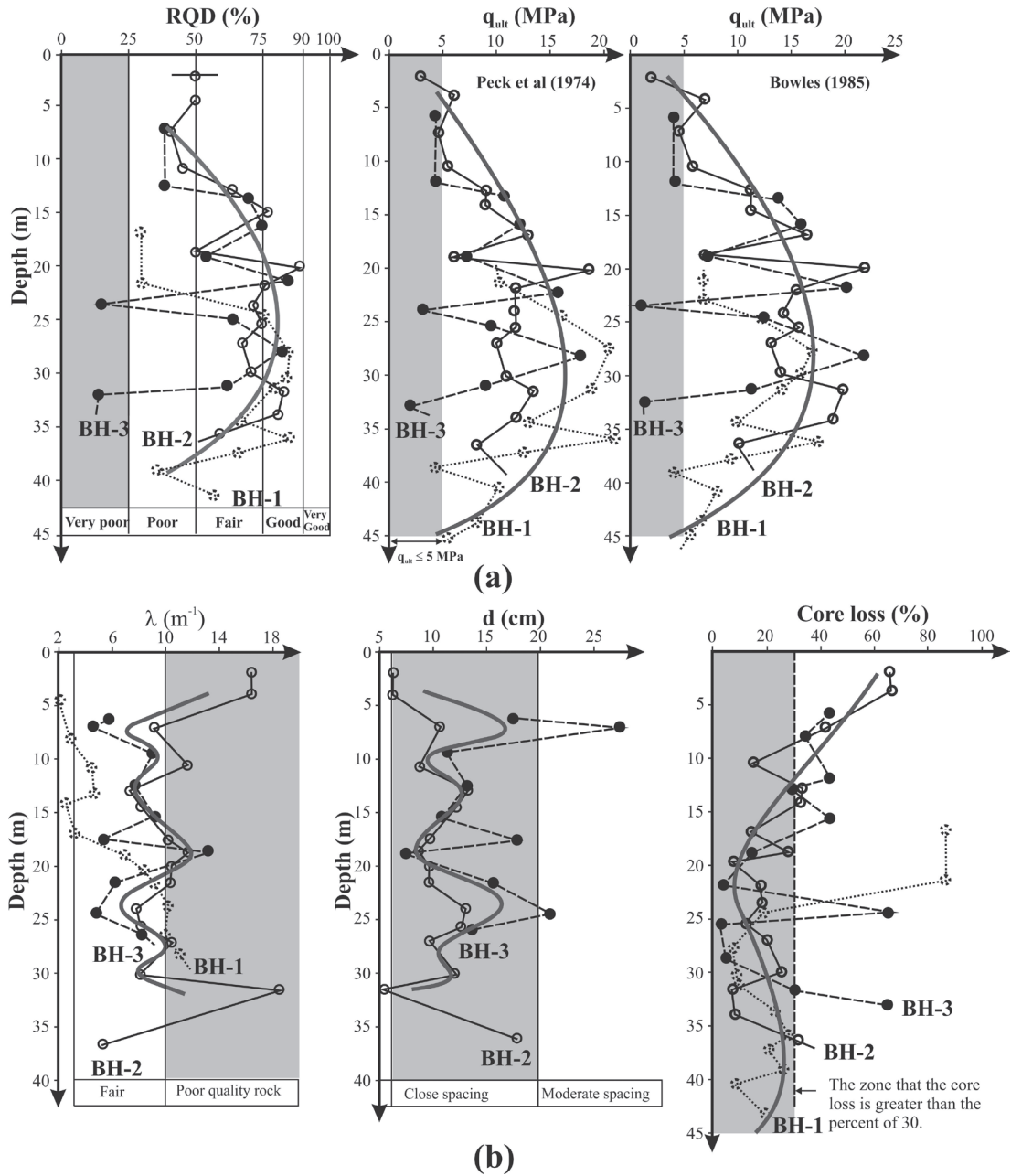


Figure 15. (a) Variations of the RQD% values and ultimate bearing pressures (q_{ult}) with depth (The zones which the q_{ult} is lesser than 5.0 MPa, is gray coloured), (b) Variations of the fracture frequency (λ), spacing (d), and core loss (%) with depth along the borehole profiles (The depth of platform in BH-3 on which the plant will be constructed is 6.63 m. These depths in BH-1 and BH-2 are 2.525 m. and 3.08 m, respectively).

Şekil 15. (a) Derinlikle nihai taşıma gücü ve RQD değerlerinin derinlikle değişimi ($q_{ult} < 5.0$ MPa olan zonlar gri renklidir), (b) sondaj profilleri boyunca karot kaybı, süreksizlik aralığı ve sıklığının derinlikle değişimleri (Üzerine tesisin inşa edileceği platformun derinlikleri; BH-3, BH-1 ve BH-2 sondajlarında sırasıyla 6.63 m, 2.525 m ve 3.08 m'dir).

Determination of this structure is of utmost importance both for the mining operations and for the determination of the bearing capacity zone. It is thought that bearing capacity problems will occur due to the existence of the tectonic zone with heavily-jointed rock properties (close spacing and poor quality rock) and the contacts between the geological units including the sheared surfaces. These surfaces are clearly observed in the cut-slope face located in the southern part of the plant area (Figure 5). As expected, shear strength along the shear surfaces are very low or nearly zero due to the lack of cohesion along these surfaces. For BH-1, BH-2 and BH-3 boreholes, the results of computations of the allowable bearing pressure of gneisses are

presented in Tables 8, 9, and 10, respectively. The results obtained from different geotechnical methods are also reported in these tables. The foundation pressure of the bunker is 0.51 MPa on the ground surface. The zones which are under this value are given above in terms of the bearing capacity: in the BH-1, 0-4.10 m; in the BH-2, 0-7.40 m; and in the BH-3, 15.50-17.50 m and 24.50-25.50 m. In these zones, core losses reach the maximum values (Figure 15). The general trend in the graph of the variation of RQD-values with depth is similar to the graph of the normal distribution. The variation of ultimate bearing pressure with depth is also seen in this graph (Figure 15).

Table 8. Bearing capacity values obtained from different equations along the BH-1 borehole (z: 461.02 m, platform base of the plant: 458.15 m).

Çizelge 8. BH-1 sondajı boyunca farklı derinlikler için farklı eşitliklerden elde edilen taşıma gücü değerleri.

Depth (m)	RQD (%)	q_u (kg/cm ²)		The methods considering the RQD% value			q_a (MPa) Suggested Allowable Bearing Pressure ($q_a = q_{ult}/F_s$)	
		Depth (m)	q_u	q_{ult} (MPa) Peck et al. (1974)	q_{ult} (MPa) Bowles (1988)	q_{ult} (MPa) Bowles (2001)	$F_s = 3$	$F_s = 6$
4.10-4.80	61.0	-	-	10.4	7.10	-	1.1	2.2
4.80-7.80	75.6	5.10	190	15.98	12.3	10.8	1.8	3.6
7.80-10.70	85.7	8.50	235	20.5	16.7	17.2	2.3	4.6
10.7-13.25	84.3	12.0	268	19.8	16.0	19.0	2.65	5.3
13.25-14.1	80.0	-	-	17.9	14.0	-	2.33	4.67
14.1-17.20	67.7	-	-	12.8	9.8	-	1.65	3.3
17.2-18.80	86.6	18.3	242	20.9	17.4	18.1	2.4	4.8
18.8-20.30	66.6	-	-	12.4	9.5	-	1.6	3.2
20.3-21.75	35.8	-	-	3.58	4.0	-	0.6	1.2
21.75-23.4	58.8	-	-	9.6	7.7	-	1.3	2.57
23.4-26.50	52.9	25.4	150	7.8	6.5	4.90	0.81	1.63
26.5-28.10	46.2	-	-	5.9	5.5	-	0.91	1.83

*: 0.0-4.10 m: sediment sample.

Table 9. Bearing capacity values obtained from various equations along the BH-2 borehole (z: 478.03 m, platform base of the plant: 475.00 m).

Çizelge 9. BH-2 sondajı boyunca farklı derinlikler için farklı eşitliklerden elde edilen taşıma gücü değerleri.

Depth (m)	RQD (%)	q_u (kg/cm ²)		The methods considering the RQD% value			q_a (MPa) Suggested Allowable Bearing Pressure	
		Depth (m)	q_u	q_{ult} (MPa) Peck et al. (1974)	q_{ult} (MPa) Bowles (1988)	q_{ult} (MPa) Bowles (2001)	$F_s = 6$	$F_s = 3$
2.25 – 4.0	27.0	-	-	2.85	2.03	-	1.1	0.55
4.0 – 4.3	50.0	5.0	204	6.00	6.99	5.10	2.0	1.00
4.3 – 7.0	41.0	6.5	190	4.73	4.70	3.20	1.1	0.55
7.0 – 10.5	45.3	-	-	5.34	5.74	-	1.8	0.90
10.5 – 12.5	63.7	11.5	218	8.80	11.35	8.84	2.4	1.20
12.5 – 14.5	63.3	-	-	8.70	11.20	-	2.9	1.45
14.5 – 16.5	77.1	-	-	12.82	16.62	-	4.3	2.15
16.5 – 18.5	50.5	-	-	6.15	7.13	-	2.0	1.00
18.5 – 20.0	89.0	18.0	300	18.6	22.15	23.7	6.0	3.00
20.0 – 22.0	74.5	-	-	11.9	15.52	-	4.0	2.00
22.0 – 23.5	72.0	-	-	11.09	14.50	-	3.7	1.85
23.5 – 25.0	74.4	25.0	230	11.87	15.48	12.7	4.0	2.00
25.0 – 27.0	68.5	-	-	10.05	13.12	-	3.3	1.65
27.0 – 30.0	71.1	26.8	188	10.80	14.14	9.50	3.2	1.60
30.0 – 31.5	84.0	-	-	15.83	19.73	-	5.3	2.65
31.5 – 34.0	81.1	-	-	14.45	18.40	-	4.8	2.40
34.0 – 36.5	59.9	35.4	206	7.93	10.04	7.40	2.3	1.15

*: Loss of core in the marked zones is greater than the percent of 17. F_s : Factor of safety

Karagöz, Koca

Table 10. Bearing capacity values obtained from the various equations along the BH-3 borehole (z: 472.04 m, platform base of the plant: 462.50 m).

Çizelge 10. BH-3 sondajı boyunca farklı derinlikler için farklı eşitliklerden elde edilen taşıma gücü değerleri.

Depth (m)	RQD (%)	q _u (kg/cm ²)		The methods considering the RQD% value			q _a (MPa) Suggested allowable bearing pressure	
		Depth (m)	q _u	q _{ult} (MPa) Peck et al. (1974)	q _{ult} (MPa) Bowles (1988)	q _{ult} (MPa) Bowles (2001)	F _s = 6	F _s = 3
0.00 - 6.0	39.25	-	-	4.51	4.29	-	1.45	0.72
6.00 - 7.0	71.00	8.00	196	10.77	14.0	9.9	2.8	1.40
7.00-9.50	75.60	-	-	12.25	15.90	-	4.0	2.00
9.50-12.50	55.70	-	-	7.09	7.33	-	2.3	1.15
12.5-15.50	85.00	-	-	16.34	20.10	-	5.4	2.70
15.50 - 17.5	17.00	-	-	3.08	1.00	-	0.7	0.35
17.5-18.50	67.00	-	-	9.63	12.50	-	3.2	1.60
18.50-21.50	88.30	-	-	18.25	21.70	-	6.0	3.00
21.50 - 24.5	63.00	22.50	182	9.0	11.07	7.2	2.0	1.00
24.50 -25.5	16.00	-	-	2.14	0.71	-	2.4	1.20

F_s: Factor of safety

Bearing capacity values and stresses induced by surcharge loads were determined for the metamorphic rocks in the site. In addition, the significant depth under the platform base is very important from the bearing capacity point of view. For this reason, the values of bearing capacity in the depth known as the bearing capacity zone, and generally changing from the ground surface level to the depth of 0.0 - 6.0 m, are of utmost importance for rock mass. If the geologic and geotechnical data obtained from the borehole BH-1 are considered, the results given as follows regarding bearing capacity analyses are reached: the platform of the plant at this point is located at a depth of 2.85 m from the ground surface level (the elevation of this depth is +458.5 m). The minimum allowable bearing pressure was determined as $q_{a \min} = 590$ kPa in the zone between +440.7 and +439.2 m elevations (Figure 4). This zone is located at 17.45 m below

the platform base of the plant. If the data from the borehole BH-2 are considered, the results related to the bearing capacity analyses given as follows are reached: the platform of the plant at this point is located at a depth of 3.08 m. below the ground surface level (the elevation of this depth is +475 m). The minimum allowable bearing capacity value was determined as $q_{a \min} = 530$ kPa in the zone between +473.3 and 470.6 m elevations. If the data from the borehole BH-3 are considered, the results of relations to the bearing capacity analyses given as follows are reached: the platform base of the plant at this point is located at the elevation of +462.5 m. The minimum allowable bearing pressure was determined as $q_{a \min} = 350$ kPa in the zone between +465.5 and +454.5 m. elevations. This zone starts 6.0 m. below the platform base, and its thickness is approximately 2.0 m.

Bearing Capacity Analysis Performed by Using the Generalized Hoek-Brown Criterion

In order to determine the ultimate bearing capacity of the rock mass, a homogeneous and jointed rock mass model was generated in Phase² v.07 finite element software (Rocscience, 2010) (Figure 16).

the self weight of the rock unit. The jointed rock mass was analysed by using the Generalized Hoek-Brown Criterion (Hoek et al., 2002). The required parameters for using Generalized Hoek-Brown Criterion and the parameters used in the numerical analysis are given in Table 11.

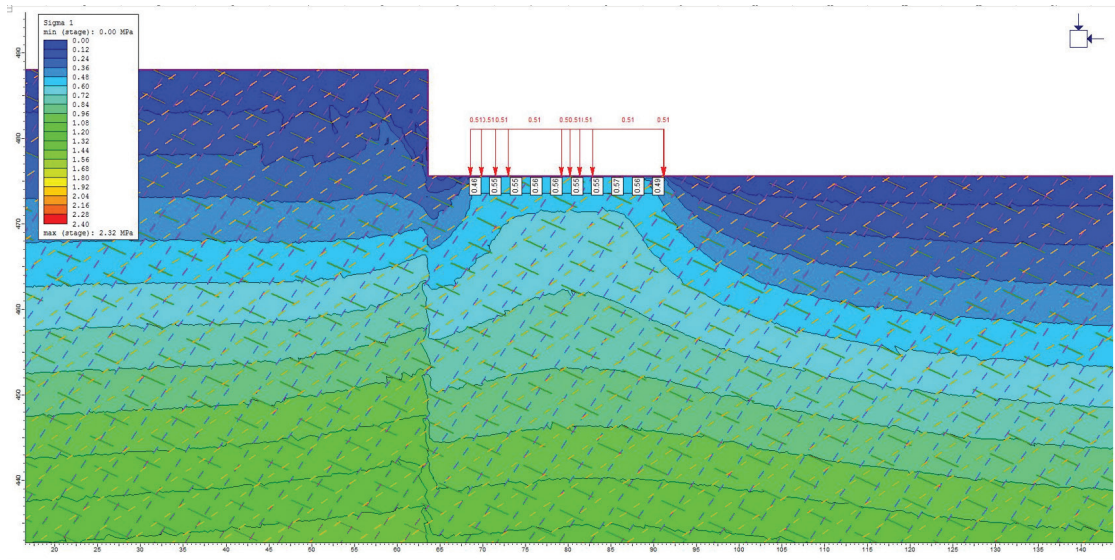


Figure 16. The distribution of vertical stress (σ_1) in the model and vertical stresses at the depth of 2 m beneath the foundation of the bunker.

Şekil 16. Kırıcı besleme noktasına ait temelin 2 m altında ve tüm kesitte düşey gerilme dağılımlarının modeli.

The main reason for performing numerical analysis on the homogeneous model is that the software detects irregular distribution of vertical stress and displacement around the lithological contacts which reduces accuracy for estimating bearing capacity of the rock mass. Thus, the weakest rock unit (tectonic zone) was selected to be used in homogeneous model with three joint sets dominant in the study area. Accordingly, the bearing capacity of the rock mass was found by the relationship between the vertical stress (σ_1) and the vertical displacement. The vertical stress is originated from the plant unit construction and

Besides, the strength criterion for the joint sets was selected as Mohr-Coulomb Criterion considering the mechanical properties given in Table 4. In order to simulate the worst conditions in terms of settlement and bearing stress; pore pressure is not considered due to its uplifting effect and thus total stress is used. The plot of vertical stress to vertical displacement was constructed for the line at 2 m depth under the foundation of bunker (Figure 17).

Table 11. The input and output parameters used in numerical analysis by means of Generalized Hoek-Brown Criterion.

Çizelge 11. Genelleştirilmiş Hoek-Brown Ölçütü yardımıyla nümerik analizlerde kullanılan yazılım girdi ve çıktıları.

Rock Type	Intact Rock Properties		D	Rock Mass Properties				
	(Dilation parameter: 0 Unit Weight: 0.024 MN/m ³)	σ_{ci} (MPa)		(Poisson's ratio: 0.23)	GSI	s	a	m_b
Tectonic Zone	m_i		0.7					
	11	10		31	4.47×10^{-6}	0.561	0.103	130

GSI: Geological strength index; m_i : Hoek-Brown constants for intact rock material; m_b , s, a: Hoek-Brown constants for rock mass; D: disturbance factor

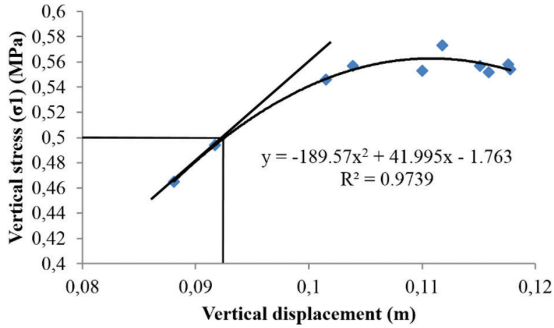


Figure 17. The plot of vertical stress to vertical displacement for the line at 2 m depth under the foundation of bunker.

Şekil 17. Kırıcı besleme noktasına ait temelin 2 m altında hat boyunca düşey gerilme-düşey yer değiştirme ilişkisi.

Figure 17 indicates that there is strong polynomial relationship between the vertical stress and vertical displacement beneath the foundation of the bunker. Fundamentally, this relationship shows a linear trend until a point which the trend becomes non-linear. Theoretically, this point can be assumed to be the ultimate bearing capacity of the rock mass. Consequently, it was

determined that the ultimate bearing capacity of the rock mass is 500 kPa where the vertical displacement is 0.092 m. The allowable bearing capacity is therefore 167 kPa ($F_s: 3$) which is significantly lower than the ones calculated from geophysical and geotechnical data. The bearing capacity of rock mass will not respond and thus, settlement at a certain level (0.092 m) will occur in the rock mass. It can also be revealed that the allowable bearing capacity values derived from the numerical analysis is more conservative than the ones from other methods.

Geophysical Survey

Determination of the extent of the weakness zones in the lateral direction into the metamorphic rock mass was performed using the speed of P-wave velocity (V_p) for the line-I (Figure 18). The existence of four weakness-zones controlled by the discontinuities with nearly vertical position in this line was determined (Figure 18). Thus, a dome-like geological structure developed in the metamorphic rock mass was confirmed by the geophysical survey.

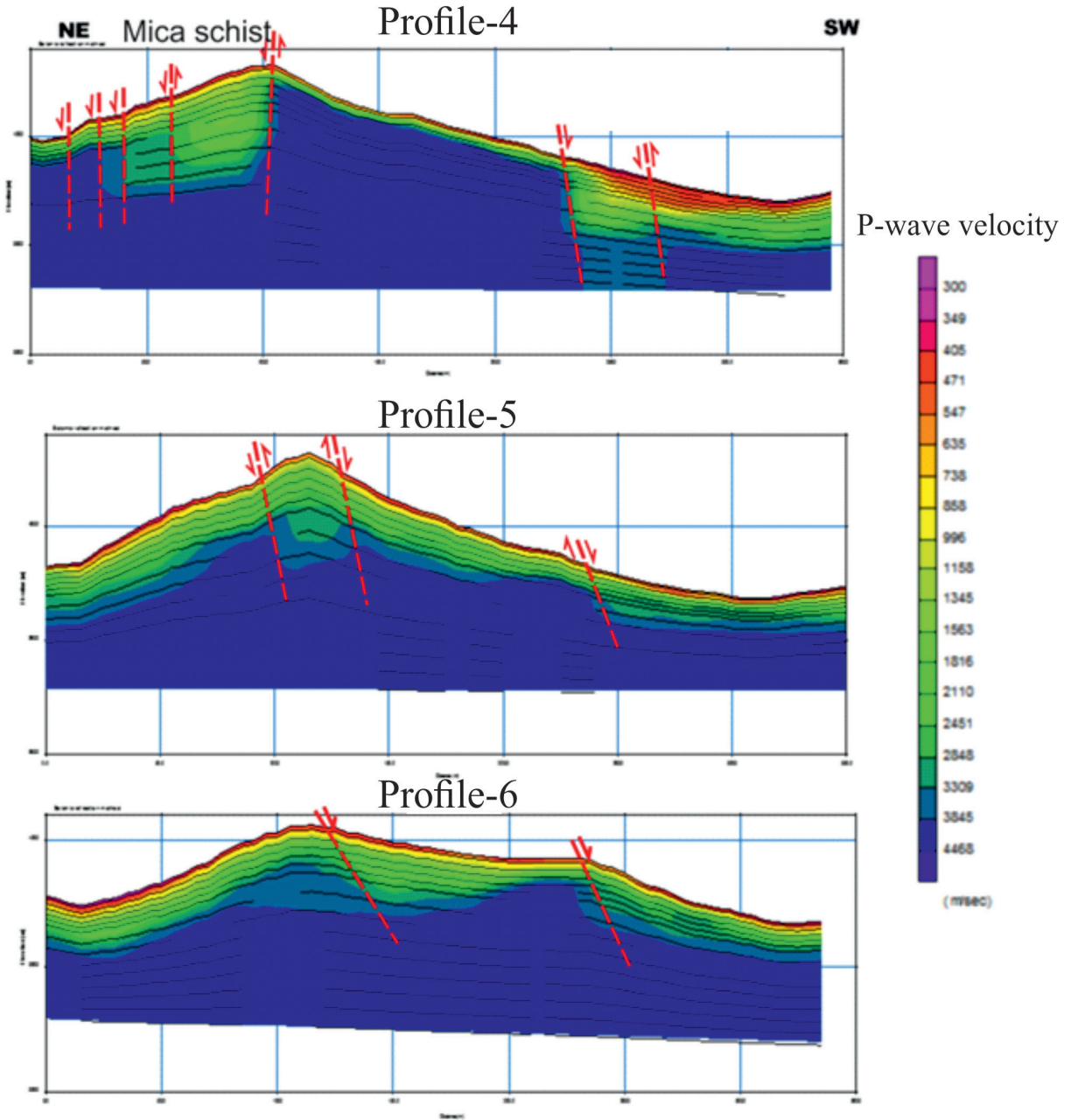


Figure 18. Determination of the weakness zones in lateral direction into the rock mass using V_p determined from the geophysical measurement line-1.

Şekil 18. Jeofizik ölçüm hattı-1 için V_p değerleri kullanılarak kayaç kütleindeki yatay yöndeki zayıflık zonlarının belirlenmesi.

This situation makes the study a little interesting. A zone where V_p is less than 900 m/sec exists in the upper elevations of the topographic profile in Figure 18. The thickness of the zone (the colour of which is red) increases towards to the stream due to the water effect and tectonic. This zone with low V_p -velocity is located in the gneiss unit. It is determined that the yellow and red coloured zones with relatively low P-wave velocities ($V_p < 800$ m/sec) and 5-7 m thicknesses are located at the western part of line-I. This zone generally exists under + 490 and +485 m elevations. The green coloured zone represents the rock mass that is stronger than the others in terms of the bearing capacity (Figure 18). The graph showing the changes of Vs-shear wave velocities with depth and the bearing capacity zones for the geophysical measurement line-I is given in Figure 19.

V_s -values in the line-I were measured at 825 and 940 m/sec. However, V_s -values decrease slightly at the eastern part of the line-I. Although a little difference in the V_s -values was obtained, two bearing pressure zones were distinguished in the line-I (Figure 19). A zone with relatively low V_s -values ($830 \leq V_s \leq 870$ m/sec) at the western part of the line-II is determined from the geophysical measurements. This zone is located between +483 m. and +495 m. elevations in the gneisses and the tectonic zone. The zone with relatively low V_p -velocities ($1020 \leq V_p \leq 1130$ m/sec) increases as it goes towards the stream, Another zone exists as a pocket between +460 m and +470 m elevations on the eastern side of line-3. Minimum V_s -values (650 m/sec) and bearing capacity values were measured in this zone (Table 12 and Figure 19). Allowable bearing pressures for zone-I and zone-II (along line-I, line-II, and line-III) are computed using the values of V_p and V_s , and their results are presented in Table 12.

Table 12. Allowable bearing capacity values (q_{all}) obtained using the P and S-wave velocities along the geophysical measurement lines (I, II, and III). For the calculation of q_{all} -values, Equation-9 was used.

Çizelge 12. Jeofizik ölçüm hatları boyunca P ve S dalga hızları kullanılarak elde edilen izin verilebilir taşıma gücü değerleri.

Section No	Geophysical parameters	Zone-I	Geophysical parameters	Zone-II
Section-I	V_{p1} (m/sec)	1540 - 1411	V_{p2} (m/sec)	1600
	V_{s1} (m/sec)	904-826	V_{s2} (m/sec)	940
	γ_{n1} (kN/m ³)	24.1	γ_{n2} (kN/m ³)	24.1
	S_v	0.956	S_v	0.949
	q_a (MPa)	5.0	q_a (MPa)	5.16
Section- II	V_{p1} (m/sec)	1651	V_{p2} (m/sec)	1899
	V_{s1} (m/sec)	965	V_{s2} (m/sec)	996
	γ_{n2} (kN/m ³)	24.5	γ_{n2} (kN/m ³)	24.7
	S_v	0.944	S_v	0.938
	q_a (MPa)	5.25	q_a (MPa)	5.54
Section-III	V_{p1} (m/sec)	1253	V_{p2} (m/sec)	1565
	V_{s1} (m/sec)	720 - 650	V_{s2} (m/sec)	910
	γ_{n3} (kN/m ³)	22.8	γ_{n3} (kN/m ³)	24.16
	S_v	0.983-0.99	S_v	0.954
	q_a (MPa)	3.87-3.52	q_a (MPa)	5.0
Average value		$\bar{X} = 4.70$ MPa		$\bar{X} = 5.23$ MPa

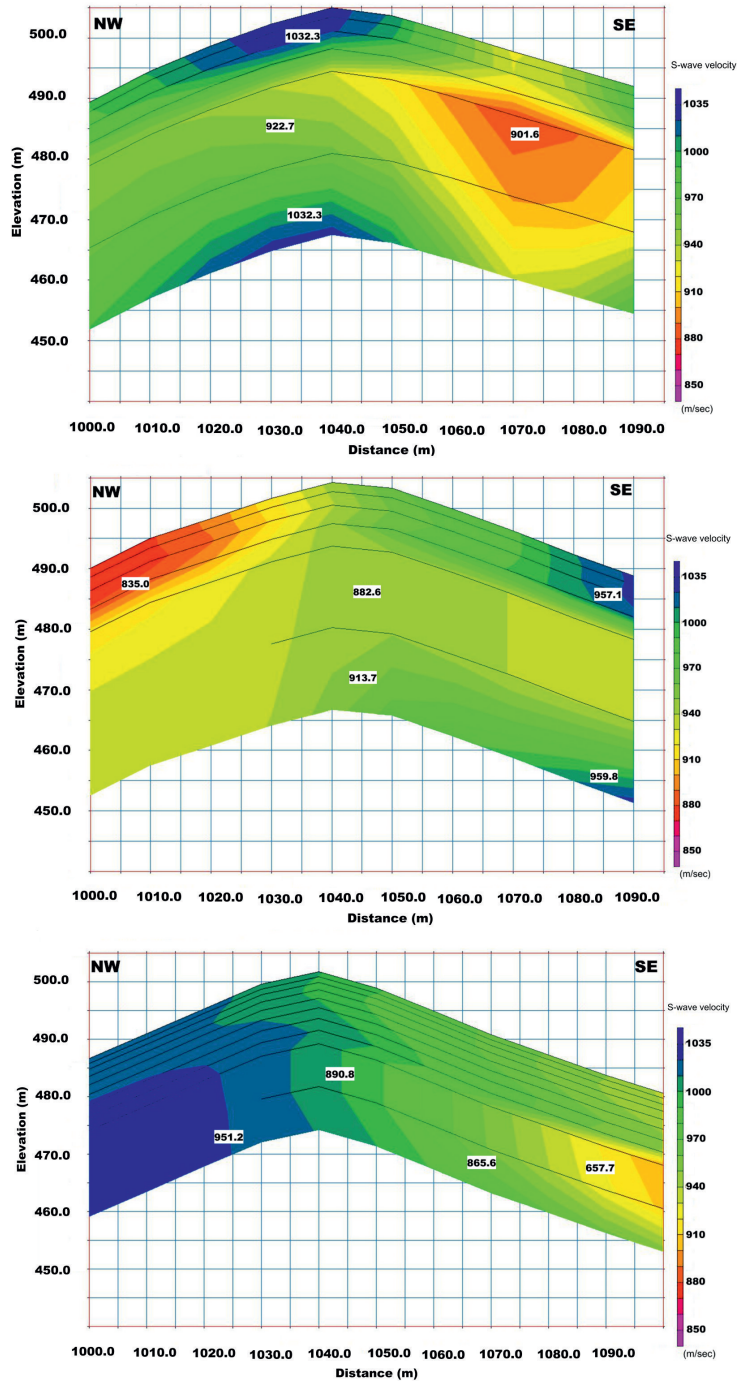


Figure 19. The graphs showing the change of V_s -values with depth and the bearing capacity zones for the geophysical measurement lines (line-I, line-II, and line-III).

Şekil 19. Jeofizik ölçüm hatları için taşıma gücü zonları ve derinlikle S-dalga hızlarının değişimini gösteren grafikler.

DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

The geotechnical site investigation was performed, considering the geotechnical data acquired during the scan-line works, geophysical survey, and three inclined boreholes. Based on this data, it was confirmed by the current study existing of the geological structure observed at the plant site is a dome-like structure. This structure has a large lenticular mass similar to a salt plug that rose towards the surface, and is laid along the NE-SW direction. In addition, the ore body is covered as a strip by the tectonic zone. This structure was also confirmed by the geophysical survey.

The acute angles between the shear zone and the axes of the drill holes BH-3, BH-2, and BH-1 were determined as 65°, 35°, and 31°, respectively using the stereographic projection techniques. The acute angles for the foliation planes were also determined as 16°, 40°, and 44°, respectively. The plunge angle of borehole BH-3 is quite close to the dip angles (26° - 42°) of the foliations. The acute angle between the strikes of the foliations and the axis of the borehole was determined as 16°. This case decreased the probability of BH-3 borehole intersect the foliation planes considerably. On the other hand, foliations are intersected along the BH-1 and BH-2 boreholes mostly. It was determined that BH-2 and BH-1 boreholes intersected the shear zone mostly and to some lesser degree the foliation planes. On the other hand, it was also determined that the boreholes did not intersect the discontinuity sets of 1, 2, and 3 due to the acute angles among them.

RQD (%), CR (%), λ (m⁻¹), s (m), and core loss (%) were determined from the geotechnical logs. Acute angles between the axes of the BH-2 and BH-1 drill holes and the foliation planes were found to be as 40° and 44°, respectively. In order

to compute the true fracture frequency (λ') for each length of core advance along the boreholes, the acute angles were used in the computations ($\lambda' = \lambda \times \cos\alpha$). On the other hand, the acute angle between the strikes of the foliation and the axis of the BH-3 borehole was determined as 16°. It was seen that this case decreased the probability of BH-3 borehole cut the foliation planes as limited. However, it was found that BH-3 borehole intersected the discontinuities belonging to the joint set 4, and the shear zone. For this reason, the acute angles between the axis of the BH-3 borehole and other discontinuity sets were not considered in the computations of λ . Number of discontinuity was directly counted for each length of core advance and that value was considered.

It was determined that the bearing capacity values obtained from the geotechnical computations (q_a -values computed in the case where the factor of safety is equal to 3) almost agree with the ones acquired from the geophysical measurements. Except the weakness zones determined in this work, no significant problem is predicted to take place at the site (Figure 20). The average value of q_a for the zone at 16.2 m depth is obtained as 400 kPa when the first 4.1 m and last 8 m are excluded in BH-1. When the weakness zone in the first 7.4 m depth is not taken into account, the q_a -value is derived as 357 kPa at 28.9 m depth. The location of BH-3 is composed of highly weathered gneiss under the influence of a stream bed. Therefore, the weakness zones in BH-3 are more frequent than those of the other boreholes. When the weakness zones between 0-6.0 m and 15.5-17.5 m are not considered, q_a is obtained as 351 kPa. On the contrary, the allowable bearing capacity values obtained from the geotechnical computations do not agree well with the one obtained from numerical modelling by using factor of safety as

3. However, if the factor of safety is used as 6 in ultimate bearing capacity obtained from the geotechnical calculations, the results would be more comparable with the numerical modelling.

≥ 900 m/sec. The value of 900 m/sec is nearly the limit value of the rocky formations. The V_s -values between 500 m/sec and 900 m/sec can be admitted as “a transition zone” between

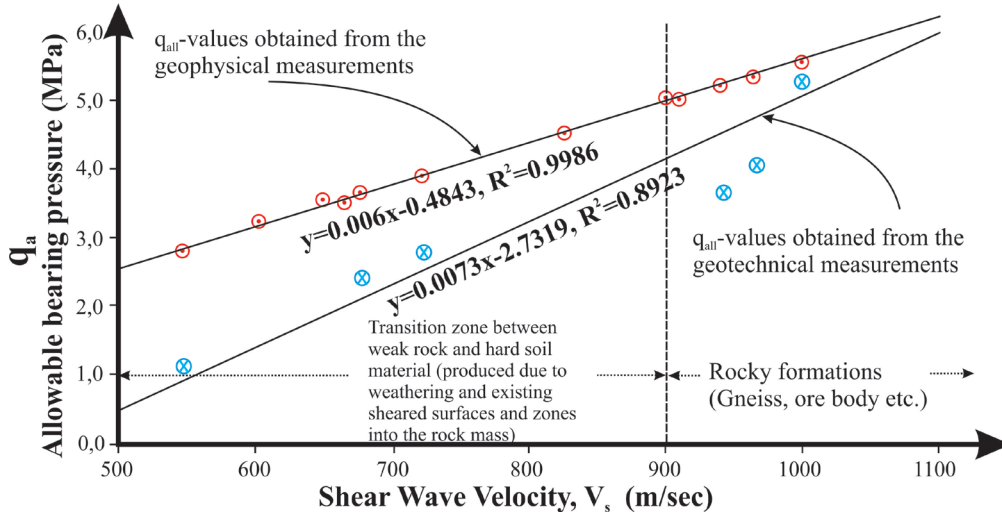


Figure 20. Relationships between the shear wave velocities (V_s) and q_a -values, and the variation of the q_a -values based on the geotechnical measurements at depths where the geophysical measurements were performed.

Şekil 20. Jeofizik ölçümlerinin yapıldığı derinliklerdeki jeoteknik ölçümler üzerine temellendirilmiş izin verilebilir taşıma gücü değerlerinin (q_a) değişimi ve q_a değerleriyle V_s - değerleri arasındaki ilişkiler.

It is determined that the bearing capacity problems may take place due to the existing tectonic zone (shear zone) with heavily-jointed structure. The contacts between the geological units including sheared surfaces with nearly vertical position may also adversely affect bearing capacity. Some of the plant units such as the bunker and concrete berm wall should not be constructed on these zones. The q_a -values obtained from the V_s -values based on the geophysical measurements and the geotechnical parameters based on the geotechnical measurements within the same depths are correlated with one another (Figure 20). It is seen from the graph that as the shear wave velocities of the rocks increase, q_a -values also increase. Two lines seen on the graph in this figure draw near to one another after V_s

weak gneissic rocks and very hard to hard soil materials produced by weathering and existing sheared surfaces, and zones into the gneissic rock mass. As a result, it was determined that the q_a -values based on the geotechnical works are more conservative than the ones from the geophysical measurements. When all results are considered, the ratio between the bearing capacity values acquired from geotechnical and geophysical measurements is close to 0.65.

The maximum contact stress underneath the foundations of the plant units is expected to be on the order of 510kPa. This stress will be transferred to the supporting rock by the foundation of the bunker. The foundation of the bunker is located on different rock units with different varying properties. These units are:

tectonic zone including sheared discontinuity surfaces into the gneiss, and ore body. The location of the bunker should be switched to the BH-1 and/or BH-2 borehole locations due to the above-mentioned reasons. Smaller contact stresses are 0.43 MPa from the concrete berm and 0.29 MPa from the mill. The above mentioned units will be placed on the flat platforms to be generated as a result of 2 to 26 m deep excavations. Therefore, near the ground, highly-weathered zones that contain wide cracks will be excavated. Considering the platform elevations, the estimated safe bearing capacity values were found to be generally satisfactory. It was noticed that bearing capacity values could be as low as 350 kPa in densely fractured zones (i.e. tectonic zone), and in the zones containing mica. Besides, the numerical analysis yielded an allowable bearing capacity of 167 kPa for the first 2 m depth below the ground surface in the tectonic zone. The above mentioned bearing capacity estimations are based on the consideration that there would be no voids and open fractures underneath the flat platforms to be generated as a result of the projected excavation work. On the other hand, it was determined that the allowable bearing capacity values derived from the numerical analysis performed by using the software is more conservative than the ones from other methods. As the vertical stress applied on the rock mass by means of bunker considered, the bearing capacity of the rock mass will not respond and thus, settlement up to 0.092 m will occur. For this reason, the material with 2 m thickness under the foundation of bunker should be excavated.

REFERENCES

- ASTM D 2113, 1990. Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration. Vol: 04.08. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 2113-2114.
- Bowles J. E., 1988. Foundation Analysis and Design. 4th Ed. McGraw-Hill Book Company, Singapore, p. 1175.
- Bowles J. E., 2001. Foundation Analysis and Design. 5th Ed. Mc Graw-Hill Inc., US, p. 1181.
- Dips 6.0, 2015. Rocscience Inc., <https://www.rocscience.com>.
- El-Naga A., 2004. A comparative review in regards to estimating bearing capacity in jointed rock masses in northeast Jordan. Bulletin of Geoenvironmental Engineering 63:233-245.
- Haneberg W.C., 2009. Improved optimization and visualization of drilling directions for rock mass discontinuity characterization, Environmental Engineering Geology Vol. XV, No. 2, May 2009, 107-113.
- Hoek, E. Carranza Torres, C. Corkum, B. 2002. Hoek & Brown criterion, 2002 Edition. North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1, 267-273.
- Hudson, J.A., Priest, S.D., 1979. Discontinuities and rock mass geometry, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts 16, 339-362.
- Hunt, R. E., 2005. Geotechnical Engineering Investigation Handbook. Second Ed., Taylor & Francis, New York, p. 1081.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, In: Ulusay R and Hudson JA (Editor), Ankara/Turkey.

- Kadakci T., 2011. Slope Stability Assessment of the Open Pit Albite Mine in the Çine-Karpuzlu (Aydın) Area. Dissertation, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University.
- Koca, M.Y., Özden G., Kıncaç C., 2014. The Geotechnical Site Investigation Report For The Site of The Crushing, Grinding and Flotation Plant in Karpuzlu-Çine (Aydın). Dokuz Eylül University Research report, June-2014, p. 91, İzmir.
- Martel, S.J., 1999. Analysis of fracture orientation data from boreholes, *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. V, No. 2, 213-233.
- Merifield, R. S., Lyamin, A. V. Sloan, S.W. 2006. Limit analysis solutions for bearing capacity of rock masses using the generalized Hoek & Brown criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43, 920-937.
- Micromine, 2014. v.15.0.4 software manual, <http://www.micromine.com>.
- Palmer D., 2001. Imaging refractors with the convolution section. *Geophysics*. 66 (5):1582–1589.
- Peck R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H., 1974. *Foundation Engineering*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Rocscience, 2010. Phase 2 version 7.0. Two dimensional finite element analysis program. Rocscience Inc.
- Priest, S.D., 1994. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London, 473 p.
- Saada, Z., Maghous, S. Garnier, D., 2008. Bearing capacity of shallow foundation on rocks obeying a modified Hoek&Brown criterion, *Computers and Geotechnics*, 35, 144-154.
- Stavropoulou, M., 2014. Discontinuity frequency and block volume distribution in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65, 62-74.
- Terzaghi R. D., 1965. Sources of error in joint surveys: *Geotechnique*, Vol. 15, pp. 287-304.
- Tezcan S.S., Keçeli A., Özdemir Z., 2006. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity, *Geotechnical and Geological Engineering* 24:203–218.
- Zhou, W., Maerz, N.H., 2002. Identifying the optimum drilling direction for characterization of discontinuous rock. *Environmental Engineering Geoscience*, Vol. 8, No. 4, 295-307.



Derleme / Review paper

Jeotermal Rezervuarlarla İlgili Sayısal Modelleme/Benzeşim Çalışmaları

Numerical Modeling/Simulation Studies of the Geothermal Reservoirs

Nurkan KARAHANOĞLU 

Üniversiteler Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı, No 1, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş (Received): 10 Aralık (December) 2018 / Düzeltme (Revised): 13 Ocak (January) 2019 / Kabul (Accepted): 14 Ocak (January) 2019

ÖZ

Jeotermal rezervuarlar içerdikleri yüksek basınç ve yüksek entalpi nedeniyle çok kıymetli yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Doğal süreçler sonucu rezervuar kayaçta depolanan jeotermal akışkan elektrik enerjisi üretiminde, konut ısıtımında, seracılıkta ve balneolojik amaçlı olarak kullanılmaktadır. Jeotermal rezervuarların üretimi doğal dengede bulunan hidrodinamik ve hidrotermal mekanizmaları harekete geçirmekte ve bunun sonucu olarak rezervuar içinde akışkan hareketi ve ısı yayılımı/taşınımı oluşmaktadır. Bu mekanizmaların matematiksel olarak tanımlanması ile başlayan sayısal modelleme çalışmaları değişik işletim koşullarının rezervuara etkisini araştırabilmekte ve dolayısı ile jeotermal sistemlerin sürdürülebilir düzeyde üretilmelerine olanak sağlamaktadır. Söz konusu mekanizmaların diferansiyel denklemlerle ifade edilmesi ve jeotermal rezervuarın kavramsal modeline dayalı olarak belirlenen fiziksel parametreler ve uygun sınır koşullarının uygulanması sayısal modelleme çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. 1970 li yıllardan beri sürdürülen modelleme çalışmaları ile dünya genelinde birçok jeotermal sistemde sayısal modelleme çalışması yapılmış ve bu rezervuarların en uygun ve sürdürülebilir üretim ve işletim politikalarının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu makalede jeotermal rezervuarların sayısal modellenmesinin temel prensipleri anlatılmakta, ilgili denklemler tanıtılmakta ve tarihsel gelişim aktarılmakta ve hazır paket programlar olarak sunulan simülörlerin/modellerin gizemleri açıklanmaktadır. Ayrıca sayısal model çalışması yapılan sahalar ve ilgili ülkeler tanıtılarak bu çalışmaların kaynakları verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal rezervuarlar, Sayısal modelleme/Benzeşim, Simülörler

ABSTRACT

Geothermal reservoirs are renewable energy resources and they are treated as very valuable due to their high pressure and high enthalpy contents. Geothermal fluid stored in the reservoir is used for electricity production, central heating, greenhouse heating and for balneological purposes. Fluid production from such reservoirs triggers hydrodynamic and hydrothermal mechanisms and causes fluid movement and heat transfer in the reservoirs. Modeling studies start with defining these mechanisms by differential equations and help investigating response of reservoirs to alternative production scenarios and hence obtain sustainable management of such systems. Fundamental studies for geothermal reservoir simulation require formulation of the mechanisms and application of boundary and initial conditions and the physical parameters obtained from conceptual model of the geothermal system. Geothermal reservoir modeling studies date back to 1970s and several geothermal reservoirs in the world have been simulated to determine optimum and sustainable production policies. This paper summarizes the basic principles of geothermal

reservoir modeling and introduces basic differential equations and explains mysteries of the reservoir simulators nowadays widely used in the geothermal industry. The numerically simulated geothermal fields and the related countries are also summarized together with the references.

Keywords: *Geothermal reservoirs, Numerical modeling/Simulation, Simulators*

GİRİŞ

Jeotermal sistemler doğal süreçler sonucu oluşan ve insanlık tarafından öncelikle kaplıca amaçlı ve daha sonraki yıllarda içerdiği yüksek basınç ve entalpi zenginliğinin farkedilmesiyle enerji üretimi amaçlı kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu sistemlerin hidromekanik ve hidrotermal özelliklerinin tanımlanması, rezervuar kapasitelerinin belirlenmesi ve en uygun koşullarla üretilerek sürdürülebilir olarak değerlendirilmeleri açısından son derece önem arz etmektedir.

Jeotermal rezervuarların üretime açılması jeolojik zaman içinde dengeye ulaşan hidrodinamik ve hidrotermal mekanizmaların harekete geçmesine ve üretim koşullarına bağlı olarak basınç ve sıcaklık düşümlerine neden olmaktadır. Bu durum gerçek kapasitesi tam olarak belirlenmemiş ve reşarj/deşarj dengesi kurulamamış rezervuarlarda jeotermal sistemin kaybedilmesine yol açabilmektedir. Jeotermal rezervuarların üretilmeleri esnasında sıcaklık ve basınç düşümleri ile belirlenen olumsuz gelişmeler bilimsel çalışmalar yapılmasını ve sistemin dengede tutulabilmesi için en uygun üretim koşullarının belirlenmesini gerekli kılmıştır. Bu amaçla yapılan araştırmalar jeotermal sistemde gelişen mekanizmaların matematiksel olarak tanımlanmasını sağlamış ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle birlikte sayısal modelleme konusunda çalışmalar yapılmasının önü açılmıştır.

1970 li yıllarda başlayan sayısal modelleme çalışmaları ile jeotermal sahaların gerçek

kapasitelerinin belirlenmesi ve en uygun üretim ve enjeksiyon koşulları ile değerlendirilmeleri ve sürdürülebilir olarak üretilmeleri sağlanmıştır. Jeotermal sahaların sayısal modellemesi konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve sayısal modellemede kullanılan programların geliştirilmeleri yanında sayısal modellerin jeotermal sahalara uygulanması yönünde çok değerli bilimsel birikimler elde edilmiştir.

Bu makalede jeotermal sistemlerin sayısal modellemesi konusunun önemi vurgulanarak bu konuda yapılan bilimsel araştırmaların ayrıntıları, tarihsel gelişimi ve dünya genelinde yapılan modelleme çalışmaları ve sayısal modellemede kullanılan programlar sunulmaktadır. Diğer taraftan jeotermal rezervuarların sayısal modellenmesi konusunun temel prensiplerinin tanıtıldığı bu araştırmada ülkemizde yapılan modelleme çalışmaları hakkında bilgiler verilmektedir.

TARİHSEL GELİŞİM

1970 li yıllarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmelerle birlikte araştırmacılar jeotermal rezervuarların sayısal modellemesi konusuna yönelmişler ve araştırmalarını jeotermal rezervuarların optimum ve sürdürülebilir işletimini sağlamak için geliştirdikleri sayısal modeller üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Bu konuda Gupta vd. (1974), Mercer vd. (1974), Faust ve Mercer (1975), Garg vd. (1975), Lasseter (1976), Bodvarsson vd. (1982), Pruess vd. (1982) yaptıkları araştırmalar öncü çalışmalar olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmalarda

kütlenin ve enerjinin korunumu prensiplerinin Darcy kanunu ile birleştirilerek jeotermal sistemlerdeki mekanizmaların matematiksel olarak ifade edildikleri görülmektedir. Bu yıllarda geliştirilen matematiksel modellerde kütle denklemleri ile enerji denklemleri birbirleri ile tam iletişimli (fully coupled) olarak oluşturulmuş ve gerek gözenekli ortamdaki akışkan (tek fazlı/iki fazlı) ve gerekse fiziksel parametreler için (değişkenlerden bağımsız/değişkenlere bağımlı) değişik varsayımlar kabul edilmiştir. Rezervuar ortamında gelişen akışkan hareketi ve enerji yayılımı mekanizmaları için model denklemlerinin basınç ve entalpi/sıcaklık değişkenleri için oluşturulması ve Sonlu Elemanlar/Sonlu Farklar kullanılarak sayısal olarak çözümleri birçok araştırmacı tarafından başarılı olarak uygulanmıştır (Brownell vd., 1977; Toronyi ve Farouq Ali, 1977; Ertekin, 1978; Thomas ve Pierson, 1978; Faust ve Mercer, 1979a; Faust ve Mercer, 1979b; Morris ve Campbell, 1981; Bodvarsson vd., 1981; Carradori vd., 1981; Nguyen ve Pinder, 1983; Zyvoloski, 1983; Karahanoğlu vd., 1984; O'sullivan, 1985; Bodvarsson vd., 1986). Örnek olarak Mercer ve Faust tarafından geliştirilen matematiksel modelin Yeni Zelanda'daki Wairakei jeotermal sistemine uygulanışı ve değişkenlerin (basınç ve entalpi) gözlenen değerleri ile modelden elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduklarından bahsedilebilir (Mercer ve Faust, 1979). Bu dönemde geliştirilen sayısal modellerin değişik ülkelerdeki jeotermal sahalara uygulandığı ve jeotermal sistemlerin sayısal modeller yardımı ile değerlendirildikleri ve geliştirildikleri izlenmektedir (Bodvarsson vd., 1987a; Bodvarsson vd., 1987b; Aunzo vd., 1989; Yasukawa ve Ishido, 1990; Pruess, 1990; O'Sullivan vd., 1990; Menzies vd., 1991; Axelsson ve Bjornsson, 1993; Sakagawa vd., 1994; Mc.Guinness vd., 1995; Arnorsson,

1995; Parini vd., 1995a, b; Boardman vd., 1996; Hanano vd., 1998). Takip eden yıllarda üretime bağlı olarak gelişen yüzey çökmesi problemi konusunda da çalışmalar yapılmış ve hazırlanan sayısal modeller başarılı olarak uygulanmıştır (Lipmann vd., 1976; Morgan vd., 1980; Lewis ve Karahanoğlu, 1981; Bear ve Çorapçıoğlu, 1981; Bodvarsson vd., 1981; Aboustit vd., 1985; Karahanoğlu vd., 1984; Lewis vd., 1989; Rutqvist vd., 2002; Hu vd., 2013; Bromley vd., 2013; Jing vd., 2014; Karrech vd., 2015).

1990 lı yıllardan itibaren jeotermal rezervuarların sayısal modellenmesi konusunda yapılan araştırmalarda, modellerin geliştirilmesi ve jeotermal sahalara uygulanması konusunda hızlı bir artış gözlenmektedir. TOUGH2 programının modelleme çalışmalarında kullanılması bu yıllarda ortaya çıkmış (Çizelge 1) ve Pruess (1990) sunduğu makalesinde jeotermal rezervuarların modellenmesi konusundaki temel prensipleri, modelleme çalışmalarının ayrıntılarını ve saha uygulamaları hakkındaki çalışmaları özetlemekte ve zaman içerisinde yapılması düşünülen araştırmaları anlatmaktadır.

İlk yıllarda tek fazlı (sıcak su tipli) ve sabit fiziksel parametrelerin kullanıldığı sayısal modellerin yıllar içerisinde geliştirildiği, iki fazlı (sıcak su ve buhar) ve faz değişimlerinin dikkate alındığı ve birçok parametrenin basınç ve sıcaklık/entalpi değişkenleri ile ifade edildiği üç boyutlu modellerin jeotermal endüstrisine sunulduğu görülmektedir (Pruess, 1990; Bodvarsson vd., 1990a; Finsterle vd., 1993; McGuinness vd., 1995; Hadgu vd., 1995; Suarez vd., 1996; Kiryukhin, 1996; Pruess, 1997; Hanano, 1998; Pruess, 1999; Pruess vd., 1999; Mannington vd., 2000; Barmin ve Kondrashov, 2000; Rutqvist vd., 2002; Bataille vd., 2006; Seol ve Lee, 2007; Driesner ve Geiger, 2007; Croucher ve O'Sullivan, 2008; O'Sullivan vd.,

2009; Kumamoto vd., 2009; Blocher vd., 2010; Emoricha vd., 2010; Cerminara ve Fasano, 2012; Jiang vd., 2013; Guerrero-Martinez ve Verma, 2013; Moridis ve Freeman, 2015).

Zaman içerisinde yapılan araştırmalarda sayısal modellerin jeotermal sahaların geliştirilmeleri ve optimum ve sürdürülebilir olarak değerlendirilmesi için kullanıldıkları izlenmektedir (Atmojo vd., 2000; Sakagawa vd., 2000; Portugal vd., 2000; Fendekova ve Fendek, 2000; Battistelli vd., 2002; Arellano vd., 2003; Mannington vd., 2004; Fabbri ve Trevisani, 2005; Zarrouk vd., 2007; Porras vd., 2007; Vedova vd., 2008;; Arias vd., 2010; Yahara ve Tokita, 2010; Kiryukhin vd., 2010; Itoi vd., 2010; Barelli vd., 2010a, Barelli vd., 2010b; Noorallahi ve Itoi, 2011; Gunnarsson vd., 2012; Zaher vd., 2012; Lei ve Zhu, 2013; Pearson vd., 2014; Canet vd., 2015; Farkhutdinov vd., 2015; Bujakowski vd., 2016; Zhang vd., 2016; Turali ve Şimşek, 2017). Bu çalışmalar arasında Stanford Üniversitesi Lawrence Berkeley Laboratuvarı ekibinin yaptığı araştırmalar ve program yönündeki çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmaların ürünü olarak Finsterle (1993) iTOUGH2 programının kullanım klavuzunu 1993 yılında sunmuş (Finsterle, 1993) ve programın ikinci versiyonu 1999 yılında Pruess tarafından tanıtılmıştır (Pruess vd., 1999). Takip eden yıllarda bu programın geliştirilmesi yönündeki araştırmaları ve jeotermal sahaların modellenmesi yönündeki çalışmaları O'Sullivan vd. (2001) hazırladıkları makalede sunmuşlar ve dünya genelinde yapılan modelleme çalışmalarını ülkeler bazında Çizelge halinde vermişlerdir. Benzer şekilde Franco ve Vaccaro (2014) örnek modelleme olarak Momotombo (Nikaragua), Ngatamariki ve Wairakei (Yeni Zelanda), Larderello ve Mt. Amiata (İtalya), Groß Schönebeck (Almanya) jeotermal sahalarında yapılan çalışmaları ayrıntılı olarak

anlatmışlar ve birçok jeotermal sahada yapılan sayısal modelleme çalışmalarının ayrıntılarını (modellenen dönem, uygulanan program, sahanın geometrisi, hazırlanan grid sistemi, koşullar ve fiziksel parametreler ve kalibrasyon çalışmaları) liste halinde sunmuşlardır.

Ayrıntılı ve çok değerli bilgiler içeren bu listelerde göze çarpan en önemli noktanın, ilk yıllarda ticari olmayan programların/simülatörlerin kullanıldığı ve tarihsel süreç içerisinde serbest kullanıma kapalı TOUGH programının etkin bir şekilde tercih edilmiş olduğu görülmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve araştırmalar eklenerek bu listeler güncelleştirilmiş ve yeni hali ile Çizelge 1 de sunulmuştur.

2003 yılında TOUGH yazılımı konulu bir sempozyum düzenlenmiş ve TOUGH programının değişik modülleri tanıtılarak diğer programlarla karşılaştırılması yapılmıştır (Pruess, 2003).

Üç yılda bir tekrarlanan sempozyumlarda TOUGH programı ile yapılan çalışmalar sunulmakta ve program ile ilgili yeni gelişmeler, değişik araştırmalar paylaşılmaktadır. Bu tür sempozyumlarda TOUGH programının uygulandığı karmaşık jeolojik ortamlarda yeraltısuyunun ve ısının hareketini araştıran çalışmalar sunulmaktadır. Bu araştırmalar yeraltısuyu hareketi, jeotermal rezervuar mühendisliği, çevresel değerlendirme çalışmaları, nükleer atık depolanması, CO₂ depolanması, petrol ve gaz üretimi, ve hidrojeolojik, biyojeokimyasal, termal, ve jeomekanik süreçlerin bulunduğu tam etkileşimli problemleri kapsamaktadır.

Finsterle vd. (2012) ve Finsterle vd. (2014) TOUGH programı ile ilgili olarak, jeotermal endüstrisinden ve kamu kurumlarından gelen istekler doğrultusunda yapılan gelişmeleri

anlatmakta ve programın çok karışık problemleri çözebilecek şekilde geliştirildiğini ve karmaşık yeraltı proseslerini modelleyecek özelliklere kavuşturulduğunu iletmektedir. Birinci makalede TOUGH programının gelişimi hakkında bilgiler verilmekte ve TOUGH+, TOUGHREACT, TOUGH2, iTOUGH2 kodlarının teknik özellikleri anlatılmaktadır. Her iki makalede yaygın olarak kullanılan TOUGH simülasyonlarının isimleri, ve proseslerini tanıtan bir Çizelge sunulmaktadır (Çizelge 2). Temel denklem sistemlerinin ve bu denklemlerin sonlu farklar yöntemi ile çözümlerinin korunduğu ana yazılımda yıllar

içerisinde iyileştirmeler yapıldığı, yeni durum denklemlerinin geliştirildiği ve programın çoklu fiziksel kapasitesinin genişletildiği ve sayısal performansını artırıcı gelişmelerin elde edildiği ve kuyu iletişimi, yüzey sularıyla ilişkiler ve atmosfer ile olan ilişkiler sağlayan modüllerin programa bağlandığı anlatılmaktadır. Çizelge 2 ilgili sempozyumda sunulan çalışmaların TOUGH programının geliştirilmesine katkı sunduğu konuları ayrıntılı olarak vermektedir. Ayrıca son gelişmeler konusu ile ilgili olarak, ‘durum denklemi’, ‘reaktif taşınım’, ‘kaya mekaniği’, ‘ters modelleme’ ve diğer konularda yapılan gelişmeler anlatılmaktadır.

Çizelge 1. Jeotermal sahaların sayısal modellenmesi konusundaki çalışmalar (O’Sullivan vd., 2001 ve Franco ve Vaccaro, 2014’den düzenlenmiş ve güncelleştirilmiştir).

Table 1. Numerical modeling studies of Geothermal fields (modified and revised from O’Sullivan et al., 2001 and Franco and Vaccaro, 2014).

Simulator Program	Year Yıl	Author or Company Yazar veya Şirket	Field Country Saha Ülke
	1979	Gupta vd., 1979	Puga Hindistan
	1979	Mercer ve Faust, 1979	Wairakei, Yeni Zelanda
SHAFT 78	1979	Pruess vd., 1979	Model rezervuar
SHAFT79	1982	Bodvarsson vd., 1982	Olkaria Kenya
	1984	Karahanoğlu vd., 1984	Kızıldere Türkiye
	1985	Ingebritsen ve Sorey, 1985	Lassen, Hollanda
HYDRO THERM	1985	Ingebritsen ve Sorey, 1985	Lassen, ABD
	1987	Bodvarsson vd., 1987a	Olkaria, Kenya
	1988	Bodvarsson, 1988	Svartgens, İzlanda
	1989	Aunzo vd., 1989	Ahuachapan, El Salvador
	1990	Yasukawa ve Ishido, 1990	Onikobe, Japonya
TOUGH2	1990	O’Sullivan vd., 1990	Kamojang, Endonezya
TOUGH2	1990	Antunez vd., 1990	Mofete, İtalya
TOUGH2	1990	O’Sullivan vd., 1990	Kamojang, Endonezya
THOR	1990	Yasukawa ve Ishido, 1990	Onikobe Caldera, Japonya
TOUGH2	1990	Bodvarsson vd., 1990a	Nesjavellir, İzlanda
TS&E	1990	Williamson, 1990	Geysers, ABD
TOUGH2	1990	Sanyal vd., 1990	Onikobe, Japonya

TOUGH2	1990	Bodvarsson vd., 1990b	Olkaria, Kenya
TOUGH2	1991	Antunez vd., 1991	Cerro Prieto, Meksika
STAR	1991	Pritchett vd., 1991	Sumikawa, Japonya
TOUGH2	1991	Menzies vd., 1991	Zunil, Guatemala
TOUGH2	1991	Ripperda vd., 1991	Ahuachapán, El Salvador
TOUGH2	1991	Aunzo vd., 1989	Ahuachapán, El Salvador
TOUGH2	1992	Battistelli vd., 1992	Nagqu Tibet, Çin
TOUGH2	1992	Burnell, 1992	Rotorua, Yeni Zelanda
TOUGH2	1993	Amistoso vd., 1993	Palinpinon, Filipinler
TOUGH	1992	Hanano, 1992	Matsukawa, Japonya
TETRAD	1993	Strobel, 1993 Bulalo,	Filipinler
TOUGH2?	1993	Axelsson ve Bjornsson, 1993	Botn, İzlanda
TOUGH2?	1995	Pham vd., 1995	Uenotai, Japonya
TOUGH2	1994	Antunez vd., 1994	Geysers, B
SING II	1994	Sakagawa vd., 1994	Mori, Japonya
SING I, SING II	1995	Nakanishi vd., 1995	Oguni, Japonya
TOUGH2	1995	Todesco, 1995	Vulcano, İtalya
TOUGH2	1995	McGuinness vd., 1995	Kakkonda, Japonya
STARS	1995	Arihara vd., 1995	Kakkonda, Japonya
STAR	1995	Bertani ve Cappetti, 1995	Monteverdi, İtalya
STAR	1995	Yano ve Ishido, 1995	Kirishima, Japonya
STAR	1995	Pritchett ve Garg, 1995	Oguni, Japonya
STAR		Ariki (Mitsubishi Metals) *	Oguni, Japonya
?	1995	Nakanishi vd., 1995	Copahue, Arjantin
?	1995	Tokita vd., 1995	Hatchobaru, Japonya
TETRAD	1995	Menzies ve Pham, 1995	Geysers, ABD
AQUA	1995	Hu, 1995	Yangbajian Tibet, Çin
TOUGH2	1996	Kiryukhin, 1996	Dachny, Rusya
TOUGH2	1996	Suarez vd., 1996	Los Azufres, Meksika
GEOSIM6	1996	Pham vd., 1996	Amatitlán, Guatemala
TOUGH2	1996	Kissling vd., 1996	Wairakei, Yeni Zelanda
TOUGH2	1996	Parini vd., 1996	Miravelles, Kosta Rika
	1996	Absar vd., 1996	Puga Hindistan
	1997	White vd., 1997	Kawerau, Yeni Zelanda
TOUGH2	1997	Battistelli vd., 1997	Skierniewice, Polonya
TOUGH2	1997	Antics, 1997	Oradea, Romanya
TETRAD	1997	Sanchez, 1997	Los Humeros, Meksika
TOUGH2	1998	O'Sullivan vd., 1998	Wairakei, Yeni Zelanda
TETRAD	1998	Bloomfield vd., 1998	Cove Fort Sulphurdale, ABD
STAR	1998	Ishido ve Tosha, 1998	Ogiri, Japonya
ROCK-FLOW-2	1998	Kolditz ve Klauser, 1998	Rosemanowes, İngiltere

TOUGH2	1998	Battistelli vd., 1998	Tendaho, Etyopya
TOUGH2	1998	Antics, 1998	Nagyzszenas, Macaristan
TOUGH2	1999	Sigurdsson *	Krafla, İzlanda
TETRAD	1999	Esberto ve Sarmiento, 1999	Mt. Apo, Filipinler
TETRAD	1999	Sta.Ana vd., 1999	Tongonan, Filipinler
ROCK-FLOW-3	1999	Kaiser *	Soultz-sous-Forets, Fransa
TOUGH2	1999	Bjornsson *	Reykjanes, İzlanda
TOUGH2	1999	Bjornsson, 1999	Svartsengi, İzlanda
GEO-CRACK 2D	1999	Swenson vd., 1999	Hijiori, Japonya
STAR	2000	Nakanishi ve Iwai, 2000	Onikobe, Japonya
TOUGH2	2000	Antics, 2000	Tomnatic, Romanya
TOUGH2	2000	Sanyal vd., 2000	Wasabizawa, Japonya
AQUA	2000	Fendek, 2000	Galanta, Slovak Cumhuriyeti
TOUGH2	2000	Atmojo, 2000	Sibayak, Endonezya
AQUA	2000	Fendekova ve Fendek, 2000	Horna Nitra, Slovak Cumhuriyeti
TETRAD	2000	Butler vd., 2000	Cerro Prieto, Meksika
FIGS3C	2000	Sakagawa vd., 2000	Kakkonda Japonya
ITOUGH2	2004	Mannington vd., 2004	Wairakei-Tauhara, Yeni Zellanda
TOUGH, ITIUGH2	2005	Porras vd., 200	5Momotombo, Nikaragua
SHEMAT	2005	Köhn ve Stöfen, 2005	Waiwera, Yeni Zellanda
ITOUGH2, TOUGH2	2006	Kiryukhin vd., 2006	Pauzhetsky, Rusya
ITOUGH2	2007	Porras vd., 2007	Momotombo, Nikaragua
SUTRA	2007	Özkaya, 2007	Kızıldere, Türkiye
ITOUGH2	2008	Kiryukhin vd., 2008	Pauzhetsky, Rusya
SHEMAT 7.1	2008	Vedova vd., 2008	Larderello, İtalya
ITOUGH2, MINC Model	2009	Kumamotoa vd., 2009	Ogiri, Japonya
FEFLOW	2009	Sonney ve Vuataz, 2009	Lavey-les-Bains, İsviçre
FEFLOW	2010	Blöcher vd., 2010	Groß Schönebeck, Almanya
FEFLOW	2010	Magri vd., 2010	Seferihisar, Türkiye
MINC Model	2010	Itoi vd., 2010Ogiri,	Japonya
TOUGH2	2010	Emoricha vd., 2010	Mindanao, Filipinler
TOUGH2	2010	Romagnoli vd., 2010	Larderello-Travale, İtalya
TOUGH2	2010	Barelli vd., 2010a	Mt. Amiata, İtalya
TOUGH2	2010	Barelli vd., 2010b	Larderello-Travale, İtalya
TOUGH2	2011	Gunnarsson vd., 2011	Hengill, İzlanda
HYDROTHERM 2.2	2011	Zaher vd., 2011	Gulf of Suez, Mısır
SHEMAT	2011	Mottagy vd., 2011	The Hague, Hollanda
HYDROTHERM 2.2	2012	Zaher vd., 2012	Hammam Faraun hot spring, Mısır

FEFLOW,GMS	2013	Sippel vd., 2013	Berlin, Almanya
FEFLOW	2013	Cherubini vd., 2013	Groß Schönebeck, Almanya
TCHEMSYS	2013	G-Martinez ve Verma, 2013	Las Tres Virgenes, Meksika
AUTOUGH2	2013	Lei ve Zhu, 2013	Guanyao, Çin
TOUGH2	2013	Zeng vd., 2013	Desert Peak, ABD
TOUGH2	2013	Bromley vd., 2013	Wairakei, Yeni Zelanda
TOUGH2	2014	Pearson vd., 2014	Tauranga, Yeni Zelanda
FRACTSIM-3D	2014	Jing vd., 2014	Hijori, Japonya
TOUGH2	2015	Llanos vd., 2015	Habanero, Avustralya
METIS	2015	Farkhutdinov vd., 2015	Khankala, Rusya
Open GeoSys (OGS)	2015	Blocher vd., 2015	Grob Schonebeck, Almanya
STIMPLAN	2015	Zang vd., 2015	EGS KD Çin
METIS	2016	Farkhutdinov vd., 2016	Khankala, Rusya
AUTOUGH2,	2016	Ratouis vd., 2016	Rotorua, Yeni Zelanda
TOUGH2	2016	Bujakowski vd., 2016	Podhale, Polonya
TOUGH2	2016	Carlino vd., 2016	Mofete İtalya
TOUGH2	2016	Zhang vd., 2016	Chingshui, Tayvan
TOUGH2	2017	Zeng vd., 2017	Yangbajing, Tibet Çin
TOUGH2	2017	Feng vd., 2017	Pisa Plain, İtalya
TOUGH2	2017	Turali ve Şimşek, 2017	Sorgun, Türkiye
TOUGH2	2018	Quiono ve Zarrouk, 2018	Ngatamariki, Yeni Zelanda
TOUGH2		CEL *	Ahuachapán, El Salvador
TOUGH2		CEL *	Berlin, El Salvador
TOUGH2		U. of Auckland (O'Sullivan) *	Darajat, Endonezya
TOUGH2		U. of Auckland (O'Sullivan) *	Dieng, Endonezya
TOUGH2		U. of Auckland (O'Sullivan) *	Lahendong, Endonezya
TOUGH2		Tokita (WestJEC) *	Hatchobaru, Japonya
TOUGH2		U. of Auckland (O'Sullivan) *	Subiyak, Endonezya
TOUGH2		ENEL *	Bagnore, İtalya
TOUGH2		ENEL *	Piancastagnaio, İtalya
TOUGH2		Tokita (WestJEC) *	Otake, Japonya
TOUGH2		Sato *	Yanaizu-Nishiyama, Japonya
TOUGH2		U. of Auckland (O'Sullivan) *	Ohaaki, Yeni Zelanda
TOUGH2		White *	Tauhara, Yeni Zelanda
TOUGH2		Tokita (WestJEC) *	Wairakei, Yeni Zelanda
TOUGH2		Tokita (WestJEC) *	Palinpinon, Filipinler
TOUGH2		Kiryukhin *	Malkinsky, Rusya
TOUGH2		Kiryukhin *	N-Kurilsky, Rusya
TOUGH2		Kiryukhin *	Oceansky, Rusya
TOUGH2		Kiryukhin vd 2010	Pauzhetsky, Rusya

TOUGH2	U. of Auckland (O'Sullivan) *	Mokai, Yeni Zelanda
TETRAD	PNOC-EDC *	Mahanagdong, Filipinler
TETRAD	CFE *	Cerro Prieto, Meksika
TETRAD	Unocal *	Geysers, ABD
TETRAD	Bloomfield *	Geysers, ABD
STAR and SING	Ariki (Mitsubishi Metals) *	Sumikawa, Japonya
PTSP	GSJ *	Nigorikawa, Japonya
GEOSIM	Liguori	San Jacinto-Tizate, Nikaragua
GEOSIM	Liguori	Momotombo, Nikaragua
GEOSIM6	Tohoku Electric Power Co (Yamanobe)	Yanaizu-Nishiyama Japonya
GEOTHERM IIE	(Barragan R.)	Cerro Prieto, Meksika
	Unocal *	Awibengkok, Filipinler
	UOA Model 4a	
	GeothermEx *	Miravalles, Kosta Rika
	GeothermEx *	Latera, Italya
	GeothermEx *	Hakkoda, Japonya
	GeothermEx *	Kokubu, Japonya
	GeothermEx *	Minami Aizu, Japonya
	GeothermEx *	Niseko, Japonya
	GeothermEx *	Otake, Japonya
	GeothermEx *	Takigama, Japonya
	GeothermEx *	Yanaizu-Nishiyama, Japonya
	GeothermEx *	MacBan, Filipinler
	GeothermEx *	Tiwi, Filipinler
	GeothermEx *	Boewawe, ABD
	GeothermEx *	Coso Hot Springs, ABD
	GeothermEx *	Desert Peak, ABD
	GeothermEx *	Dixie Valley, ABD
	GeothermEx *	East Mesa, ABD
	GeothermEx *	Heber, ABD
	GeothermEx *	Long Valley, ABD
	GeothermEx *	Puna, ABD
	GeothermEx *	Roosevelt Hot Spr., ABD
	GeothermEx *	Salton Sea, ABD
	GeothermEx *	Soda Lake, ABD
	GeothermEx *	South Brawley, ABD
	GeothermEx *	Steambot Springs, ABD
	GeothermEx *	Stillwater, ABD

Not: * işaretli kaynaklara ulaşılamamış olup bilgiler O'Sullivan vd. (2001) den alınmıştır.

Karahanoğlu

Çizelge 2. TOUGH Programı hakkında (Finsterle vd., 2012).

NAPL = susuz akışkan fazı, NCG = kondanse olmayan gaz, and VOC = uçucu organik bileşik.

Table 2. Overview of TOUGH simulators (Finsterle et al., 2012).

NAPL = non-aqueous phase liquid, NCG = noncondensable gas, and VOC = volatile organic compound.

Simulator Simülâtör	Fazlar, Bileşenler ve Prosesler Phases, Components, and Processes	Kullanım durumu Released	Kaynaklar Key references
MULKOM	Newton ve Newton özelliği olmayan, çok fazlı ve çok bileşenli akışkanlar için ve ısı değişkenli ortam için geliştirilen araştırma kodu Research code for nonisothermal multiphase, multicomponent flows of Newtonian and non-Newtonian fluids	Kullanıma kapalı No public release	Pruess (1983)
TOUGH	Sıvı ve gaz fazında ısı değişkenli su ve hava akımı Nonisothermal flow of water and air in aqueous and gaseous phase	1987	Pruess (1987)
TOUGH2	Sıvı ve gaz fazında ısı değişkenli su ve NCG (kondanse olmayan gaz) akımı Nonisothermal flow of water and NCG in aqueous and gaseous phase	1991	Pruess (1991)
iTOUGH	TOUGH için ters modelleme Inverse modeling for TOUGH	Kullanıma kapalı No public release	Finsterle (1992) Finsterle vd 2012 den alıntı
T2VOC	Sıvı, gaz ve NAPL fazında ısı değişkenli su, hava ve VOC (Uçucu organik bileşen) akımı Nonisothermal flow of water, air, and VOCs in aqueous, gaseous, and NAPL phase for environmental applications	1995	Falta vd (1995)
iTOUGH2	TOUGH2 (Pruess, 1991) için ters modelleme, hassasiyet analizi ve belirsizlik yayılımı analizi ve ayrıca EOS (durum denklemleri) modülleri Inverse modeling, sensitivity analysis, and uncertainty propagation analysis for TOUGH2 (Pruess, 1991) and additional EOS modules	1997	Finsterle (1997a,1997b,1997c) Finsterle vd 2012 den alıntı
TOUGH2 V2	Isı değişkenli çok fazlı ve çok bileşenli akım Nonisothermal multiphase, multicomponent flow	1999	Pruess vd (1999)
TMVOC	Sıvı, gaz ve NAPL fazında ısı değişkenli su, hava, çoklu VOC ve NCG akımı Nonisothermal flow of water, air, multiple VOCs, and NCGs in aqueous, gaseous, and NAPL phase	2002	Pruess ve Batistelli (2002)

TOUGHREACT	Isı değişkenli çok fazlı akım ve reaktif taşınım (denge ve kinetik mineral disolüsyonu ve presipitasyonu, kimyasal aktif gazlar, sıvı içi ve emme reaksiyonu kinetiği ve biyobozunma) Nonisothermal multiphase flow and reactive transport including equilibrium and kinetic mineral dissolution and precipitation, chemically active gases, intra-aqueous and sorption reaction kinetics, and biodegradation	2004	Xu ve Pruess (2001); Xu vd (2004)
TOUGH+	TOUGH2 simülatörünün geliştirilmiş ve genişletilmiş versiyonu, özellikle hidrat içeren jeolojik ortam simülasyonu için Re-engineered and expanded version of TOUGH2 simulator, specifically for the simulation of hydrate-bearing geologic media	2008	Moridis (2003); Moridis vd (2008)
TOUGH-FLAC	Tam etkileşimli çok fazlı akım ve jeomekanik prosesler için araştırma kodu ; bağlantılar TOUGH2 ve FLAC3D (Itasca, 1997 Finsterle vd 2012 den alıntı) Research code for coupled multiphase flow and thermal-geomechanical processes; links TOUGH2 and FLAC3D (Itasca, 1997 Finsterle vd 2012 den alıntı)	Kullanıma Kapalı No public release	Rutqvist vd (2002)
TOUGH-MP	TOUGH 2 nin paralel versiyonu Massively parallel version of TOUGH2	2008	Zhang vd (2008)
ECO2M	Sub ve süperkritik CO ₂ nin çok fazlı akımı Multiphase flow of sub- and supercritical CO ₂	2011	Pruess (2011)

Geliştirilen sayısal modellerin uygulanmasıyla dünyanın değişik bölgelerindeki jeotermal sahaların sayısal modellemesi yapılarak bu sahaların en uygun şekilde geliştirilmeleri ve optimum ve sürdürülebilir işletilmeleri sağlanmaktadır. Bu konuda yakın zamanlarda yapılan çalışmalara örnek olarak şu makaleler gösterilebilir (Jha ve Puppala, 2018; Quiano ve Zarrouk, 2018; Zeng vd., 2017; Ansari vd., 2017; Weijermars vd., 2017; Turalı ve Şimşek, 2017; Mroczec vd., 2016; Ratouis vd., 2016; Farkutdinov vd., 2016; Canet vd., 2015; Blocher vd., 2015; Zang vd., 2015; Llanos vd., 2015; Moridis ve Freeman, 2015; Finsterle vd., 2014; Lei ve Zhu, 2013; Zeng vd., 2013; Sippel vd., 2013; Cherubini vd., 2013; Gunnarsson vd.,

2012; Kuzevic vd., 2011; Suryadarma vd., 2010). Bunun yanında jeotermal sahalarındaki değişik hidrodinamik koşulların modellendiği ve sayısal modellerin geliştirilmeleri yönünde yapılan araştırmalar ve rezervuar ve akışkan fiziksel parametrelerinin sayısal modellemeye etkilerini araştıran çalışmalar da sunulmaktadır (Sonney ve Vuataz, 2009; Blocher vd., 2010; Ingebritsen vd., 2010; Kolditz vd., 2010; Pruess, 2011; Eckart vd., 2011; Yeh vd., 2012; Cerminara ve Fasano, 2012; Ganguly ve Kumar, 2012; Geiger vd., 2012; Finsterle vd., 2012; Bromley vd., 2013; Hu vd., 2013; Carotenuto vd., 2013; Ostermeyer ve Srisupattarawanit, 2013; Fusi vd., 2013; Jiang vd., 2014; Hathorn vd., 2014; Pogacnik vd., 2014; Dou vd., 2014; Jing vd., 2014; Magnusdottir ve

Finsterle, 2015; Fairs vd., 2015; Chen vd., 2015; Magliocco vd., 2015; Xu vd., 2015; Xing vd., 2015; Gelet vd., 2015; Pan vd., 2015; Pratama ve Saptadji, 2016; Abdelaziz vd., 2016; Cao vd., 2016; Ansari vd., 2017; Soboleva, 2017; Feng vd., 2017; Randi vd., 2017; Wijaya ve Purqon, 2017; Battistelli vd., 2017) .

İlk kez Brown (2000) tarafından ileri sürülen jeotermal sistemlerde akışkan olarak CO₂ kullanılması önerisi 2000 li yıllardan itibaren geçirgenliği çok düşük rezervuarlarda ve kızgın kuru kaya tipi jeotermal sistemlerde modelleme çalışmalarında uygulanmaya başlanmıştır. Pruess (2006) konu ile ilgili olarak araştırmaların başlatıldığını ve CO₂ akışkan ile modelleme çalışmalarının geliştirildiğini aktarmaktadır. Aynı çalışmada CO₂ in suya göre farklı termofiziksel parametrelere sahip olduğunu ileri sürmekte ve enerji üretilmesi konusunda CO₂ kullanımının çeşitli avantajlar sağladığını belirtmektedir. Ayrıca bunlara ek olarak CO₂ akışkan olarak kullanılmasının rezervuarlarda CO₂ depolanmasını (sequestration) sağlayacağı ileri sürülmüştür. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da araştırılmış ve CO₂ ve su kullanımının avantaj ve dezavantajları ayrıntılı şekilde tartışılmıştır. Yakın zamanda güçlendirilmiş jeotermal sahaların modellenmesi ile ilgili ayrıntılı araştırmalar yapılmıştır (Hayashi vd., 1999; Pruess, 2006; Jiang vd., 2013; Pan vd., 2015; Biagi vd., 2015; Xu vd., 2015; Magliocco vd., 2015; Xing vd., 2015; Zhao vd., 2015; Chen ve Jiang, 2016).

Türkiye’de Yapılan Modelleme Çalışmaları

Türkiye’de geçmişten itibaren kaplıca amaçlı kullanılan jeotermal sahaların enerji üretmek amaçlı kullanımı 1968 yılında MTA tarafından Kızıldere’de yapılan jeotermal sondajı ile başlamıştır. Kızıldere sahasının geliştirilmesi

amaçlı açılan kuyulardan elde edilen yaklaşık 200 °C sıcaklıktaki akışkan kullanılarak 20 MWe kapasiteli santral ile elektrik üretilmiştir. Yıllar içerisinde MTA tarafından bulunan jeotermal sahalar kamu sektörü ve özel sektör aracılığı ile geliştirilerek enerji üretimi, konut ısıtmacılığı, seracılık ve balneolojik gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalar özellikle Ege Bölgesinde yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Ülkemizde jeotermal sahaların sayısal modellemesi konusundaki ilk çalışma Karahanoğlu tarafından hazırlanan Doktora Tez çalışması ile literatüre kazandırılmıştır (Karahanoğlu 1983; Karahanoğlu vd., 1984). Bu çalışmada Kızıldere sahasının sayısal modellemesi yapılarak Kızıldere sahasının üretilmesi ile rezervuarda oluşacak basınç ve sıcaklık değişimlerinin neler olacağı yanında rezervuarda gelişebilecek yüzey çökmesi mekanizması da modellenmiştir. Geliştirilen matematiksel modelde jeotermal rezervuarlardaki hidrodinamik (akım), hidrotermal (enerji) ve mekanik (yüzey çökmesi) süreçlerini tanımlayan diferansiyel denklemler, sıcak su tipi jeotermal rezervuarlar için birbirleri ile tam etkileşimli (fully coupled) olarak oluşturulmuştur. Sonlu Elemanlar sayısal modeli kullanılarak çözülen bu denklem sistemlerinin oluşturduğu sayısal model Kızıldere sahasına uygulanmış geçmişteki üretim değerleri kullanılarak model kalibre edilmiş ve o yıllarda yapılan üretim sonucu rezervuar sıcaklığında (sıcaklık), basınç (P) değerlerinde ve yüzey çökmesinde (deplasman) üretim sonucu meydana gelebilecek değişimler tahmin edilmiştir.

Gök vd. (2005) Balçova Narlıdere’deki sıvı baskın bir jeotermal sahanın üç boyutlu sayısal modellemesini TOUGH2 simulasyon kodu kullanarak yapmıştır. Bu sayısal model jeolojik,

jeofiziksel, jeokimyasal verilerin yanısıra sondaj ve kuyu testlerinden gelen verileri de içermektedir. Doğal durum modellemesi başlangıçta kuyularda ölçülen sıcaklık ve basınç verileriyle uyum sağlanarak yapılmıştır. Doğal durum modellemesi daha sonra kuyulardaki bütün üretim ve enjeksiyon verilerini (akış oranı, basınç, sıcaklık değerlerinin zaman ile değişimi) yakalayabilmek için kalibre edilmiştir. Model kalibre edildikten sonra toplam rezervuar performansını ve ayrı ayrı kuyu performansını belirlemek üzere 20 yıllık tekrar çalıştırılmış ve bu 20 yıllık süreçte kuyudibi basıncı ve sıcaklığı cinsinden üretimin sürdürülebilir olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak iki yeni kuyu açılması halinde ve aynı enjeksiyon oranlarıyla devam edilirse sistemin bir 20 yıl daha sürdürülebilir olduğu belirlenmiştir.

Özkaya (2007) yüksek lisans tez çalışmasında SUTRA programı ile Kızıldere sahasının sayısal modelini çalışmış ve geliştirdiği sayısal modeli geçmişteki üretim değerlerini kullanarak jeotermal sahaya kalibre etmiştir. Daha sonra sahada mevcut tüm kuyuları kullanarak değişik üretim ve enjeksiyon senaryolarına karşılık zaman içerisinde olabilecek sıcaklık ve basınç değişimlerini tahmin etmiş ve farklı enjeksiyon ve üretim koşullarının etkilerini ortaya koymuştur.

Can ve Budak (2008) hazırladıkları iki boyutlu sayısal modeli Kızıldere sahasına uygulamışlar ve rezervuarı gözenekli ortam olarak değerlendirmişler ve akışkan üretimini tek bir kuyudan yapıyor şeklinde varsaymışlardır. 1984-1998 yılları arasındaki üretim değerlerini kullanarak modeli kalibre etmişler ve gözlenen değerlerle uyumlu sonuçlar aldıklarını ve sonuç olarak mevcut kuyuların 20 MWe elektrik üretmek için yeterli olmayacağını ifade etmişlerdir.

Magri vd. (2010) yaptıkları çalışmada Narlıdere-Balçova derin jeotermal sistemindeki jeotermal akışkan dinamiği ve enerji taşınımını tam etkileşimli olarak modellemeyi araştırmışlardır. Yapılan çalışmada doğal beslenme miktarlarının, jeotermal sistemdeki faylar boyunca gelişebilecek akışkan dinamiği süreçlerinin değişik jeotermal rezervuar oluşumlarına neden olabileceği ve deniz suyu girişimi riskinin mümkün olabileceği, dikey yöndeki fayların bu konuda etkili olduğu ve derinlerde gelişip yükselen sıcak suların dengesiz olduğu ve dolayısı ile sıcaklıklarda salınımlara neden olduğu ifade edilmiştir. Yapılan bu araştırma sonunda Seferihisar-Balçova derin jeotermal sistemindeki modelleme çalışmalarının kalitatif olarak rezervuarda gelişen değişik akım koşullarını modellediği belirtilmiştir.

Günay ve Karahanoğlu (2015) Edremit jeotermal sahasının sayısal modelini yapmış ve sahada yapılan değişik üretim senaryolarının rezervuara etkisini araştırmıştır. Edremit jeotermal sahasının kavramsal modeli kullanılarak zamana bağlı, iki boyutlu kesit sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve ılık ve sıcak iki farklı seviyeden oluşan jeotermal sistemin doğal durum kalibrasyonunu takiben değişik üretim ve enjeksiyon koşullarında rezervuarların davranışı araştırılmıştır.

Yoğurtcuoğlu (2016) Edremit jeotermal sahasının üç boyutlu sonlu elemanlar entegre modelini gerçekleştirmiştir. Rezervuarda hidrolik eğim değerlerinin bulunması için iki boyutlu alansal model yapılmış ve sonraki aşamada bu değerler üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile entegre edilerek sayısal model çalışması gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelin sahaya kalibre edilmesinden sonra farklı senaryolar üretilerek jeotermal sistemin sürdürülebilir üretim ve enjeksiyon koşullarının etkisi irdelenmiştir.

Turalı ve Şimşek (2017) yaptıkları araştırmada TOUGH2 simülatörü kullanarak Sorgunda bulunan jeotermal sistemi modellemiştir. Bu çalışmada uygun sınır koşulları ve fiziksel parametreler kullanılarak kavramsal model hazırlanmış ve üretim öncesi kuyularda statik sıcaklık değerleri kullanılarak doğal rezervuar koşulları modellenmiştir. Modellenen ve gözlenen sıcaklık değerleri arasında iyi bir uyum elde edildikten sonra 2007-2014 arası üretim/enjeksiyon ve entalpi üretim değerleri kullanılarak sayısal modelin tarihsel kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve gözlenen su seviyeleri ve sıcaklık değerlerinin hesaplananlarla iyi uyum sağladığı görülmüştür.

2007 yılında çıkartılan Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu ile jeotermal sahaların özel sektörler tarafından geliştirilmeleri ve işletilmeleri konusu gündeme gelmiştir. Bu durum yüksek sıcaklığa sahip jeotermal sahaların enerji amaçlı olarak üretilmelerini sağlamış ve dolayısı ile mevcut sahaların geliştirilerek enerji santrallerinin kurulmalarını gerekli kılmıştır. Halen birçok sahada (Kızıldere, Germencik gibi) enerji santralleri kurulmuştur ve jeotermal rezervuarlar işletilerek elektrik üretilmektedir. Jeotermal sahaların işletim haklarının özel sektörlere devredilmeleri neticesinde mevcut rezervuarların kapasiteleri yeni kuyular açılarak geliştirilmiş ve yüksek kapasiteli santraller kurularak elektrik enerjisi üretimi sağlanmıştır.

İşletim haklarının özel sektörlere devredilmeleri mevcut jeotermal sahaların geliştirilmeleri konusunda olumlu adımların atılmasını sağlamıştır ancak bu sahalarda yapılan sayısal modelleme çalışmaları konusundaki bilgi paylaşımı asgari düzeye indirilmiştir. Ruhsat sahibi firmaların ticari kaygı ile modelleme çalışmaları hakkındaki bilgileri kamuoyu ile paylaşmamaları durumu ortaya çıkmıştır. Bunun

sonucu olarak ülkemizdeki sayısal modelleme çalışmaları hakkında yayımlanan bilgiler kamuya açık sahalarda yapılan araştırmalarla ve Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Mineralli Sular Kanunu çıkarılmadan önceki dönemlerde yapılan çalışmalarla sınırlı kalmıştır.

Jeotermal enerji santrallerinin kurulması öncesinde yapılması gerekli olan sayısal modelleme çalışmalarının genellikle yurt dışı kaynaklı profesyonel firmalarca yapıldığı tahmin edilmektedir. Bu durum ise jeotermal enerji kapasitesi açısından dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer alan ülkemizde jeotermal sahaların sayısal modellemesi konusundaki araştırmaların yapılabilmesinin son derece kısıtlı olduğu gerçeğini ortaya koymaktadır.

TEMEL PRENSİPLER VE MODEL DENKLEMLERİ

Jeotermal rezervuarlarda akışkan hareketini ve ısı yayılımını kontrol eden hidrotermal ve hidrodinamik mekanizmalar etkilidir. Bu nedenle jeotermal rezervuarların sayısal modellenmesi için bu iki mekanizmanın rezervuar ortamında ve rezervuar sınırlarında matematiksel terimlerle ifade edilmeleri gerekmektedir.

Matematiksel Model Denklemleri

Jeotermal rezervuarlarda akışkan hareketi ve enerji taşınımı mekanizmaları matematiksel olarak kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak ifade edilmektedir. Denklemler oluşturulurken kütle ve enerjinin korunumu prensipleri ve devamlılık kuramı esas alınmaktadır. Bu çerçevede oluşturulan denklemlerin ayrıntılarına Karahanoğlu vd. (1984) çalışmasında ulaşılabilir. Model denklemlerinin son halleri aşağıda verilmektedir:

Akım Denklemi

Jeotermal rezervuarlarda akışkan hareketinin matematiksel olarak ifade edilmesi için kütle korunması ve akımın devamlılığı ilkeleri ve Darcy yasası esas alınmıştır. Bu ilkeler doğrultusunda hazırlanan diferansiyel denklem tek fazlı akışkan için aşağıda verilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} k_{ij} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\frac{P}{\gamma^f} + H \right] - \Phi \beta^f \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\Phi}{K_B^f} \frac{\partial P}{\partial t} + (1-\Phi) \beta^s \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial Q_f}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Bu denklemde P basınç değişkenini ve T ise sıcaklık değişkenini göstermektedir. Ayrıca k ortamın permeabilitesini, H belirli bir seviyeden yüksekliği, Φ gözenekliliği, γ^f akışkan birim ağırlığını, β^f ve β^s akışkan ve katı kısmın ısıl genleşme katsayılarını, Q terimi ise birim zamandaki akım miktarını ifade etmektedir. Denklem dikkatli incelendiğinde, fiziksel parametrelerin sabit oldukları bir tarafa bırakılırsa, basınç değişkeninin zamana bağlı

olduğu ve mekan koordinatları ile etkilendiği görülmektedir. Ayrıca bu denklem içinde sıcaklık değişkeninin de yer aldığı ve böylelikle tek denklem sistemi içinde iki adet bilinmeyen değişken bulunduğu izlenmektedir.

Enerji Denklemi

Gözenekli ortamda ısı hareketi Enerjinin korunumu prensibi kullanılarak aşağıdaki kısmi diferansiyel denklemle ifade edilmektedir (Karahanoğlu vd, 1984). Konvektif ve konduktif ısı taşınım terimlerini içeren bu denklem yazılırken akışkan yoğunluğunun sıcaklık ve basınç değişkenlerine bağlı olduğu varsayılmış diğer katsayılar sabit olarak alınmıştır.

$$\left[(1-\Phi) \rho_s c_s + \Phi \rho_f c_f - \Phi \rho_f c_f \beta^f T \right] \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} + \frac{\Phi \rho_f c_f}{K_B^f} T \frac{\partial P}{\partial t} + \Phi \rho_f c_f v_i^a \frac{\partial T}{\partial X_i} - \frac{\partial Q_h}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Karahanoğlu

Denklemden yer alan ρ_s , c_s ve ρ_f , c_f terimleri katı ve akışkanların yoğunluklarını ve birim ısı kapasitelerini göstermektedir ve K_{ij} ise ısı konduktivite matrisini ifade etmektedir. (1) ve (2) nolu denklemler dikkatlice incelendiğinde akım denkleminde sıcaklık değişkenine bağlı terim, enerji denkleminde ise basınç değişkenine bağlı terim yer almakta ve bu durum her iki denklemin birbirleri ile tam etkileşimli (fully coupled) olduklarını göstermektedir. Diğer taraftan akım denkleminde olduğu gibi bu denklem sisteminde de iki adet bilinmeyen değişken (P ve T) bulunmaktadır ve böylelikle iki denklem sistemi ile iki bilinmeyen değişken eşitliği elde edilmiştir.

Jeotermal rezervuarlarda akışkan ve ısı taşınımını ifade eden bu denklemlerin yanında sınır koşullarının da matematiksel olarak yazılması gerekmektedir. Bu konudan hareketle sınırdaki akışkan hareketinin devamlılığının sağlanabilmesi

$$-n_i k_{ij} \frac{\partial P}{\partial X_j} \left(\frac{P}{\gamma^f} + H \right) - \frac{\partial q_f}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ifadesi ile sağlanmakta ve $\partial q_f / \partial t$ ise sınırdaki birim alandaki akışkan boşalım hızını göstermektedir. Sabit sınır değerleri olarak $P = P^b$ ve $T = T^b$ sınırdaki bilinen basınç ve sıcaklık değerleri kullanılmaktadır. Sınırdaki konduktif ısı akımının devamlılığı

$$-n_i k_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} - \frac{\partial q_h}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

ifadesi ile gerçekleştirilmekte ve yine sınırdaki konvektif ısı akımının devamlılığı ise

$$-n_i k_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} - h^T (T - T_f) = 0 \quad (5)$$

şeklinde yazılmaktadır ve denklemden h^T terimi konvektif ısı taşınım katsayısını, T_f ise referans sınır sıcaklık değerini ve n_i sınıra dik birim vektörü göstermektedir.

Sınır koşullarının belirlenmesi ile (1) ve (2) nolu denklemlerle jeotermal rezervuarlarda tek fazlı akışkan akımı ile enerji taşınımının matematiksel olarak modellenmesi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Sayısal modellemenin yapılabilmesi için yukarıda yazılan denklem sistemlerinin sayısal olarak çözülmesi ve böylece bilinmeyen değişkenlerin zaman ve mekan boyutlarındaki dağılımlarının bulunması gerekmektedir.

Sayısal Model

Önceki kısımda yazılan (1) ve (2) nolu kısmi diferansiyel denklemlerin (3), (4) ve (5) nolu sınır koşullarıyla birlikte çözülmesi için Sonlu Elemanlar veya Sonlu Farklar yöntemi uygulanarak denklemler Lineer Cebirsel Denklem sistemlerine dönüştürülmektedir. Matris yöntemi ile ifade edildiğinde sonlu elemanlarda elemanların düğüm sayısı, sonlu farklarda ise grid noktaları sayısı kadar denklem ve bir o kadar bilinmeyenden oluşan denklemler elde edilmektedir. Bu denklemlerin uygun sınır koşulları ve rezervuarı en iyi şekilde temsil eden fiziksel parametreler kullanılarak çözülmesi ile bilinmeyen değişkenlerin (basınç, sıcaklık) rezervuar ortamında ve zaman içindeki dağılımları bulunmaktadır. Elde edilen bu çözüm değerleri gözlenen değerlerle karşılaştırılarak gerçek çözüm değerlerinin elde edilmesi sağlanmaktadır. Gözlenen değerlerle hesaplanan değerler arasındaki farklar kalibrasyon denilen yöntemler kullanılarak minimum seviyeye indirilmektedir.

$$\begin{pmatrix} & & \\ & K_{ij} & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ mxm & & \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} P_i \\ T_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_m \\ T_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1xm \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Bu denklem sisteminde K matrisi denklemdeki sabit katsayılardan oluşmakta ve sağ taraftaki R vektörü ise denklemin bilinmeyenlerini içermektedir. Denklem sisteminin bilinmeyenleri olan P ve T değişkenleri ilgili bilinmeyenler vektörü içinde bulunmaktadır. Denklem sistemi bu şekli ile bilinmeyenlerin rezervuar içindeki dağılımlarını vermektedir ve zaman içindeki değişimleri elde etmek için aşağıdaki denklem sisteminin çözülmesi gerekmektedir.

Bu denklemde Δt zaman aralığını göstermekte ve bilinmeyen değişkenlerin (P, T) yeni zaman $(t + \Delta t)$ dilimindeki değerlerini hesaplamak için bilinmeyen değişkenlerin eski zaman (t) dilimindeki değerleri kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde her bir eleman için yazılan bu denklemler eleman düğüm noktaları için birleştirilerek global denklemler elde edilmekte ve denklem sistemlerinin sayısal olarak çözülebilmeleri için sınır koşullarının

$$\begin{pmatrix} & & \\ & K_{ij} & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ mxm & & \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} P_i \\ T_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_m \\ T_m \end{Bmatrix}^{t + \Delta t} = \begin{pmatrix} & & \\ & K_{ij} & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ mxm & & \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} P_i \\ T_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_m \\ T_m \end{Bmatrix}^t + \begin{Bmatrix} R_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1xm \end{Bmatrix} \Delta t \quad (7)$$

tanımlanması yani rezervuar sınırlarındaki hidrodinamik ve hidrotermal süreçlerin matematiksel olarak ifade edilmeleri gereklidir. Dinamik sayısal model oluşturabilmek için ayrıca başlangıç koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Sınır koşulları ve başlangıç koşulları belirlenirken bilinmeyen değişkenlerin (P basınç, T sıcaklık) rezervuar sınırlarındaki hidrodinamik ve hidrotermal davranışlarının sayısal modele tanıtılmaları şarttır. Jeotermal rezervuarın başlangıç koşulları olarak rezervuarın doğal denge durumu (rezervuarın işletmeye açılmadan önceki durumu) değerlendirilmekte ve basınç ve sıcaklık değerlerinin rezervuardaki dağılımları tahmin edilmektedir. Sınır koşullarının belirlenmesi ise rezervuar sınırlarında basınç ve sıcaklık bilinmeyenleri değerlerinin veya bu değişkenlerin türevlerinin matematiksel olarak ifade edilmeleri ile gerçekleştirilmektedir.

Başlangıç ve sınır koşullarının belirlenmesi ile denklem sistemleri sayısal çözüme hazır duruma getirilmekte ve bu denklemlerin çözülmesi sonucu değişkenlerin değişik zaman dilimleri içinde jeotermal rezervuar ortamındaki dağılımları elde edilmektedir.

Genel olarak bu çerçevede gerçekleştirilen ve sayısal modellemede kullanılarak sahalara uygulanan simülasyonlar zaman içerisinde geliştirilerek jeotermal rezervuarlarda gelişen her türlü doğal süreçlerin simülasyonu yapılmaktadır. Ancak bu tür simülasyonları oluşturan kaynak programlara ulaşım mümkün değildir. Dolayısı ile simülasyonun öngördüğü standart rezervuar koşulları dışındaki süreçlerin modellenmesinde sorunlar oluşabilmektedir. Ayrıca kaynak programa ulaşım olmaması nedeniyle sayısal modelleme konusunda yer bilimcilerimizin eğitilmeleri ciddi anlamda kısıtlanmaktadır.

GENEL DEĞERLENDİRMELER VE SONUÇLAR

Jeotermal rezervuarların sayısal yöntemler kullanılarak modellenmesi ve jeotermal sistemlerin üretimi ile rezervuarlarda basınç ve sıcaklık değişimlerinin bilimsel olarak takip edilebilmesi 1970 li yıllardan beri yapılan araştırmalarla gerçekleştirilebilmektedir. 1960 lı yıllarda Jeotermal sistemlerdeki doğal mekanizmaların matematiksel olarak ifade edilmeleri şeklinde başlayan araştırmalar 1970 lerde bilgisayar teknolojisinde gözlenen hızlı gelişmelerle ivme kazanmış ve sayısal yöntemler kullanılarak rezervuarların modellenmesi ve dolayısı ile sistemlerin bilimsel olarak ve sürdürülebilir bir şekilde üretilmelerine imkan sağlanmıştır. Önceleri iki boyutlu ve tek fazlı akışkanlar için hazırlanan sayısal modeller zaman içerisinde çok fazlı (sıvı, gaz) akışkanların (sıcak su, buhar, hava, CO₂) üç boyutlu rezervuarlardaki hareketini modelleyebilecek duruma gelmiş ve akışkan hareketi ve enerji taşınımı mekanizmaları ötesinde yüzey çökmesi, kimyasal reaksiyonlar, CO₂ depolanması/gömülmesi, çeşitli jeomekanik prosesler, biyodejenerasyon ve benzer mekanizmaların değerlendirildiği simülasyonlar geliştirilmiştir. İlk yıllarda sabit fiziksel parametreler kullanılarak hazırlanan sayısal modeller zaman içerisinde basınç ve sıcaklık değişkenlerine bağlı parametrelerin kullanıldığı modellere dönüştürülmüştür.

Sayısal modelleme konusunda yapılan çalışmaların zaman içerisindeki evrimine bakıldığında ilk yıllarda ticari olmayan ve kullanıma açık kodların kullanıldığı ve model çalışmalarının bilimsel ortamlarda paylaşıldığı görülmektedir. Ancak zaman içerisinde yapılan çalışmalarda program çabalarının paylaşılması yerine bilinen programların değişik sahalara uygulandığı ve karşılaşılan sorunların tartışıldığı

toplantılar yapılarak malum programların iletilen sorunları çözüme yönünde geliştirildikleri anlaşılmaktadır.

Sayısal modelleme çalışmalarının önemli bir aşamasını jeotermal rezervuarların kavramsal modelinin hazırlanması ve sistemin fiziksel özelliklerinin bilgisayar ortamına aktarılması oluşturmaktadır. Matematiksel denklemler kullanılarak ifade edilen ısı taşınımı ve akışkan hareketi mekanizmalarının modeli yapılan sahaya uygulanabilmesi ilgili sahanın tüm özelliklerinin simülatora tanıtılması ile mümkün olmaktadır. Denklemlerde yer alan çeşitli parametrelerin arazi ortamındaki değerlerinin belirlenmesi ve bu değerlerin dağılımlarının bulunması hazırlanan sayısal modelin başarısı açısından son derece önemlidir. Diğer taraftan rezervuarın sınır ve başlangıç koşullarının yani ilgili mekanizmaların sınırlardaki davranışlarının matematiksel olarak ifade edilmesi ve rezervuarın üretime açılmadan önceki doğal durumunun (basınç ve sıcaklık dağılımlarının) gerçekçi olarak belirlenmesi model başarısını etkileyen çok önemli bir husustur.

Doğal ortamda çeşitli etmenler altında ve uzun yıllar içinde oluşan jeotermal sistemlerdeki karmaşıklığın, ve jeotermal sistemlerin yapısal unsurlarının ve tüm fiziksel özelliklerinin kavramsal modeller yardımı ile sayısal modellere aktarılması söz konusu fiziksel parametrelerin rezervuar ortamını en iyi şekilde temsil etmesi ile gerçekleşmektedir. Bu durum bahsedilen fiziksel parametrelerin, ve denklemlerde bulunan katsayıların belirlenmesinde çok titiz araştırmaların (arazi ve laboratuvar çalışmaları) yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde jeotermal sistemlerin sınır ve başlangıç koşullarının arazi koşullarını temsil edecek türde belirlenmesi yapılacak modelleme çalışmalarının başarısını en üst düzeyde

etkilemektedir. Böylelikle doğadaki jeotermal sistem/rezervuar bilgisayar ortamına aktarılarak sayısal model oluşturulmakta ve model sistem/rezervuar simülator kullanılarak değişik üretim ve enjeksiyon senaryolarının sisteme yapacağı etkiler araştırılabilmektedir.

Sayısal modelleme çalışmalarının zaman içerisinde gelişimi ve bu konuda dünya genelinde yapılanlar gözden geçirildiğinde simülasyon çalışmalarının çok başarılı olduğu ve bu bağlamda jeotermal rezervuarların daha verimli ve sürdürülebilir şekilde değerlendirildikleri anlaşılmaktadır. Hemen hemen her türlü karmaşık mekanizmaların modellenilebilir olmasının yanında çok farklı jeolojik yapıların kavramsal model şeklinde tanımlanabildiği sayısal modeller oluşturulabilmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar ülkemizin tektonik yapısının jeotermal sahaların oluşumu için çok elverişli olduğu gerçeğini ortaya koymaktadır. Ege bölgesinde mevcut yüksek entalpili jeotermal sahaların elektrik enerjisi elde etmek için üretildikleri ve bu sahaların geliştirilmeleri yönünde araştırmaların devam ettiği bilinmektedir. Jeotermal enerji açısından belli bir zenginliğe sahip ülkemizin bu kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için bu sahaların bilgisayar teknolojisi kullanılarak değerlendirilmesi gereklidir. Bu konuda elde edilen teknoloji ve bilgi birikiminden yararlanma anlamında yerbilimcilerin eğitilmesinin önemli olduğu vurgulanmalıdır.

Ülkemizde bulunan jeotermal sahaların sayısal modellemesi konusunda yapılan bilimsel araştırma ve çalışmalar çok az sayıda olup genelde bilinen programların ilgili sahalar uygulamaları şeklinde gerçekleşmektedir. Sayısal modelleme çalışmalarında saha verisi zenginliğinin önemi bilinmekle beraber son

yıllarda yapılan işletim politikaları nedeniyle veri paylaşımının çok kısıtlandığı ve bu durumun söz konusu araştırmaları olumsuz yönde etkilediği bir gerçektir.

KATKI BELİRTME

Bu makalenin hakemler tarafından değerlendirilmesi sırasında verdikleri değerli katkılar için Sayın Prof. Dr. Şakir Şimşek'e ve ismini bilmediğim Hakem'e teşekkürlerimi iletiyorum. Yaptıkları çok titiz ve ayrıntılı incelemeleri ve yapıcı eleştirileri makalenin üstün kaliteye ulaşmasını sağlamıştır. Ayrıca makalenin hazırlanması aşamasında Çizelge 1 deki emeği için Emre Günay'a teşekkür ediyorum.

KAYNAKLAR

- Abdelaziz, R., Komori, F.S., Carreno, M.N.P., 2016. Multiphase thermal-fluid flow through geothermal , International Scientific Conference - Environmental and Climate Technologies, Conect 2015, Riga, Latvia, Oct 14-15, 2015, Energy Procedia, 95, 22-28.
- Aboutit, B. L., Advani, S.H., Lee, J.K., 1985. Variational principles and finite element simulations for thermo-elastic consolidation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 9, 45-69.
- Absar, K.V., Bajpai, I.P., Sinha, A.K., Ashwini, K., 1996. Reservuar modeling of Puga geothermal system, Iadakh, Jammua and Kashmir. Geological Survey, India, 69-74.
- Amistoso, E.A., Aquino, B.G., Aunzo, Z.P., Jordan, O.T., Sta. Ana, F.X.M., Bovardsson. G.S., Daughty, C., 1993. Reservoir analysis of the Palimpinon geothermal field, Negros Oriental, Philippines, Geothermics, 22 (5/6), 555-574.
- Ansari, E., Hughes, R., White, C.D., 2017. Statistical modeling of geopressured geothermal reservoirs. Computers and Geosciences, 103, 36-50.
- Antics, M., 2000. Computer simulation of geothermal reservoirs in the Pannonian Basin, Eastern Europe. Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10 2000, 2497-2502.
- Antics, M.A., 1998. Computer modeling of an over pressured medium enthalpy geothermal reservoir located in deep sedimentary basin. Proceedings of the 23 rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 26-28 January 1998, 362-367.
- Antics, M.A., 1997. Computer simulation of Oradea geothermal reservoir Proceedings of the 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 27-29 January 1997, 491-495.
- Antunez, E.U., Menzies, A.J., Sanyal, S.K., 1991. Simulating a challenging water dominated geothermal system: the Cerro Prieto field, Baja, California, Mexico. Proceedings of 16th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 23-25 January 1991, 183-191.
- Antunez, E.U., Sanyal, S.K., Carella, R., Guidi, A., 1990. Quantitative verification of the hydrogeological model of the Mufete geothermal field, Campania, Italy. Transactions geothermal Resources Council 14, 1263-1270.
- Antunez, E.U., Bodvarsson, G.S., Walters, M.A., 1994. Numerical-Simulation Study of the Northwest Geysers Geothermal-Field, a Case-Study of the Coldwater Creek Steamfield. Geothermics, 23, 2, 127-141.
- Arellano, V., Garcia, A., Barragan, R., Izquierdo, G., Aragon, A., Nieva, D., 2003. An updated conceptual model of the Los Humeros geothermal reservoir (Mexico). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 127, 67-88.
- Arias, A., Dini, I., Cassini, M., Fiordelisi, A., Peticone, I., Dell'Aiuto, P., 2010. Geoscientific feature update of the Larderello-Travale geothermal system (Italy) for a regional numerical modeling. In: Proc World geothermal congress 2010, Bali, Indonesia.

- Arihara, N., Yoshida, H., Hanano, M., Ikeuchi, K., 1995. A simulation study on hydrothermal system of the Kakkonda geothermal field. Proceedings World Geothermal Congress'95, Florence, 18-31 May 1995, 1715-1720.
- Arnorsson, S., 1995. Geothermal systems in Iceland: structure and conceptual models-I. High temperature areas. *Geothermics*, 24, 561-602.
- Atmojo, J.P., Itoi, R., Tanaka, T., Fukuda, M., Sudarman, S., Widiyarso, A., 2000. Modeling studies of Sudayak geothermal reservoir Northern Sumatra, Indonesia. Proceedings of World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10 2000 2037-2042.
- Aunzo, Z., Steingrímsson, B., Bodvarsson, G.S., Escobar, C., Quintanilla, A., 1989. Modeling studies of the Ahuachapan geothermal field, El Salvador. Proceedings of the 14 th workshop on geothermal reservoir engineering report, Stanford University, Stanford, California, 26-28 January 1989, 287-295.
- Axelsson, G., Björnsson, G., 1993. Detailed three dimensional modeling of the Btn hydrothermal system in N-Iceland. Proceedings of the 18 th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA), 26-28 January 1993, 159-166.
- Barelli, A., Ceccarelli, A., Dini, I., Fiordelisi, A., Giorgi, N., Lovari, F., 2010a. A review of the Mt. Amiata geothermal system, Italy. In: Proc World geothermal congress 2010, Bali, Indonesia.
- Barelli, A., Cei, M., Lovari, F., Romagnoli, P., 2010b. Numerical modeling for the Larderello-Travale geothermal system, Italy. In: Proc World geothermal congress 2010, Bali, Indonesia.
- Barmin, A.A., Kondrashov, A.V., 2000. Two-front mathematical model of water injection into a steam-saturated geothermal reservoir, *Fluid Dynamics*, 35, 3, 399.
- Bataille, A., Genthon, P., Rabinowicz, M., Fritz, B., 2006. Modeling the coupling between free and forced convection in a vertical permeable slot: Implications for the heat production of an Enhanced Geothermal System. *Geothermics*, 35, 5-6, 654-683.
- Battistelli, A., Calore, C., Pruess, K., 1997. The simulator TOUGH2/EWASG for modelling geothermal reservoirs with brines and non-condensable gas, *Geothermics*, 26, 4, 437-464.
- Battistelli, A., Swenson, D., Alcott, A., 2017. Improved PetraSim-TOUGH2 capabilities for the simulation of Geothermal reservoirs, In: Proc of 42nd workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA).
- Battistelli, A., Yiheyis, A., Calore, C., Ferragina, C., Abatneh, W., 2002. Reservoir engineering assessment of Dubti geothermal field, Northern Tendaho Rift, Ethiopia, *Geothermics*, 31, 381-406.
- Battistelli, A., Yiheyis, A., Calore, C., Ferragina, C., Abathneh, W., 1998. Tendaho geothermal project (Ethiopia): Reservoir engineering studies in the Dubti area. Proceedings of the World Renewable Energy Congress V, Florence 1998, 2741-2745.
- Battistelli, A., Calore, C., Rossi, R., Wu, F., 1992. Reservoir engineering study of Nagqu geothermal field (Tibet autonomous region, PRC). Presented at the High Temperature Geothermal Resources Workshop, Lhasa, 9-16 August 1992.
- Bear, J., Çorapçıoğlu, M.Y., 1981. A mathematical-model for consolidation in a thermoelastic aquifer due to hot water injection or pumping, *water resources research*, 17, 3, 723-736.
- Bertani, R., Capetti, G., 1995. Numerical simulation of the Monteverdi zone (western border of the Larderello geothermal field). Proceedings World Geothermal Congress'95, Florence, 18-31 May 1995, 1735-1740.
- Biagi, J., Agarwal, R., Zhang, Z.M., 2015. Simulation and optimization of enhanced geothermal systems using CO₂ as a working fluid, *Energy*, 86, 627-637.
- Björnsson, G., 1999. Predicting future performance of a shallow steam zone in the Svartsengi geothermal field, Iceland. Proceedings of the 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 25-27 January 1999 116-122.

- Blocher, M.G., Zimmermann, G., Moeck, I., Brandt, W., Hasanzadegan, A., Magri, F., 2010. 3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir, *Geofluids*, 10, 406-421.
- Blocher, G., Cacace, M., Reinsch, T., Watanabe, N., 2015. Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North Germain Basin, *Computers and Geosciences*, 82, 120-129.
- Bloomfield, K.K., Moore, J.N., Sperry, T.L., 1998. Cove-Fort Sulphurdale reservoir numerical simulation. *Transactions Geothermal Resources Council*, 22, 149-152.
- Boardman, S., Ali Khan, M., Artunez, E., 1996. TOUGH²/PC Application simulation project for Heber geothermal field, California, a progress report. *Proceedings of the 21st workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford, California (USA).
- Bodvarsson, G.S., 1988. Model predictions of the Svartgengi reservoir, Iceland, *Water Resources Research*, 24 (10), 1740-1746.
- Bodvarsson, G.S., Bjornsson, J., Gunnarsson, A., Gunnlaugsson, E., Sigurdsson, O., Stefansson, V., Steingrimsdottir, B., 1990a. The Nesjavellir geothermal field, Iceland: 1. Field characteristics and development of a three-dimensional numerical model. *Journal of Geothermal Science and Technology*, 2 (3), 189-228.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Haukwa, C., Ojiambo, S.B., 1990b. Evaluation of model predictions for the Olkaria East Geothermal Field, Kenya, *Geothermics*, 19, (5), 399-414.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Lippmann, M., Bjornsson, S., 1981. Improved Energy Recovery From Geothermal Reservoirs, 56th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, USA.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Lippmann, M., Bjornsson, S., 1982. Improved energy recovery from geothermal reservoirs. *Journal of Petroleum Engineers Journal*, 1920-1928.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Stefansson, V., Bjornsson, S., Ojiambo, S.B., 1987a. East Olkaria Geothermal Field, Kenya: 1. History match with production and pressure decline data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol 92, issue B1, 521-539.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Stefansson, V., Bjornsson, S., Ojiambo, S.B., 1987b. East Olkaria Geothermal Field, Kenya: 2. Predictions of well performance and reservoir depletion *Journal of Geophysical Research*, 92 (B1), 541-554.
- Bodvarsson, G.S., Pruess, K., Lippmann, M.J., 1986. Modeling of geothermal systems, *Journal of Petroleum Technology*, 1007-1021.
- Bromley, C., Brockbank, K., Glynn-Morris, T., Rosenberg, M., Pender, M., O'Sullivan, M., Currie, S., 2013. Geothermal subsidence study at Wairakei-Tauhara, New Zealand *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166, 2, 211-223.
- Brown, D., 2000. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing CO₂ instead of water. In: *Proceedings of 25th workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford CA, USA: Jan 2000. P. 233-8.
- Brownell, D.H., Garg, S.K., Pritchett, J.W., 1977. Governing equations for geothermal reservoirs, *Water Resources Research*, 13, 929-934.
- Bujakowski, W., Tomaszewska, B., Miecznik, M., 2016. The Podhale geothermal reservoir simulation for long-term sustainable production, *Renewable Energy*, 99, 420-430.
- Burnell, J.G., 1992. Modeling mass, energy and chloride flows in the Rotorua geothermal system. *Geothermics*, 21(1/2), 261-280.
- Butler, S.J., Sanyal, S.K., Henneberger, R.C., Klein, C.W., Gutierrez, H., de Leon, J.S., 2000. Numerical modeling of the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. In: *Proc of world geothermal congress*, Kyushu, Japan.
- Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R.M., Gonzalez-Hernandez, G., Pelaez, B., Hernandez-Cruz, B., Sanchez-Cordova, M.M., 2015. Thermal history of the Acoculco geothermal system, eastern

- Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 56-62.
- Can, I., Budak, A., 2008. Finite element modeling of the Kızıldere geothermal system, Turkey, *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 30, 12, 1098-1107.
- Cao, W.J., Huang, W.B., Jiang, F.M., 2016. Numerical study on variable thermophysical properties of heat transfer fluid affecting EGS heat extraction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 1205-1217.
- Carlino, S., Toriano, A., Di Guiseppe, M.G., Tramelli, A., Troise, C., Somma, R., De Natale, G. 2016. Exploitation of geothermal energy in active volcanic areas: A numerical modeling applied to high temperature Mofete Geothermal field, at Campi Flegrei caldera (Southern Italy). *Renewable Energy*, 87, 1, 54-66.
- Carotenuto, A., Massarotti, N., Mauro, A., 2013. A new methodology for numerical simulation of geothermal down-hole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 48, 225-236.
- Carradori, G., Peano, A., Voss, C.I., 1981. The geophase model for finite element simulation of multiphase geothermal reservoirs, in R.W. Lewis and Schrefler (Ed.) *Numerical Methods in Thermal Problems*, Proc. 2nd Int Conference in Venice, Pineridge Press, Swansea, 315-325.
- Cerminara, M., Fasano, A., 2012. Modeling the dynamics of a geothermal reservoir fed by gravity driven flow through overstanding saturated rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 233-234, 37.
- Chen, F., Falta, R.W., Murdoch, L.C., 2015. Numerical Analysis of Thermal Remediation in 3D Field-Scale Fractured Geologic Media, *Groundwater*, 4, 572-587.
- Chen, J.L., Jiang, F.M., 2016. A numerical study of EGS heat extraction process based on a thermal non-equilibrium model for heat transfer in subsurface porous heat reservoir, *Heat and Mass Transfer*, 52, 2, 255-267.
- Cherubini, Y., Cacace, M., Scheck-Wenderoth, M., Moeck, I., Lewerenz, B., 2013. Controls on the deep thermal field: implications from 3-D numerical simulations for the geothermal research site Gro Schonebeck, *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, 3610-3642.
- Croucher, A.E., O'Sullivan, M.J., 2008. Application of the computer code TOUGH2 to the simulation of supercritical conditions in geothermal systems. *Geothermics*, 37, 622-634.
- Driesner, T., Geiger, S., 2007. Numerical simulation of multiphase fluid flow in hydrothermal systems, *Fluid-Fluid Interactions, Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Ed: Liebscher, A., Heinrich, C.A., 65, 187-212.
- Dou, B., Gao, H., Zhou, G., Ren, L., 2014. Numerical simulation of heat transfer from hot dry rock to water flowing through a circulation fracture, 3rd International Conference on Materials Science and Engineering (ICMSE 2014), Jiujiang, Peoples R China, Jan 24-26, 2014, *Material Science and Advanced Technologies in Manufacturing*, Book Series: Advanced Materials Research, 852, 831-834.
- Eckart, M., Kories, H., Ruterkamp, P., Kaul, V., Bems, C., 2011. Flow-and Heat-Transport- simulation with an optimized discretization of the geological structure model, *International-Mine-Water-Association Congress on Mine Water - Managing the Challenges*, Aachen, Germany, Sep 04-11, 2011, Ed: Rude, T.R., Freund, A. Wolkersdorfer, C., 167-170.
- Emoricha, E.B., Omagbon, J.B., Malate, R.C.M., 2010. Three dimensional numerical modeling of Mindanao geothermal production field, Phillipines. In: *Proc of the 35th Workshop on Geothermal reservoir engineering*, Stanford, California (USA).
- Ertekin T., 1978. Numerical simulation of the compaction-subsidence phenomena in a reservoir for two phase non-isothermal flow. PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 227p.
- Esberto, M.B., Sarmiento, Z.F., 1999. Numerical modeling of the Mt. Apo geothermal reservoir. In. *Proc. of the 24th workshop on reservoir engineering*, Stanford, California (USA).

- Fabrizi, P., Trevisani, S., 2005. Spatial distribution of temperature in the low-temperature geothermal Euganean field (NE Italy): a simulated annealing approach, *Geothermics*, 34, 5, 617-631.
- Fairs, T.H., Younger, P.L., Parkin, G., 2015. Parsimonious numerical modelling of deep geothermal reservoirs, *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Energy*, 168, 4, 218-228.
- Falta, R.W., Pruess, K., Finsterle, S., 1995. T2VOC User's Guide. Report LBLN-36400, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley CA, 165 pp.
- Farkhutdinov, A., Goblet, P., de Fouquet, C., Cherkasov, S., 2016. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters. *Geothermics*, 59, 56-66, Part: A.
- Farkhutdinov, A., Goblet, P., De Fouquet, C., Ismagilov, R., Farkhutdinov, I., Cherkasov, S., 2015. The Use of Computer Modelling to Forecast the Sustainability in the Development of Geothermal waters Resource: Khankala Deposit Example. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5, 4, 1062-1068.
- Faust, C.R., Mercer, J.W., 1975. Mathematical modeling of geothermal systems. *Proc 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 3, 1633-1642.
- Faust, C.R., Mercer, J.W., 1979a. Geothermal Reservoir Simulation.1. Mathematical-Models For Liquid-Dominated and Vapor-Dominated Hydrothermal Systems, *Water Resources Research*, 15, 1, 23-30.
- Faust, C.R., Mercer, J.W., 1979b. Geothermal Reservoir Simulation. 2. Numerical Solution Techniques For Liquid-Dominated and Vapor-Dominated Hydrothermal Systems, *Water Resources Research*, 15, 1, 31-46.
- Fendek, M., 2000. Reservoir modeling study of Galanta area. *Proceedings World Geothermal Congress Kyushu-Tohoku, Japan*, , May 28-June 10 2000, 2555-2560.
- Fendekova, M., Fendek, M., 2000. Evaluation of Horna-Nitra geothermal reservoir (central part of Slovak Republic). *Proceedings World Geothermal Congress Kyushu-Tohoku, Japan*, , May 28- June 10 2000, 2561-2565.
- Feng, G., Tianfu.G., Jiang, Z.J., Bellani, S., 2017. Geothermal assessment of the Pisa plain, Italy: Coupled thermal and hydraulic modeling, *Renewable Energy*, 111, 416-427.
- Finsterle, S., Kowalsky, MB., Pruess, K., 2012. TOUGH model use, calibration and validation, *Transactions of the ASABE* 55 (4), 1275-1290.
- Finsterle, S., Sonnenthal, E.L., Spycher, N., 2014. Advances in subsurface modeling using the TOUGH suite of simulators, *Computers & Geosciences*, 65, 2-12, SI.
- Finsterle, S., 1993. iTOUGH2 user's guide version 2.2, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- Franco, A., Vaccaro, M., 2014. Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 30, 987- 1002.
- Fusi, L., Rosso, F., Ceseri, M., Borsi, I., Speranza, A., 2013. Weak formulation for a two-phase nonlinear flow in an undeformable porous medium, *Meccanica*, 48, 1, 57-70.
- Ganguly, S., Kumar, M.S.M., 2012. Geothermal reservoirs - A brief review, *Journal of the Geological Society of India*, 79, 6, 589-602.
- Garg, S.K., Pritchett, J.W., Brownell Jr., D.H., 1975. Transport of mass and energy in porous media, *Proc 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco, 3, 1651-1656.
- Geiger, S., Schmid, K.S., Zaretsky, Y., 2012. Mathematical analysis and numerical simulation of multi-phase multi-component flow in heterogeneous porous media, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 17, 3, 147-155.
- Gelet, R.M., Loret, B., Khalili, N., 2015. The significance of local thermal non-equilibrium in simulations of enhanced geothermal recovery, *Conference: Computer Methods and Recent*

- Advances in Geomechanics, Kyoto, Japan, Sep 22-25, 2014, Ed:Oka, F., Murakami, A., Uzuoka, R., Kimoto, S., 1713-1718.
- Gök, I.M., Sarak, H., Onur, M., Serpen, U., Satman, A., 2005. Numerical modeling of the Balçova Narlıdere geothermal field, Turkey, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.
- Guerrero-Martinez, F.J., Verma, S.P., 2013. Three dimensional temperature simulation from cooling of two magma chambers in the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja, California Sur, Mexico, Energy, 52, 110-118.
- Gunnarsson, G., Arnaldsson, A., Oddsdottir, A.L., 2012. Model Simulations of the Hengill Area, Southwestern Iceland, Transport of Unsaturated Groundwater and Heat (TOUGH) Symposium, Berkeley, CA, Sep 14-16, 2009, Transport in Porous Media, 90, 1, 3-22.
- Gupta, M., Rao, G., Narain, H., 1974. Geothermal investigations in the Puga Valley hot spring region Ladakh, India, Geophysical Research Bulletin, 12, 119-136.
- Gupta, M.L., Sharma, S., Singh, S., Drolia, R., 1979, Geophysical exploration and assessment of power potential of Puga Geothermal field. Geoviews, 6, 1-4.
- Günay, E., Karahanoglu, N., 2015. Finite element simulation of the Edremit geothermal field, Proc of 40th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, p:1-10.
- Hadgu, T., Zimmerman, R.W., Bovardson, G.S., 1995. Coupled Reservoir-Wellbore Simulation of Geothermal Reservoir Behavior, Geothermics, 24, 2, 145-166.
- Hanano, M., 1998. A simple model of a two-layered high-temperature liquid-dominated geothermal as a part of a large-scale hydrothermal convection system, Transport in Porous Media, 33, 1-2, 3-27.
- Hanano, M., 1992. Simulation Study of the Matsukawa Geothermal Reservoir - Natural State and its Response to Exploitation, Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME, 114, 4, 309-314.
- Hathorn, D., Wu, Y.S., Chen, Z.Z., 2014. TOUGH2-PETSc: A Parallel Solver for TOUGH2, 2014. 15th International Conference on Parallel And Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT 2014), Hong Kong, PEOPLES R CHINA, Dec 09-11, 2014, 174-179.
- Hayashi, K., Willis-Richards, J., Hopkirk, R.J., Niibori, Y., 1999. Numerical models of HDR geothermal reservoirs - a review of current thinking and progress, Geothermics, 28, 4-5, 507-518.
- Hu, B., 1995. Reservoir simulation of the Yangbajian geothermal field in Tibet, China. Proceedings World Geothermal Congress'95, 18-31 May 1995 Florence, 1691-1695.
- Hu, L.T., Winterfeld, P.H., Fakcharoenphol, P., Wu, Y.S., 2013. A novel fully-coupled flow and geomechanics model in enhanced geothermal reservoirs, Journal of Petroleum Science and Engineering, 107, 1-11.
- Ingebritsen, S.E., Sorey, M.L., 1985. Quantitative analysis of the Lassen hydrothermal system, north-central California. Water Resources research, 21 (6), 853-868.
- Ingebritsen, S.E., Geiger, S., Hurwitz, S., Driesner, T., 2010. Numerical Simulation of Magmatic Hydrothermal Systems, Reviews of Geophysics, 48.
- Ishido, T., Tosha, T., 1998. Feasibility study of reservoir monitoring using repeat self potential measurements Transactions Geothermal Resources Council 22, 171-177.
- Itoi, R., Kumamoto, Y., Tanaka, T., Takayama, J., 2010. History matching simulation of the Ogiri geothermal field, Japan. In: Proc World geothermal congress 2010, Bali, Indonesia.
- Jha, S.K., Puppala, H., 2018. Conceptual modeling and characterization of Puga geothermal reservoir, Ladakh, India, Geothermics, 72, 326-337.
- Jiang, F.M., Luo, L., Chen, J.L., 2013. A novel three-dimensional transient model for subsurface heat exchange in enhanced geothermal systems, International Communications in Heat and Mass Transfer, 41, 57-62.

- Jiang, F.M., Chen, J.L., Huang, W.B., Luo, L., 2014. A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process, *Energy*, 72, 300-310.
- Jing, Y.N., Jing, Z.Z., Willis-Richards, J., Hashida, T., 2014. A simple 3-D thermoplastic model for assessment of the long-term performance of the Hijiori deep geothermal reservoir, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 269, 14-22.
- Karahanoğlu, N., Doyuran, V., Akkaş, N., 1984. Finite Element Simulation of Hot-Water type Geothermal Reservoirs, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23, 3-4, 357-382.
- Karahanoğlu, N., 1983. Finite Element Simulation of Hot-Water type Geothermal Reservoirs, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara Turkey.
- Karrech, A., Beltaief, O., Vincec, R., Poulet, T., Regenauer-Lieb, K., 2015. Coupling of thermal-hydraulic-mechanical processes for geothermal reservoir modelling, *Journal of Earth Science*, 26, 1, 47-52.
- Kiryukhin, A.V., 1996. Modeling studies: The Dachny geothermal reservoir, Kamchatka, Russia, *Geothermics*, 25, 1, 63-90.
- Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., Finsterle, S., 2008. Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Puzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia. *Geothermics*, 37, 540-562.
- Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., Finsterle, S., Rychkova, T.V., Obora, N.V., 2006. Modeling the Puzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia, using iTOUGH2. In: Proc TOUGH Symposium, Lawrence Berkeley National Laboratory, California (USA).
- Kiryukhin, A.V., Asaulova, N.P., Manukhin, Y.F., Rychkova, T.V., Sugrobov, V.M., 2010. Using numerical modeling for assessing the recoverable reserves of a geothermal steam field: The Puzhetka geothermal field, *Journal of Volcanology and Seismology*, 4, 52-71.
- Kissling, W.M., Brown, K.L., O'Sullivan, M.J., White, S.P., Bullivant, D.P., 1996. Modeling chloride and CO₂ chemistry in the Wairakei geothermal reservoir. *Geothermics*, 25, 285-305.
- Kolditz, O., Clauser, C., 1998. Numerical simulation of flow and heat transfer in fractured crystalline rocks: Application to the hot dry rock site in Rosemanowes (UK). *Geothermics*, 27, 1-23.
- Kolditz, O., Blöcher, M. G., Clauser, C., Diersch, H.-J. G., Kohl, T., Kühn, M., McDermott, C. I., Wang, W., Watanabe, N., Zimmermann, G. and Bruel, D., 2010. Geothermal Reservoir Simulation, in *Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization* (ed E. Huenges), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Köhn, M., Stöfen, H., 2005. A reactive flow model of the geothermal reservoir Waiwera, New Zealand, *Hydrogeology Journal*, 13, 4, 606-626.
- Kumamoto, Y., Itoi, R., Tanak, T., Hazama, Y., 2009. Modeling and numerical analysis of the two-phase geothermal reservoir at Ogiri, Kyushi, Japan. In: Proc of the 34th Workshop on Geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA).
- Kuzevic, S., Kuzevicova, Z., Hojdova, M., Pusztai, A., 2011. A Computer-Based Simulation of Geothermal Energy Utilization in Conditions of Slovak Republic, 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2011), VOL III, Albena, Bulgaria, Jun 20-25, 2011.
- Lasseter, T.J., 1976. Numerical-Simulation of Heat and Mass-Transfer in Multi-dimensional 2-Phase Geothermal Reservoirs, *Mechanical Engineering*, 98, 5, 104-104.
- Lei, H.Y., Zhu, J.L., 2013. Numerical modeling of exploitation and reinjection of the Guantao geothermal reservoir in Tanggu District, Tianjin, China, *Geothermics*, 48, 60-68.
- Lewis, R.W., Karahanoğlu, N., 1981. Simulation of Subsidence in Geothermal Reservoirs, *Numerical Methods in Thermal Problems*, 2, 326-335.
- Lewis, R.W., Roberts, P.J., Schrefler, B.A., 1989. Finite element modeling of two phase heat and fluid flow through deforming porous media, *Transport in Porous Media*, 4, 319-334.

- Lipmann, M.J., Narasimhan, T.N., Witherspoon, P.A., 1976. Numerical simulation of reservoir compaction in liquid dominated geothermal systems. Proc. 2nd Int Symposium on Land Subsidence, Anaheim, Ca., 157-166.
- Llanos, E.M., Zarrouk, S.J., Hogarth, R.A., 2015. Numerical model of the Habanero geothermal reservoir, Australia, *Geothermics*, 53, 308-319.
- Magliocco, M.J., Glaser, S.D., Kneafsey, T.J., 2015. Laboratory and Numerical Studies of Heat Extraction from Hot Porous Media by Means of Supercritical CO₂, TOUGH Symposium, Berkeley, CA, Sep 17-19, 2012, *Transport in Porous Media*, 108, 1, 85-104.
- Magnusdottir, L., Finsterle, S., 2015. An iTOUGH2 equation-of-state module for modeling supercritical conditions in geothermal reservoirs, *Geothermics*, 57, 8-17.
- Magri, F., Akar, T., Gemici, U., Pekdeger, A., 2010. Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar-Balcova area, Turkey: results from transient numerical simulations of coupled fluid flow and heat transport processes, *Geofluids*, 10, 3, 388-405.
- Mannington, W., O'Sullivan, M., Bullivant, D., 2000. An air/water model of the Wairakei-Tauhara geothermal system. In: Proc of world geothermal congress, Kyushu, Japan.
- Mannington, W., O'Sullivan, M., Bullivant, D., 2004. Computer modeling of the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 33, 4, 401-419.
- McGuinness, M.J., White, S.P., Young, R.M., Izhisaki, H., Ikeuchi, K., Yoshida, Y., 1995. A model of the Kakkonda geothermal reservoir. *Geothermics*, 24, 1-48.
- Menzies, A.J., Granados, E.E., Sanyal, S.K., Merida-I, L., Caicedo-A., A., 1991. Numerical modeling of the initial state and matching well test data from the Zunil geothermal field Guatemala. Proceedings of the 16 th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 23-25 January 1991, 193-201.
- Menzies, A.J., Pham, M., 1995. A field-wide numerical simulation model of The Geysers geothermal field, California, Proceedings World Geothermal Congress'95, Florence, 18-31 May 1995, 1697-1702.
- Mercer, J.W., Faust, C.R., 1979. Geothermal Reservoir Simulation.3. Application of Liquid-Dominated and Vapor-Dominated Hydrothermal Modeling Techniques to Wairakei, New-Zealand, *Water Resources Research*, 15, 3, 653-671.
- Mercer, J.W., Faust, C.R., and Pinder, G.F., 1974. Geothermal reservoir simulation. Conference on research for the Development of Geothermal Energy Resources, Pasadena, California, 256-267.
- Morgan, K., Lewis, R.W., White, I.R., 1980. The mechanisms of ground surface subsidence above compacting multi phase reservoirs and their analysis by the finite element method, *Applied Mathematical Modelling*, 4, 217-234.
- Moridis, G.J., 2003. Numerical studies of gas production from methane hydrates. *Society of Petroleum Engineers Journal* 32(8), 359-370.
- Moridis, G.J., Freeman, C.M., 2015. The RealGas and RealGasH2O options of the TOUGH plus code for the simulation of coupled fluid and heat flow in tight/shale gas systems. *Computers & Geosciences*, 65, 56-71, SI.
- Moridis, G.J., Kowalsky, M.B., Pruess, K., 2008. TOUGH+HYDRATE v1.0 User's Manual: A code for the Simulation of System Behaviour in Hydrate-Bearing Geologic Media. Report LBNL-149E, Lawrence Berkeley national Laboratory, CA, 279 pp.
- Morris, C.W., Campbell, D.A., 1981. Geothermal Reservoir Energy recovery – A 3-Dimensional Simulation Study of the East Mesa Field. *Journal of Petroleum Technology*, 33, 4, 735-742.
- Mottaghy, D., Pechinig, R., Vogt, C., 2011. The geothermal project Den Haag: 3D numerical models for temperature prediction and reservoir simulation. *Geothermics*, 40, 3, 199-210.
- Mroczeck, E.K., Milicich, S.D., Bixley, P.F., Supelveda, F., Bertrand, E.A., Soengkono, S., Rae, A.J.,

2016. Ohaaki geothermal system: Refinement of a conceptual reservoir model. *Geothermics*, 59, 311-324.
- Nakanishi, S., Abe, M., Todaka, N., Yamada, M., Sierra, J.L., Gingsins, M.O., Mass, L.C., Pedro, G.E., 1995. Copahue geothermal system, Argentina- study of a vapor dominated reservoir. *Proceedings World Geothermal Congress '95*, Florence, 18-31 May 1995, 1167-1172.
- Nakanishi S., Iwai, N., 2000. Reservoir simulation study of the Onikobe geothermal field, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku Japan, May 28—June 10, 2000*, 2159-2164.
- Nguyen, V.V., Pinder, G.F., 1983. Geothermal Reservoir Simulation using, Non-Equilibrium Thermodynamics. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23, 4, 613-622.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., 2011. Production capacity estimation by reservoir numerical simulation of northwest (NW) Sabalan geothermal field, Iran, *Energy*, 36, 7, 4552-4569.
- Ostermeyer, G.P., Srisupattarawanit, T., 2013. Multi-Scale Simulation of Heat and Flow in Geothermal Reservoirs, *Oil Gas-European Magazine*, 39, 1, 40-42.
- O'Sullivan, M.J., 1985. Geothermal Reservoir Simulation. *International Journal of Energy Research*, 9, 3, 319-332.
- O'Sullivan, M., Barnett, B., Razali, M., 1990. Numerical simulation of the Kamojang geothermal field, Indonesia, *Trans Geotherm Resources Counc* 1317-1324.
- O'Sullivan, M.J., Bullivant, D.P., Follows, S.E., Mannington, W.I., 1998. Modeling of the Wairakei-Tauhara geothermal system. *Proceedings of the TOUGH Workshop'98*, Berkeley, California, 4-6 May 1998, 1-6.
- O'Sullivan, M.J., Pruess, K., Lippmann, M.J., 2001. State of the art of geothermal reservoir simulation. *Geothermics*, 30, 4, 395-429.
- O'Sullivan, M.J., Yeh, A., Mannington, W.I., 2009. A history of numerical modeling of the Wairakei geothermal field. *Geothermics*, 38, 1, 155-168.
- Özkaya M., 2007. Numerical modeling of the Kızıldere Geothermal field. MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Pan, L.H., Freifeld, B., Doughty, C., Zakem, S., Sheu, M., Cutright, B., Terrall, T., 2015. Fully coupled wellbore-reservoir modeling of geothermal heat extraction using CO₂ as the working fluid, *Geothermics*, 53, 100-113.
- Parini, M., Cappetti, G., Laudiano, M., Bertani, R., Monterossa, M., 1995. Reservoir modeling study of the Ahuachapan geothermal field (El Salvador) in the frame of a generation stabilization project. *Proceedings World Geothermal Congress '95*, Florence, 18-31 May 1995, 1543-1548.
- Parini, M., Acuna, J.A., Laudiano, M., 1996. Reinjecting water return at Miravalles geothermal reservoir, Costa Rica: numerical modeling and observations. *Proceedings of the 21st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 22-24 January 1996, pp 127-134.
- Pearson, S.C.P., Alcaraz, S.A., Barber, J., 2014. Numerical simulations to assess thermal potential at Tauranga low-temperature geothermal system, New Zealand. *Hydrogeology Journal*, 22, 1, 163-174.
- Pham, M., Sanyal, S.K., Menzies, A.J., Naka, T., Takeuchi, R., Iata, S., 1995. Numerical modeling of the high temperature two-phase reservoir at Uenotai geothermal field, Akita prefecture, Japan. *Proceedings World Geothermal Congress'95*, Florence, 18-31 May 1995, 1703-1707.
- Pham, M., Menzies, A.j., Sanyal, S.K., Lima, E., Shimada, K., Juarez, J., Cuevas, A., 1996. Numerical modeling of the high temperature geothermal system of Amatitlan, Guatemala. *Transactions Geothermal Resources Council* 20, 833-838.
- Pogacnik, J., Dempsey, D., Kelkar, S., Podgorney, R., O'Sullivan, M., O'Sullivan, J., 2014. The Effect of Sequential Solution Procedures in the Numerical Modeling of Stimulation in Engineered Geothermal Systems, 11th World Congress on Computational Mechanics; 5th European Conference on Computational Mechanics; 6th

- European Conference on Computational Fluid Dynamics, Barcelona, Spain, Jul 20-25, Vols II – IV, Ed:Onate, E; Oliver, X; Huerta, A., 1307-1318.
- Porras, E.A., Tanaka, T., Fujii, H., Itoi, R., 2007. Numerical modeling of the Momotombo geothermal system, Nicaragua. *Geothermics*, 36, 4, 304-329.
- Porras, E.A., Tanaka, T., Fujii, H., Itoi, R., 2005. Numerical modeling of the Momotombo geothermal system, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey.
- Portugal, E., Birkle, P., Tello, E., Tello, M., 2000. Hydrochemical-isotopic and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Virgenes geothermal field, Baja, California Sur, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101, 223-244.
- Pratama, H.B, Saptadji, N.M., 2016. Numerical Simulation for Natural State of Two-Phase Liquid Dominated Geothermal Reservoir with Steam Cap Underlying Brine Reservoir, 5th ITB International Geothermal Workshop (IGW2016), Bandung, Indonesia, Mar 27-Apr 02, 2016, Book Series: IOP Conference Series-Earth and Environmental Science, Ed:Saepuloh, A; Suryantini; Wibowo, H; Deon, F; Sianipar, J.Y., 42, Article Number: 012006.
- Pritchett, J.W., Garg, S.K., 1995. A modelling study of the Oguni geothermal field, Kyushu, Japan, Proceedings World Geothermal Congress'95, Florence, 18-31 May 1995, pp 1703-1707.
- Pritchett, J.W., Garg, S.K., Arikawa, K., Kawano, Y., 1991. Numerical simulation of the Sumikawa geothermal field in the natural state. In: Proc of the 16 th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA).
- Pruess, K., Batistelli, A., 2002. TMVOC A numerical simulator for Three-Phase Non-Isothermal flows of Multicomponent Hydrocarbon mixtures in saturated, unsaturated heterogeneous media. Report LBLN-49375E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA, 192 pp.
- Pruess, K., 2006. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO₂ as working fluid- a novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon. *Geothermics*, 35(4), 351-367.
- Pruess, K., 1983. Development of the general purpose simulator MULKOM, Annual Report 1982, Earth Sciences Division Report LBL-15500, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 103 pp.
- Pruess, K., 1991. TOUGH2 A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow. Report LBL-29400. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 103 pp.
- Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G., 1999. TOUGH2 user's guide version 2.1. Report LBLN-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA, 204 pp.
- Pruess, K., Zerzan, J.M., Schroeder, R.C., Witherspoon, P.A., 1979. Description of the three dimensional two phase simulator SHAFT78 for use in geothermal reservoir studies, paper SPE7699 presented at the SPE Fifth symposium on reservoir simulation, Denver, Jan 31-Feb 2 1979.
- Pruess, K., Bodvarsson, G.S., Schroeder, R.C., Witherspoon, P.A., 1982. Model Studies of the Depletion of Two-Phase Geothermal Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 280-290.
- Pruess, K., 1990. Modeling of geothermal reservoirs: Fundamental processes, computer simulation and field applications. *Geothermics*, 19, 1, 3.
- Pruess, K., 1987. TOUGH Users Guide. Report LBL-20700. Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, 78 pp.
- Pruess, K., 2011. ECO2M: A TOUGH2 fluid property module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂. Including Super- and Sub critical Conditions, and Phase change between liquid and gaseous CO₂. Report LBLN-4590E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA, 83pp.
- Pruess, K., 2003. The TOUGH codes - A family of simulation tools for multiphase flow and

- transport processes in permeable media, TOUGH Symposium 2003, Lawrence Berkeley National Lab, Berkeley, Ca, May, 2003, *Vadose Zone Journal*, 3, 3, 738-746.
- Quiano, J.J.D., Zarrouk, S.J., 2018. Geothermal resource assessment using experimental design and response surface methods: The Ngatamariki geothermal field, New Zealand, *Renewable Energy*, 116, 325-334.
- Randi, A., Sterpenich, J., Thiery, D., Kervevan, C., Pironon, J., Morlot, C., 2017. Experimental And Numerical Simulation of the Injection of A CO₂ Saturated Solution in a Carbonate Reservoir: Application to the CO₂-Dissolved Concept Combining CO₂ Geological Storage and Geothermal Heat Recovery, 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Ghgt-13, Lausanne, Switzerland, Nov 14-18, 2016, Book Series: Energy Procedia, 114, Ed: Dixon, T; Laloui, L; Twinning, S. 2942-2956.
- Ratouis, T.M.P., O'Sullivan, M.J., O'Sullivan, J.P., 2016. A Numerical model of Rotorua Geothermal Field. *Geothermics*, 60, 105-125.
- Ripperda, N., Bodvarsson, G.S., Lipmann, M.J., Cuellar, G., Escobar, C., 1991. An exploitation model and performance predictions of the Ahuachapan geothermal field, El Salvador. *Geothermics*, 20, 4, 181-196.
- Romagnoli, P., Arias, A., Barelli, A., Cei, M., Casini, M., 2010. An updated numerical modeling of the Larderello-Travale geothermal system, Italy. *Geothermics*, 39, 292-313.
- Rutqvist, J., Wu, Y.-S., Tsang, J.-F., Bodvarsson, G., 2002. A modeling approach for analysis of coupled multiphase flow, heat transfer and deformation in fractured porous rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, 429-442.
- Sakagawa, Y., Aoyama, K., Ikuechi, K., Takahashi, M., Kato, O., Doi, N., Tosha, T., Ominato, T., Koide, K., 2000. Natural state simulation of the Kakkonda geothermal field, Japan., *Proceedings of World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000*, 2839-2844.
- Sakagawa, Y., Takahashi, M., Hanano, M., Ishido, T., Demboya, N., 1994. Numerical simulation of the Mori geothermal field, Japan. *Proceedings of the 19th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 18-20 January 1994*.
- Sanchez, U.P., 1997. Los Humeros geothermal field, Mexico, *Trans geothermal Resources Council*. 21, 435-439.
- Sanyal, S.K., Antunez, E.U., Abe, M., Nakanishi, S., 1990. Numerical modeling of a mature high temperature geothermal reservoir; a case history from the Onikobe field, Miyagi prefecture, Japan. *Transactions Geothermal Resources Council* 14, 1339-1345.
- Sanyal, S.K., Pham, M., Iwata, S., Suzuki, M., Inoue, T., Yamada, K., Futagoishi, M., 2000. Numerical simulation of the Wasabizawa geothermal field, Akita Prefecture, Japan, *Proceedings of World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10 2000* 2189-2194.
- Seol, Y., Lee, K.K., 2007. Application of TOUGHREACT to performance evaluations of geothermal heat pump systems. *Geosciences Journal*, 11, 1, 83-91.
- Sippel, J., Fuchs, S., Cacace, M., Braatz, A., Kastner, O., Huenges, E., Scheck-Wenderoth, M., 2013. Deep 3D thermal modelling for the city of Berlin (Germany). *Environmental Earth Sciences*, 70, 8, 3545-3566.
- Soboleva, E., 2017. Numerical Simulation of Haline Convection in Geothermal Reservoirs, *International Conference Problems of Thermal Physics and Power Engineering (Ptpe-2017)*, *Journal of Physics Conference Series*, 891, Natl Res Univ, Moscow Power Engn Inst, Moscow, RUSSIA, OCT 09-11, 2017, UNSP 012105.
- Sonney, R., Vuataz, F.D., 2009. Numerical modelling of Alpine deep flow systems: a management and prediction tool for an exploited geothermal reservoir (Lavey-les-Bains, Switzerland). *Hydrogeology Journal*, 17, 3, 601-616.
- Sta. Ana, F.X.M., Saw, V.S., Molina, P.O., Aleman, E.T., Canete, G.F., Hingoyon, C.S., Sarmiento, Z.F., 1999. Increased production load at

- Tngonan geothermal field, Philippines: Reservoir response and field management strategies. Proc of the 24 th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA), 25-27 January 1999, 11-16.
- Strobel, C.J., 1993. Buffalo field, Philippines: Reservoir modeling for prediction of limits to sustainable generation. Proc of the 18 th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California (USA), 26-28 January 1993, 5-10.
- Suarez, Arriaga, M.C., Samaniego, V. F., Rodrigez, F., 1996. Some mismathces occurred when simulating fractured reservoir as homogeneous porous media. Proceedings of the 21st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Satnford University, Stanford, California, 26-28 January 1996, 179-186.
- Suryadarma, D., T., Zuhro, A.A., Yani, A., 2010. Sustainable development of the Kamojang geothermal field. *Geothermics*, 39, 391-409.
- Swenson, D., Schroeder, R., Shinohara, N., Okabe, T., 1999. Analyses of the Hijiori long term circulation test. Proceedings of the 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 25-27 January 1999, 344-351.
- Todesco, M., 1995. Modeling of the geothermal acticity at Vulcano (Aeolian Islands, Italy). Proceedings World Geothermal Congress '95, Florence, 18-31 May 1995, 1309-1315.
- Tokita, H., Yahara, T., Kitakoga, I., 1995. Cooling effect and fluid behavior due to reinjected hot water in the Hatchobaru geothermal field, Japan. Proceedings World Geothermal Congress '95, Florence, 18-31 May 1995, 1869-1874.
- Thomas, L.K., Pierson, R.G., 1978. 3-Dimensional Geothermal Reservoir Simulation. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 18, 2, 151-161.
- Toronyi, R.M., Farouq Ali, S.M., 1977. Two-phase, two-dimensional simulation of a geothermal reservoir. *Soc. Pet. Eng. J.*, 17, 171-183.
- Turali, E.Y., Simsek, S., 2017. Conceptual and 3D simulation modeling of the Sorgun hydrothermal reservoir (Yozgat,Turkey). *Geothermics*, 66, 85-100.
- Vedova, D.B., Vecellio, C., Bellani, S., Tinivella, U, 2008. Thermal modeling of the Larderello geothermal field (Tuscany Italy). *International Journal Earth Science (Geol Rundsch)*; 97, 317-332.
- Weijermars, R., Zuo, L., Warren, I., 2017. Modeling reservoir circulation and economic performance of the Neal Hot Springs geothermal power plant (Oregon, USA): An integrated case study, *Geothermics*, 70, 155-172.
- White, S.P., Kissling, W.M., McGuinness, M.J., 1997. Models of the Kawerau geothermal reservoir. *Transactions Geothermal Resources Council*, 21, 33-40.
- Wijaya, I, Purqon, A., 2017. Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Porous Medium Using Lattice Boltzmann Method, *International Conference on Energy Sciences (Ices 2016)*, Bandung, Indonesia, Jul 25-27, 2016, Book Series: *Journal of Physics Conference Series*, Ed., Waris, A; Shin, B; Kondo, M; Buys, YF; Irwanto, D; Pramuditya, S., 877, Article Number: UNSP 012056.
- Williamson, K. H., 1990. Reservoir simulation of The Geysers geothermal field. Proceedings of the 15 th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 23-25 January 1990, 113-123.
- Xing, H.L., Liu, Y., Gao, J.F., Chen, S.J., 2015. Recent development in numerical simulation of enhanced geothermal reservoirs. *Journal of Earth Science*, 26, 1, 28-36.
- Xu, T.F., Feng, G.H., Hou, Z.Y., Tian, H.L., Shi, Y., Lei, H.W., 2015. Wellbore-reservoir coupled simulation to study thermal and fluid processes in a CO₂-based geothermal system: identifying favorable and unfavorable conditions in comparison with water. *Environmental Earth Sciences*, 73, 11, 6797-6813.

- Xu, T., Pruess, K., 2001. Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variably saturate fractured rocks: 1. Methodology. *American J. Sci.* 301(1), 16-33.
- Yahara, T., Tokita, H., 2010. Sustainability of the Hatchobaru geothermal field, Japan. *Geothermics*, 39, 382-390.
- Yano, Y., Ishido, T., 1995. Numerical modeling of the evolution of two phase zones under a fractured cap rock. *Geothermics*, 24, 4, 507-521.
- Yasukawa, K., Ishido, T., 1990. Numerical modeling of the Onikobe caldera hydrothermal system, northeastern Honshu, Japan. *Transactions Geothermal Resources Council* 14, 1347-1355.
- Yeh, H.D., Yang, S.Y., Li, K.Y., 2012. Heat extraction from aquifer geothermal systems, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36, 1, 85-99.
- Yoğurtcuoğlu, A., 2016. Integrated 3-D finite element simulation of the Edremit Geothermal Field. Yüksek Lisans tezi Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Zaher, M.A., Saibi, H., El Noubi, M., Ghamry, E., Ehara, S., 2011. A preliminary regional assessment of the Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 60, 117-132.
- Zaher, M.A., Saibi, H., Nishijima, J., Fujimitsu, Y., Mesbah, H., Ehara, S., 2012. Exploration and assessment of the geothermal resources in the Hammam Faraun hot spring, Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45, 256-267.
- Zang, Y.J., Li, Z.W., Yu, Z.W., Guo, L.L., Lin, X.P., Xu, T.F., 2015. Evaluation of developing an enhanced geothermal heating system in northeast China: Field hydraulic stimulation and heat production forecast. *Energy and Buildings*, 88, 1-14.
- Zarrouk, S., O'Sullivan, M., Croucher, A., Mannington, W., 2007. Numerical modeling of production from the Poihipi dry steam zone; Wairakei geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 36, 289-303.
- Zeng, Y., Tang, L., Wu, N.Y., Cao, Y.F., 2017. Analysis of influencing factors of production performance of enhanced geothermal system: A case study of Yangbajing geothermal field. *Energy*, 127, 218-235.
- Zeng, Y.C., Su, Z., Wu, N.Y., 2013. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through two horizontal wells at Desert Peak geothermal field. *Energy*, 56, 92-107.
- Zhang, K., Wu, Y-S., Pruess, K., 2008. User's Guide for TOUGH2-MP- A massively parallel version of the TOUGH2 code. Report LBNL-315E, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley CA, 108 pp.
- Zhang, K., Lee, B.H., Ling, L.L., Guo, T.R., Liu, C.H., Ouyang, S., 2016. Modeling studies for production potential of Chingshui geothermal reservoir. *Renewable Energy*, 94, 568-578.
- Zhao, Y.S., Feng, Z.J., Feng, Z.C., Yang, D., Liang, W.G., 2015. THM (Thermo-hydro-mechanical) coupled mathematical model of fractured media and numerical simulation of a 3D enhanced geothermal system at 573 K and buried depth 6000-7000 M. *Energy*, 82, 193-205.
- Zyvoloski, G. 1983. Finite element methods for geothermal reservoir simulation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 7: 75-86.



Review Paper / Derleme

Methods for Investigation of Natural Attenuation and Modeling of Petroleum Hydrocarbon Contamination in Coastal Aquifers

Kıyı Akiferlerinde Petrol Hidrokarbon Kirliliğinin Doğal Gideriminin Araştırılması ve Modellenmesi Yöntemleri

Zübeyde HATİPOĞLU-BAĞCI¹ , Louis H. MOTZ² 

¹Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mersin Üniversitesi, Çiftlikköy, 33343 Mersin

²Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida 32611 U.S.A.

Geliş (Received): 21 Mayıs (May) 2018, Düzeltme (Revised): 27 Ağustos (August) 2018, Kabul (Accepted): 19 Eylül (September) 2018

ABSTRACT

In this study research methods are assessed to determine the spatial distribution of petroleum hydrocarbon contamination in the coastal aquifers and to develop a groundwater flow and transport model that can be used to evaluate the level of natural attenuation that has occurred. The stages of this study include: 1) preliminary assessment and conceptual model including hydrogeologic characteristics of the site, the history of the site, and any past or current remedial activities, 2) field and laboratory investigations including soil and groundwater sampling techniques such as soil borings, multi-level monitoring well installation, aquifer tests and water quality sampling. Parameters to be measured, their measurement methods and use of these data should be explained in detail, 3) physical and geochemical characterization of the study area with the results of the field and laboratory investigations, 4) development of the groundwater model with selected software, 5) evaluation of monitored natural attenuation according to primary and secondary lines of evidence established during the investigation. The primary lines of evidence, which is a stable or shrinking plume rather than an expanding plume, will be the benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) contour maps prepared as a result of the groundwater sampling. Secondary lines of evidence, which include geochemical data that serve as indicators of naturally occurring biodegradation and estimates of natural attenuation rates, will be based on electron acceptor/reduction product concentrations measured within the BTEX plume. The results of the groundwater modeling are used to help decide whether the monitored natural attenuation process results in BTEX contaminant levels declining to acceptable levels within a specified time. If projections of contaminated levels indicate that natural attenuation is not enough for remediation, then additional remedial alternatives can be recommended for further investigation.

Keywords: BTEX, Groundwater, Monitored Natural Attenuation, Numerical Modeling, Petroleum contamination

ÖZ

Bu çalışmada, kıyı akiferlerinde petrol kirliliğinin yayılımını belirlemek ve bir akım ve taşınım modeli oluşturarak doğal giderimin derecesini belirlemek için uygulanacak araştırma yöntemleri değerlendirilmiştir. Böyle bir çalışma beş aşamadan oluşur; 1) Bölgenin hidrojeolojik karakteristiklerini içeren kavramsal modelinin oluşturulması ve mevcut ve geçmişteki iyileştirme aktivitelerinin belirlenmesi 2) Detaylı saha araştırmaları ile çok seviyeli gözlem kuyularının kurulması, zeminden karot alınması yöntemleri kullanılarak arazi ve laboratuvar analizleri için zemin

ve yeraltısuyu örnekleri alınması. Ölçülecek parametreler; ölçüm yöntemleri ve bu parametrelerin hangi amaçla kullanılacağı ayrıntılı olarak belirtilmeli, 3) Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilen sonuçlara göre fiziksel ve jeokimyasal karakterizasyon 4) Seçilen yazılım ile yeraltısuyu modelinin oluşturulması 5) Araştırma sırasında elde edilen birincil ve ikincil kanıtlara göre gözlenen doğal giderimin değerlendirilmesi. Kirlilik bulutunun duraylı veya büzülüyor olduğunu gösteren birincil kanıtlar yeraltısuyu örnekleme sonucu oluşturulan benzen, toluen, etilbenzen, ve ksilen (BTEX) kontur haritalarıdır. Doğal biyolojik parçalanmanın belirteçleri olan ve doğal giderim hızının belirlenmesinde kullanılan jeokimyasal verileri kapsayan ikincil kanıtlar ise BTEX kirlilik bulutu içindeki elektron alıcı/vericilerin derişimleridir. Yeraltısuyu modelleme sonuçları, doğal giderim sürecinin BTEX kirlitici düzeylerinin belirli bir sürede kabul edilebilir seviyelere gerileyip gerilemeyeceğinin belirlenmesi için kullanılır. Bu sonuçlar doğal giderimin yeterli olmadığını gösterirse bu durumda yeraltısuyunun iyileştirilmesi için alternatif iyileştirme yöntemleri önerilir.

Anahtar Kelimeler: BTEX, Yeraltısuyu, İzlenen Doğal Giderim, Sayısal Modelleme, Petrol Kirliliği

INTRODUCTION

Flat topography, good transportation facilities and availability of water resources make coastal regions preferred areas for settlement and industrial activities. These characteristics have contributed to a rise in population density of coastal areas increasing the negative impact on the quality and quantity of groundwater. Due to the high population density, the use of petroleum hydrocarbons has also increased and become a major contamination source for groundwater (Mirzaee et al., 2017; Raynould et al., 2016; Fiori and Zalba 2003; Teng et al., 2013; Van Stempvoort and Biggar 2008; Yu et al., 2003; Maric et al., 2015; Chiu et al., 2013; Banerjee et al., 2016). Hydrocarbons are toxic and hence cause to serious health and environmental problems (Chiu et al., 2013; Zheng, et al., 2016; Chiu et al., 2017). Monoaromatic hydrocarbons benzene, toluene, ethylbenzene and the three isomers of xylene which are abbreviated as BTEX have greatest interest from the environmental viewpoint, because of their mobility and toxicity (Coresuil et al., 2011; Fernandes et al., 2014). BTEX are commonly found together in crude petroleum and petroleum products such as gasoline (Chen et al., 2008).

Human activities centered on oil production, transportation, and storage result in oil spillage into freshwater sources in the world. (Zheng et al., 2016; Raynould et al., 2016; Mukhopadhyay et al., 2017; Indumathi et al., 2017; Zhang et al., 2017; Ruggieri et al., 2017). With a widespread increase in contamination of water systems, effective contamination control and remediation is becoming a major technical problem (Mirzaee et al., 2017). Some technologies for control of environmental pollution have been described by various authors and have been converted into products that are being marketed for control of pollution. These technologies vary considerably in their cost and efficiencies and include the pump and treat method (considered to be cost-effective), in-situ soil vapor extraction, thermal enhancement systems, air stripping (Caetano et al., 2017), reactive barrier technology (McMurty and Elton, 1985; Guerin et al., 2002) and natural attenuation (Wiedemeier et al., 1996; U.S. EPA, 1999; Khan et al., 2004).

The remediation and control of pollution using natural attenuation process involves employing various mechanisms that may be biological, chemical or physical and include sorption, biodegradation, chemical decay,

dilution, dispersion, volatilization, contaminant destruction, and biological stabilization (Wiedemeier et al., 1996; U.S. EPA, 1999; Neuhauser et al., 2009; Chen et al., 2010; Kamath et al., 2011; Declercq et al., 2012; Chui, et al., 2013; Chui 2017). Biodegradation is the exclusive natural process that can remediate contaminated soil and groundwater environment by transforming organic pollutants into inorganic substances (Wiedemeier et al., 1999b; Zheng et al., 2016). Biodegradation is also an attractive approach because of several other reasons. It is energy saving, economical, and an environmentally friendly method for reducing the impact of pollution for sites polluted by hydrocarbon products (Godeke et al., 2006; Chiu et al., 2017; Azubuike et al., 2016). Intrinsic biodegradation is a vital aspect in the removal of contaminants (Stasik et al., 2015; Davis et al., 2009) and breakdown of pollutants into products that are less harmful to the environment such as H_2O , CO_2 , biomass, and salt (El-Naas, 2014; Chui, 2017).

This type of study includes a detailed site investigation for physical and geochemical characterization of the region. Soil and groundwater sampling techniques including soil borings, multi-level monitoring well installation and sampling are used to collect data for field and laboratory analyses. With soil sampling in the unsaturated zone and capillary fringe, mobile and residual light non-aqueous phase liquids (LNAPLs) that serve as source areas for the dissolved benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) contaminants in the underlying water-table aquifer are located. Soil samples are analyzed for total volatile and extractable hydrocarbons; aromatic hydrocarbons (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX); total organic carbon (TOC), and moisture content. The subsurface distribution of hydro-stratigraphic

units are determined. Multi-level monitoring wells are constructed to determine the three-dimensional characteristics of the BTEX and other plumes and the vertical distribution of chlorides and total dissolved solids (TDS), particularly in the vicinity of the seacoast. Groundwater samples are analyzed for total volatile and extractable hydrocarbons, aromatic hydrocarbons (BTEX), dissolved oxygen, nitrate, manganese, iron (II) (Fe^{+2}), sulfate (SO_4^{2-}), methane, alkalinity, oxidation-reduction potential (Eh), pH, temperature, conductivity, chloride, and total dissolved solids (TDS). Two cycles of wet season-dry season sampling for a total sampling period of approximately 18 months is convenient. Slug tests, an aquifer pumping test, and permeameter tests can be conducted to determine the hydraulic conductivity of the water-table aquifer in the study area. The results of the field and laboratory investigations are used to prepare a physical and geochemical characterization of the site.

Monitored natural attenuation can be simulated using a solute fate and transport model. Based on the results of the physical and geochemical characterization of the area, RT3D (Clement, 1997; Lu et al., 1999) and other suitable codes such as PHWAT (Mao et al., 2006) can be considered for the groundwater model. The determination of whether natural attenuation can be considered appropriate for the study area are based on primary and secondary lines of evidence established during the investigation. The primary line of evidence is whether the BTEX plume is stable or shrinking, rather than expanding. Secondary lines of evidence, which include geochemical data that serve as indicators of naturally occurring biodegradation and estimates of natural attenuation rates, are based on electron acceptor/reduction product concentrations of oxygen, nitrate, manganese

(II), iron (II), sulfate, and methane measured within the BTEX plume. For example, depletion in dissolved oxygen, nitrate, and/or sulfate and increases in dissolved manganese, iron, and methane in the groundwater would indicate that biodegradation is occurring. The groundwater modeling results are used to help decide whether the monitored natural attenuation process will result in BTEX contaminant levels declining to acceptable levels within a specified time. If projections of contaminated levels based on the model results indicate that this objective cannot be met, then additional remedial alternatives can be recommended for further investigation.

DISTRIBUTION OF PETROLEUM HYDROCARBONS IN THE SUBSURFACE

Contaminants for sites contaminated by petroleum products occur in four different states (Beck and Mann 2010; Konecny et al., 2003) as shown in Figure 1. These states are;

1. Volatilized in soil vapors: in the unsaturated zone of the soil, hydrocarbons in volatile states decompose into gaseous phase as organic soil vapor and migrate into vapor phase,

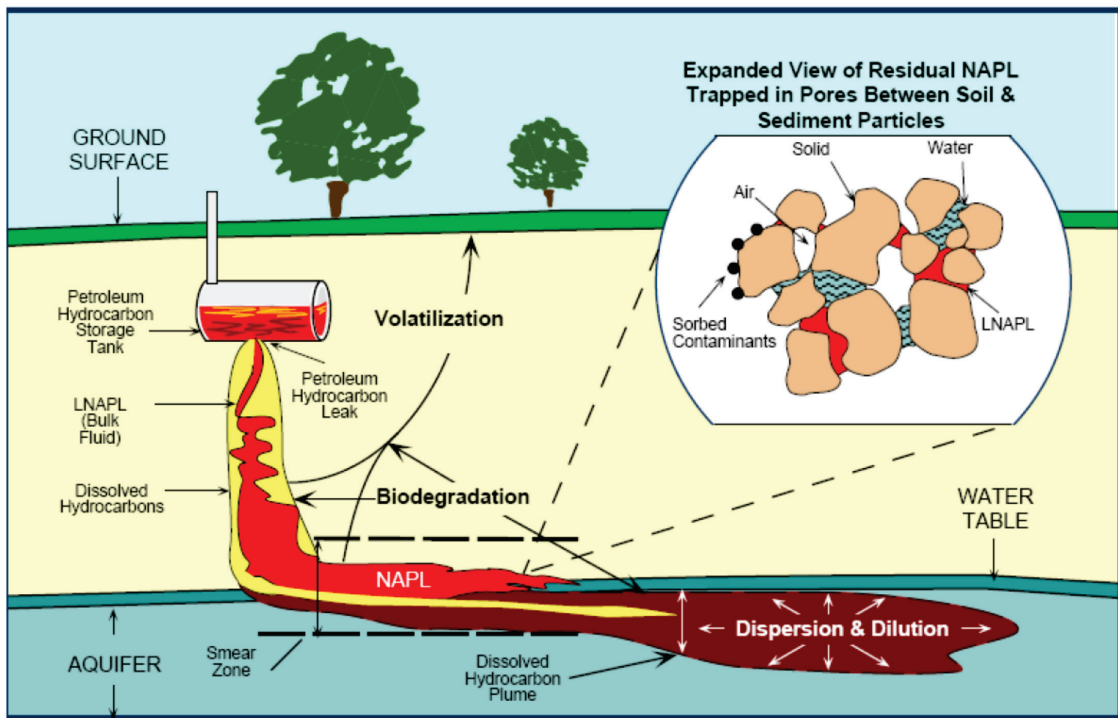


Figure 1. Schematic demonstration of how petroleum hydrocarbons distribution in a subsurface occurs after a site spillage (Department of Environmental Protection, 2004; Beck and Mann, 2010).

Şekil 1. Bir döküntü sonrası ortaya çıkan petrol hidrokarbonlarının yeraltında dağılımının şematik gösterimi (Department of Environmental Protection, 2004; Beck ve Mann, 2010).

2. Dissolved in groundwater: in vadose zone, petroleum compounds which are dissolved in percolating precipitation, migrate into groundwater table with a concentration below the free phase solubility of the compound,
3. Sorbed onto matrix particles: the aquifer or the vadose zone matrix sorbs dissolved petroleum compounds into their matrix which has native organic carbon,
4. Non-aqueous phase liquids (NAPLs); these are organic, nondissolved liquids in the subsurface.

The majority of petroleum compounds in contaminated groundwater exist in the form of NAPLs. Introducing petroleum hydrocarbon NAPLs into unsaturated zone causes their movement down to the saturated zone. When reached at the water table, petroleum

hydrocarbon NAPLs float on the water table as they are less dense than water and form a thin layer that spreads across the water table and capillary fringe. The resulting product is referred to as light NAPLs which are usually found as a mixture of chemicals although they also exist as single chemical (Wiedemeier et al., 1999a). More soluble aromatic hydrocarbons including benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes, popularly referred to as BTEX compounds dissolve from LNAPLs. Non-aqueous phase liquids that are denser than water are referred to as DNAPL. DNAPLs, unlike LNAPLs, after entering the saturated zone, descend vertically until residual saturation formation exhaust their volume. The presence of aquifer zones with lower permeability might disturb the vertical migration process and thus cause lateral migration (Konecny et al., 2003).

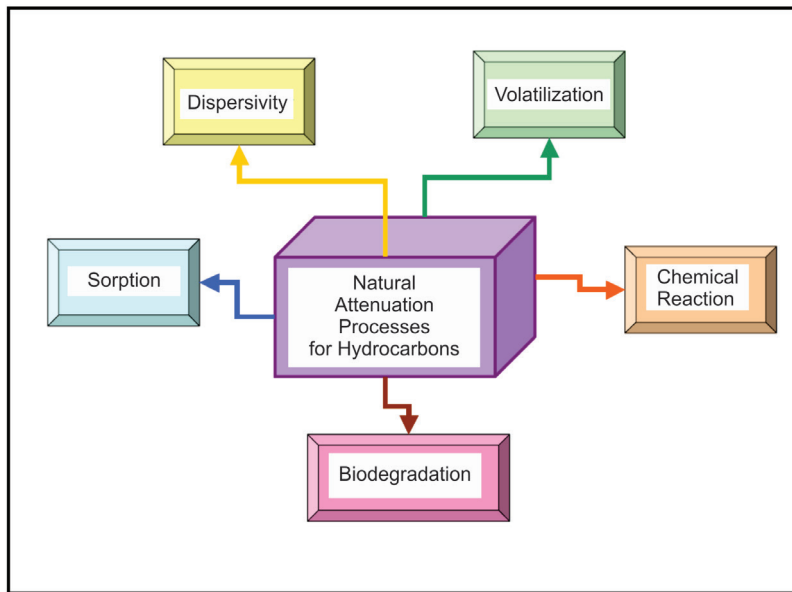


Figure 2. Schematic demonstration of how petroleum hydrocarbons are attenuated naturally (UK, EA, 2000; Beck and Mann, 2010).

Şekil 2. Petrol hidrokarbonlarının doğal gideriminin şematik gösterimi (UK, EA, 2000; Beck ve Mann, 2010).

The natural fate and transport process of soluble contaminants found in many areas contaminated with petroleum hydrocarbons includes dispersion, biodegradation, advection, sorption, chemical reactions, and volatilization (Figure 2) (Wiedemeier, et al., 1996; Kao and Wang 1999; Chen et al 2005; Bauer et al., 2008; Uçankuş and Ünlü 2008; Beck and Mann 2010; EPA, 2012; Chiu et al., 2017). Dispersion is the process, which a solute is diluted and thus reducing its concentration. Sorption refers to the process of partitioning of dissolved phase hydrocarbons into solid phase sorbents leading to their temporary or permanent immobilization through attachment to sites or sorption on solid surfaces in the subsurface matrix. On the other hand, volatilization is a mass-transfer process that causes the partitioning of dissolved constituents into vapor phase.

Biodegradation refers to mass transformation process in which petroleum hydrocarbons are broken down by microbially-facilitated chemical reactions and thereby reducing the concentration of contaminants and the amount of dissolved hydrocarbon in groundwater. Under some conditions, petroleum hydrocarbons may be broken down by some chemical reactions without the assistance of microorganisms. However, in dissolved phase biodegradation remains the dominant mass reduction process (Beck and Mann, 2010).

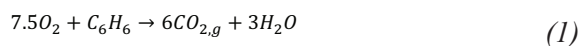
BIODEGRADATION OF BTEX

Biodegradation refers to the process by which chemical compounds are broken down by subsurface microorganisms. Through a biological activity, microorganisms break down hydrocarbons into water and carbon dioxide (Wiedemeier et al., 1996; ASTM 2010; U.S. EPA 2012; Banerjee et al., 2016). Once petroleum

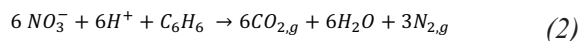
hydrocarbons intruded into groundwater, an increase in the amount of organic carbon content will occur and the microorganisms in the contaminated environment will try to gradually adapt to this new environment (Su et al., 2013; Anderson and Lovely, 1997). The biodegradation intensity of contaminants by microorganisms is influenced by several factors that include oxygen, contaminant concentration and composition, nutrients, pH value, physical and chemical characteristics, and the history of the contaminated environment regarding pollution (Margesin and Schinner, 2001). By transforming hydrocarbons, microorganisms get energy and carbon which is crucial for their growth, reproduction, and survival. Microorganisms employ a series of catalyzed reactions by oxidative-reduction enzymes resulting to metabolic intermediates or water and carbon dioxide. Additionally, the oxidative reactions provide energy for growth and maintenance of microorganism cells. For the electrons to be passed through the steps that lead to the generation of energy, sink of an electron is required. Normally, the electron sink/acceptor is molecular oxygen and this process is referred to aerobic respiration. However, when molecular oxygen is lacking or insufficient, other compounds such as (NO_3), manganese (Mn^{+4}), ferric iron (Fe^{+3}), sulfate (SO_4^{-2}) or carbon dioxide (CO_2) act as terminal electron acceptors and this process is referred to as anaerobic respiration. The choice of these compounds occur in the order presented above (Wiedemeier et al., 1996; Skubal et al., 2001; Khan et al., 2003; Dyer, 2003; 2007; ASTM 2010; Su et al., 2013; Chiu et al., 2013; Chiu et al., 2017).

Aerobic and anaerobic metabolism of BTEX equations and resulting products are shown in following equations (Wiedemeier et al., 1999b):

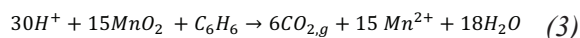
Benzene oxidation/aerobic respiration



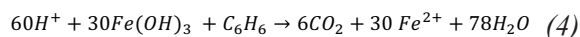
Benzene oxidation/denitrification



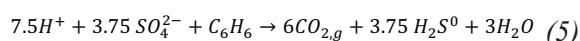
Benzene oxidation/manganese reduction



Benzene oxidation/iron reduction



Benzene oxidation/sulfate reduction



Benzene is used in the equations, but the reactions can apply to all BTEX compounds. As illustrated in equations, while oxygen is consumed, the products of aerobic respiration are water and carbon dioxide. On the other hand, in anaerobic respiration, BTEX react with an electron acceptor and produces water, carbon dioxide, and a reduced electron acceptor. However, water is not produced in methanogenesis. For both aerobic and anaerobic processes lead to the attenuation of BTEX, the disappearance of dissolved oxygen and/or electron acceptors or the generation of electron-acceptor reduction products are indicators of biodegradation (Hunkeler et al., 1997; Van Stempvoort et al., 2008; ASTM, 2010; Robertson et al., 2012; Thapa et al., 2012; Yeung et al 2013; Chiu et al., 2013; Cassidy et al, 2015; Banerjee et al., 2016; Chiu 2017). Depletion of dissolved oxygen, nitrate and sulphate concentrations and increasing ferrous iron and methane concentrations indicate that anaerobic degradation is occurring (Naidu et al., 2012). However, the rate of degradation of BTEX under anaerobic respiration is slower as compared to that under aerobic respiration (Moreels et al., 2004; Kao et al., 2008; Kao, 2010; Silva and Corseuil, 2012).

The majority of electron acceptors and their products including O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe (II), Mn (II), CH_4 as illustrated in equations 1, 2, 3, 4 and 5 can easily be measured in water samples. By measuring these parameters, the impact of biodegradation on solute plume can be evaluated (ASTM, 2010).

Oxygen

Oxygen is the most favorable electron acceptor, and its presence facilitates rapid growth of aerobic bacteria given the availability of nutrients in polluted groundwater (Prommer et al., 1999; Wisconsin Department of Natural Resources, 2014). In zones where the concentration of BTEX is high, dissolved oxygen is depleted very fast as microorganisms use the oxygen to breakdown BTEX. Any oxygen that enters this zone is rapidly depleted as biodegradation of highly concentrated BTEX and other constituents requires a high amount of oxygen. For this reason, an indication of biodegradation can be based on the inverse relationship of low dissolved oxygen and high hydrocarbon concentration (ASTM, 2010). For the degradation of the petroleum hydrocarbon using anaerobic reaction, electron acceptors such as nitrate, sulfate, ferric ions, and manganese are used by microorganisms (Washington State Department of Ecology 2005; Beck and Mann 2010).

Nitrate

Upon the depletion of dissolved oxygen in groundwater zone or the decreasing of its concentration to <0.5 ppm, nitrate will be used as an electron acceptor for anaerobic biodegradation (U.S. EPA 1999; ASTM 2010; Da Silva and Corseuil, 2012; Thapa et al., 2012; Fuentes et al., 2014). In groundwater zones with a high concentration of BTEX, the demand

f nitrate by microorganisms that biodegrade BTEX may be high, and therefore this will lead to the decreasing of nitrate as compared to its concentrations outside the plume and upgradient zone. It is thus expected that there will be an inverse relationship between the concentration of BTEX and that of nitrate concentration (ASTM 2010).

Manganese

When oxygen and nitrates are depleted, microorganisms make use of manganese (Mn^{+4}) as a terminal electron acceptor to breakdown BTEX and generate reduced water soluble manganese (Mn^{+2}). In BTEX contaminated anaerobic groundwater zone, if Mn^{+4} (MnO_2) is available, it is expected that a positive relation between the concentration of BTEX and concentration of Mn^{+2} , which can be used as biodegradation indicator. Dissolved manganese (Mn^{+2}) has high sensitivity to oxidation (Zeeb and Wiedemeier, 2007; ASTM 2010; Beck and Mann 2010; Wisconsin Department of Natural Resources, 2014).

Iron

Microorganisms may also use ferric iron (Fe^{+3}) as electron acceptors and they produce water-soluble ferrous iron (Fe^{+2}). In BTEX contaminated groundwater zones, it is expected that a positive relationship between the concentration of BTEX and concentration of Fe^{+2} , which can be used as a biodegradation indicator (Zeeb and Wiedemeier 2007; ASTM 2010; Chiu et al., 2017).

Sulfate

When oxygen, nitrates, and ferric iron are depleted (strongly reducing conditions), microorganisms make use of sulfate as a

terminal electron acceptor to breakdown BTEX to produce sulfide or ferrous sulfide precipitate. In groundwater with a high concentration of BTEX, the demand for sulfate by microbes that biodegrade BTEX may be high, and therefore this will lead to the depletion of sulfate as compared to its concentrations outside the plume and upgradient. In overall, it is expected that there will be an inverse relationship between the concentration of BTEX and that of sulfates in sulfate-reducing zones (Kao and Wang, 2000; Da Silva et al., 2005; ASTM 2010; Cassidy et al., 2015; Chui et al., 2017).

Methane

Methanogens produce methane under strongly reducing conditions by using CO_2 or cleave acetate as terminal electron acceptor. Methane, which is not found in fuels, can therefore be used as biodegradation indicator. The production of methane can be significant in high concentrations of BTEX and under methanogenic conditions. In these conditions it is expected that there will be a positive correlation between the concentration of BTEX and concentration of methane (Wiedemeier et al, 1996; Zeeb and Wiedemeier, 2007; ASTM 2010; U.S. EPA, 2012).

Oxidation-Reduction (Redox) Potential

The measure of relative tendency of a solution to accept or donate electrons is referred to as oxidation-reduction (redox) potential. Microorganisms act as important mediators of redox reactions in groundwater. For this reason, a biodegradative process strongly influences redox potential and vice versa. Redox potential in groundwater is between -400 and 800 mv. In this range, only specific biodegradative processes can

operate as illustrated in Table 3. The zones where anaerobic biodegradation processes reduce the value of redox potential can be identified by measuring redox values of upgradient and within the plume (Wiedemeier 1999b; Washington State Department of Ecology, 2005; ASTM, 2010; Chiu et al., 2017). Table 3 presents a typical sequence of electron acceptors from both aerobic and anaerobic conditions (Washington State Department of Ecology, 2005; Beck and Mann, 2010).

GROUNDWATER PETROLEUM CONTAMINATION RELATED STUDIES IN TURKEY

There are very few studies about petroleum hydrocarbon contamination in groundwater in Turkey. Uçankuş and Ünlü (2008) used numerical simulation techniques for defining relationship between aquifer heterogeneity and the biodegradation rate of BTEX. Visual

MODFLOW/RT3D was used for modelling of dissolved BTEX plume transport within heterogeneous aquifers. Kara (2006) evaluated the movement of petroleum plumes for city of Batman. The numerical simulations were performed using the BIOPLUME III program. Potential effects of the movement of petroleum plumes on drinking water quality simulations were explored. Akbulut (2009) measured physicochemical (pH, dissolved oxygen, Eh, temperature and electrical conductance) parameters in 212 wells and determined spatial distribution of natural attenuation indicators for Karaduvar (Mersin) aquifer which is heavily contaminated with petroleum hydrocarbons. She also determined BTEX concentrations, and designed a funnel and gate type permeable reactive barrier for remediation of the existing petroleum hydrocarbon pollution for the Karaduvar (Mersin) area, using MODFLOW software.

Table 3. Microbial reactions and geochemical indicators evaluation (↓ = decreasing concentration, ↑ = increasing concentration) (Washington State Department of Ecology, 2005; Beck and Mann, 2010).

Çizelge 3. Jeokimyasal indikatörlerin ve mikrobiyal reaksiyonların değerlendirilmesi (↓ = azalan konsantrasyon, ↑ = artan konsantrasyon) (Washington State Department of Ecology 2005; Beck ve Mann 2010).

Type of Microbial Respiration	Electron Acceptor	Metabolic By-Product	Geochemical Indicator Response		Redox Potential Eh (mV @ pH, 25°C)	
Aerobic (Oxidation)	Oxygen	CO ₂	O ₂ ↓	CO ₂ ↑	+820	Most preferred
Anaerobic (Reduction)	Nitrate (NO ₃ ⁻)	N ₂	NO ₃ ⁻ ↓	CO ₂ ↑	+720	↓ ↓ ↓ ↓
	Manganese (Mn ⁴⁺)	Mn ²⁺	Mn ²⁺ ↑	CO ₂ ↑	+520	
	Ferric iron (Fe ³⁺)	Ferrous iron (Fe ²⁺)	Fe ²⁺ ↑	CO ₂ ↑	-50	
	Sulphate (SO ₄ ²⁻)	H ₂ S	SO ₄ ²⁻ ↓	CO ₂ ↑	-220	
	Carbon Dioxide (CO ₂)	Methane (CH ₄)	CH ₄ ↑	CO ₂ ↑	-240	Least Preferred

Babaarslan (2001) investigated the biodegradation of BTEX compounds in a mixed culture obtained from the formation water which was produced from the petroleum wells of Turkey Petroleum Corporation (TPAO) in Adiyaman region (south-eastern Turkey).

PROCEDURES AND GUIDELINES

In a widely accepted guide for remediation of ground water by natural attenuation at petroleum release sites, ASTM (2010) describes typical site characterization, sampling parameters, methods, and special considerations for evaluating remediation by natural attenuation in groundwater for petroleum release sites. Wiedemeier et al. (1999b) prepared a technical protocol for support of intrinsic remediation of groundwater, contaminated with petroleum hydrocarbons. In this protocol, data collection and analyses are described for restoration of groundwater. Beck and Mann (2010) presented a technical guidance for the demonstrating of monitored natural attenuation for dealing with groundwaters impacted by petroleum hydrocarbons. Also, Wilson (2011) described a statistics-based approach for evaluating the progress of natural attenuation during long term monitoring and site characterization.

MODELING STUDIES

Clement et al. (1998) developed RT3D, a general purpose three-dimensional multispecies reactive transport code that uses MODFLOW to simulate groundwater flow and several MT3D sub-programs to simulate advection and dispersion. Modules of reaction are included in the code to simulate various types of multispecies reactive transport. Subsequently, Lu et al. (1999) used RT3D to model the natural attenuation of

BTEX compounds dissolved in the groundwater migrating from a light nonaqueous phase liquid (LNAPL) source at Hill Air Force Base in Utah, USA. Suarez and Rifai (2004) simulated the fate and transport of fuel hydrocarbons in groundwater using the two-dimensional BIOPLUME III code (Rifai et al., 1996) code to model natural attenuation of BTEX and benzene. Prommer et al. (2003a) described the steps that are most often involved in numerical modelling of petroleum hydrocarbon contaminated sites and some of the most commonly used biogeochemical transport models and pre- and post-processing tools. As an example, the MT3DMS-based multicomponent transport code PHT3D was used to simulate the natural attenuation of a BTEX plume originating from a NAPL source. As described by Prommer et al. (2003b), PHT3D couples the transport simulator MT3DMS and the geochemical modeling code PHREEQC-2 (Parkhurst and Appelo, 1999) based on a split-operator technique. The PHT3D model was also used to simulate the mobilization of native metals in an aquifer, arsenic, under changing geochemical conditions, predominantly reduced dissolved oxygen (Wallis et al., 2011). Mao et al. (2006) described the development of PHWAT, which simulates multi-component reactive transport in variable density groundwater flow, by coupling the geochemical reaction model PHREEQC-2 with the density-dependent groundwater flow and solute transport model SEAWAT (Guo and Langevin, 2002) also using the split-operator technique. PHWAT was tested successfully for a one-dimensional case of freshwater flushing into a soil column saturated with brackish water and a two-dimensional case where seawater intrudes into a soil tank initially filled with freshwater and also was used to study a series of flow instability cases. In studies relevant to the saltwater intrusion that apparently has occurred at the Karaduvar

site, Motz and Sedighi (2009 and 2013) used MODFLOW, MT3DMS, and SEAWAT to represent the coastal boundary condition and investigate saltwater intrusion and recirculation of seawater at a coastal boundary. Also, Çobaner et al. (2012) used SEAWAT to model seawater intrusion that occurred in the Göksu Delta along the Mediterranean Coast at Silifke.

METHOD

Research of natural attenuation and modeling of petroleum hydrocarbon contamination can be divided into six tasks to achieve the purpose of the research:

- Task 1. Preliminary Assessment and Conceptual Model
- Task 2. Field and Laboratory Investigations
- Task 3. Physical and Geochemical Characterization of the Study Area
- Task 4. Development of the Groundwater Model
- Task 5. Evaluation of Monitored Natural Attenuation

In the first three tasks, the hydrogeological structure and groundwater quality of the region is determined, and a realistic conceptual hydrogeological model is developed. In the fourth task, a groundwater flow and contaminant transport model representing dissolved BTEX compounds in the aquifer is developed. In the last two tasks, the groundwater modeling results are used to help decide whether the monitored natural attenuation process is resulted in BTEX contaminant levels declining to acceptable levels within a specified time. If the model results indicate that this objective cannot be met, then additional remedial alternatives can be recommended for further investigation.

In this context, the methodologies and procedures detailed below were compiled from Wiedemier et al. (1999b) and ASTM (2010). The proposed monitoring well network is based on Beck and Mann (2010).

Task 1. Preliminary Assessment and Conceptual Model

A preliminary conceptual model of the site is developed, including a preliminary assessment of the potential for monitored natural attenuation to occur. This includes describing hydrogeologic characteristics of the site, the history of the site, and any past or current remedial activities, based on reviewing existing literature, technical reports, and available site data.

Task 2. Field and Laboratory Investigations

A detailed investigation of the site is performed to determine the nature and extent of contamination and the potential for monitored natural attenuation to occur. Soil and groundwater sampling techniques including conventional soil borings, monitoring well installation, and water quality sampling, is used to collect data for field and laboratory analyses.

Soil Sampling

Soil sampling is carried out to determine of hydrostratigraphic units and mobile and residual distribution of LNAPLs in the unsaturated zone that serve as source areas for the dissolved BTEX contaminants in the underlying water-table aquifer. Soil samples are analyzed for total volatile and extractable hydrocarbons, aromatic hydrocarbons (BTEX), organic carbon content of saturated zone soils, and moisture content. Continuous soil sampling can be conducted with

a soil coring kit for soil characterization and determining the location of LNAPLs.

Use of the collected data is as follows:

Total volatile and extractable hydrocarbons: Location, concentration, distribution and total mass of total petroleum hydrocarbons (TPH) sorbed to soils and mobile NAPL are used for contaminant partitioning calculations into groundwater from these phases. Knowledge of NAPL plume location is important to model applications for determinations of contaminant source area and boundary conditions of model.

BTEX: Data is used for determination of extent of soil contamination, presence of the contaminant mass, and thus the continuity of the BTEX plume and the necessity of source removal (Wiedemeier 1999b).

Moisture content: It is used for correction of soil sample analytical results such as dry weight of soil. (Wiedemeier 1999b).

Organic carbon content of saturated zone soils: These data is used to determine retardation factors of dissolved plume components and estimate transport rates (ASTM 2010).

Groundwater Sampling

Multi-level groundwater monitoring wells are constructed to determine the three-dimensional characteristics of the BTEX and other plumes and the vertical distribution of chlorides and total dissolved solids (TDS), particularly in the vicinity of the seacoast.

Groundwater samples are analyzed for total volatile and extractable hydrocarbons, aromatic hydrocarbons (BTEX), dissolved oxygen, nitrate, manganese, iron (II) (Fe^{+2}), sulfate (SO_4^{-2}), methane, alkalinity, oxidation-reduction potential

(Eh), pH, temperature, conductivity, chloride, and total dissolved solids (TDS). Two cycles of wet season-dry season sampling for a total sampling period of approximately 18 months can be carried out. Groundwater sampling is conducted using the multi-level observation wells in contaminated area. Groundwater is sampled at a single level outside of the contaminated area. Use of the collected data during the groundwater sampling is as follows (compiled from ASTM, 2010):

BTEX: data of historical BTEX plume, which is a primary lines of evidence is utilized directly for the determination of whether plume is expanding, stable or shrinking.

Dissolved oxygen: the occurrence of aerobic biodegradation is indicated by an inverse correlation between the concentrations of dissolved oxygen to BTEX concentrations. The complete consumption of dissolved oxygen is expressed as depressed or nondetectable levels of dissolved oxygen throughout the plume.

Nitrate: the use of nitrate as an electron receptor for anaerobic breakdown of hydrocarbons will reduce the concentration of nitrate in the anaerobic portion of the plume.

Ferrous iron: the utilization of Fe (III) as an electron acceptor for anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons will lead to increase in concentrations of Fe (II).

Manganese: increase in the level of Mn (II) is an indication of the utilization of Mn (IV) as a terminal electron receptor during anaerobic biodegradation.

Sulfate (SO_4^{-2}): the use of sulfate as an electron receptor for anaerobic breakdown of hydrocarbons will reduce its concentration in the anaerobic part of the plume.

Methane: the use of carbon dioxide as an electron acceptor for the anaerobic breakdown of hydrocarbons will elevate the concentration of methane.

Heavy metals: the presence of heavy metals such as selenium and zinc is important for the occurrence of biological processes. However, a high concentration of these metals is toxic to microorganisms that break down petroleum hydrocarbon compounds (Beck and Mann, 2010). Microbiological processes can also be impaired or eliminated by the presence of toxic metals such as cadmium and mercury. At sites where they occur naturally or develop anthropogenic impacts, inhibitor assessment is required.

Alkalinity: carbonate alkalinity is the major contributor to total alkalinity. Therefore, alkalinity can be considered as a measure of dissolved carbonate and bicarbonate.

Oxidation-reduction potential (Eh): Plume regions undergoing oxidation or reductions is defined using redox data. Redox data is also important for validating measurements of dissolved oxygen concentrations and evaluating the potential for biologically mediated redox reactions.

pH: the occurrence of biological activity may be indicated by the difference in pH between contaminated and uncontaminated groundwater.

Temperature: Groundwater temperature influences the solubility of oxygen, and therefore the rate of biodegradation is also affected by temperature. Within the plume of the solute, there may be an increase in temperature.

Conductivity: Conductivity can be used to indicate that samples are from the same hydrogeological zone though taken from different sampling points.

Chloride: concentration of chloride can be used as a proxy for fluid density and salinity.

Total dissolved solids (TDS): It can be used as the level of seawater intrusion.

Aquifer Test

Hydraulic conductivity is a significant parameter for the transport of the contaminants. Slug tests and aquifer pumping tests can be conducted to determine the hydraulic conductivity of the water-table aquifer in the study area. Hydraulic conductivity can also be measured in the laboratory with a permeameter on soils samples.

Observation Wells

The 3D characterization of petroleum contaminants in an aquifer is appropriately done using reliable and defensible data. Drilling of observation wells is needed for plume delineation (Figure 3). The properties of these observation wells are defined as follows (Beck and Mann 2010) (Figure 3):

1. **Background well:** For potential attenuation capacity and background groundwater chemistry, one or more wells can be chosen or drilled upgradient site of the contamination source. Natural hydrochemistry and concentrations of electron acceptors such as DO, NO₃, SO₄ in groundwater can be determined.
2. The maximum potential width of the plume can be established through the lateral delineation monitoring wells by drilling perpendicular to the flow direction of groundwater. In heterogeneous anisotropic system, lateral delineation can be highly variable.

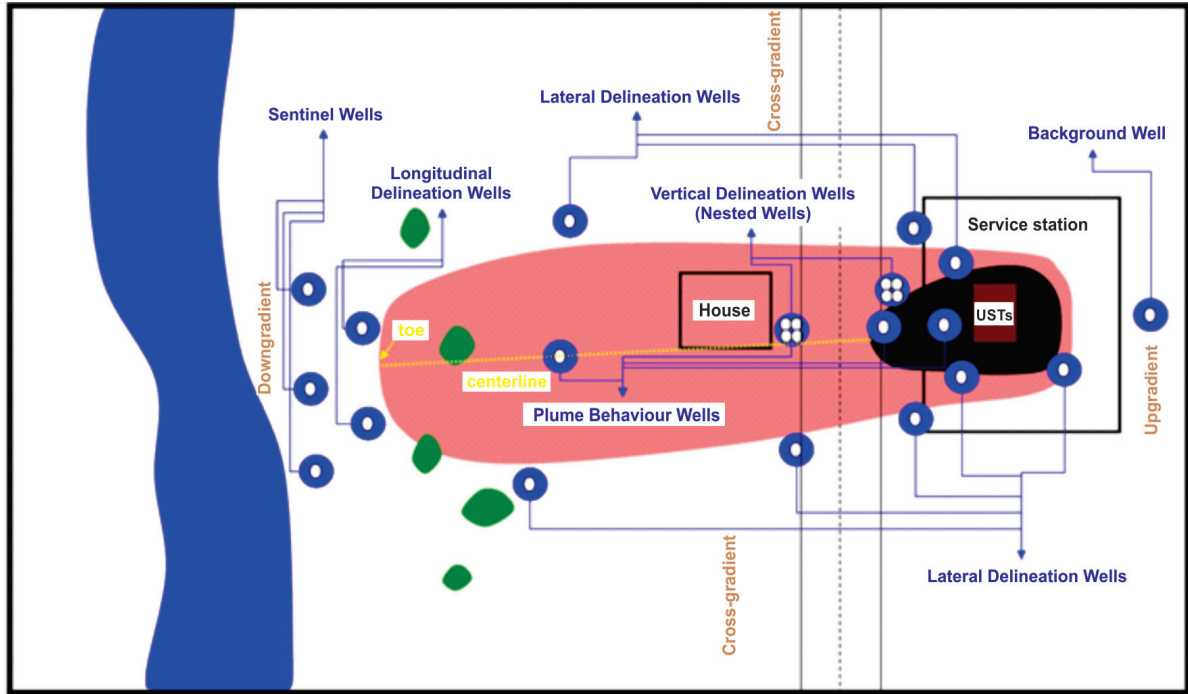


Figure 3. 3D delineation of the impact of petroleum hydrocarbon on groundwater sources using a typical observation well network (Beck and Mann, 2010).

Şekil 3. Petrol hidrokarbonunun yeraltı suyu kaynakları üzerindeki etkisinin tipik bir gözlem kuyu ağı kullanılarak 3 boyutlu olarak belirlenmesi (Beck ve Mann, 2010).

3. Plume centerline monitoring wells can be drilled from source to increasing distances on groundwater flow direction to assess changes of contaminant concentrations on down-gradient site of the source. These wells are located along the middle of the contamination plume, where the highest concentrations are expected.
4. Several source monitoring wells are drilled across the water table to allow screening and assessment of changes in mass loading and changes between trapped phase and free phase. This is controlled by several factors that include the velocity of the groundwater flow, product area, hydrogeochemical conditions, and mass loading and weathering.
5. The best location for drilling longitudinal delineation monitoring wells is contaminant plume toe in the direction of groundwater flow for determination of plume geometry changes and down gradient expands of the plume.
6. The best installation point for sentinel monitoring wells is near receptors, site boundaries or other designated compliance points. The implementation of the active remediation plans is made based on continuous detection of contaminant plume in these wells.
7. In case plume is suspected of sinking, vertical delineation monitoring wells can be drilled. This can be achieved using multi-level monitoring wells.

8. Other observation wells outside the contaminated area can be drilled for purposes of determining aquifer characteristics, groundwater sampling, and for groundwater level measurements.

Parameters and Their Measurement Methods

- Slug tests, pumping tests and permeameter tests for determining aquifer hydraulic characteristics;
- Grain size distribution analyses. Sieve analyses and hydrometer methods are used for determination of grain size distribution.
- Groundwater levels can be measured in observation wells at least for 4 rounds at approximately 6 months apart for fluctuations in groundwater elevation and flow direction.
- Major ion analyses of groundwater: These analyses can be conducted using Ion Chromatography.
- Heavy metals: These analyses can be conducted on selected samples using ICP-MS.

Determination methods of following parameters are compiled from ASTM 2010 and Wiedemeier, 1999b):

- Physical parameters of groundwater: Temperature, pH, electrical conductance (EC), dissolved oxygen (DO), and oxidation-reduction potential can be measured in the field in a flow-through cell which is a closed container with groundwater flowing in at the bottom and out at the top in such a way that no air is trapped inside (Weaver et al., 2007).
- Alkalinity: Alkalinity field test kit can be used.

- Background concentrations of electron acceptors: Mn^{2+} , NO_3^- , and SO_4^{2-} is determined in the field with colorimetric field kit.
- Metabolic byproduct Fe^{+2} is determined in the field with colorimetric method.
- Hydrocarbon analyses of groundwater and soil (BTEX): Purge and Trap Gas Chromatography is used for hydrocarbon analysis.
- Total organic carbon (TOC) of the soils aquifer matrix: Modified Mebius Procedure can be used for TOC.
- Methane: GC/FID method can be used for determination of methane contents.
- Sorption and retardation calculations: Organic carbon partitioning coefficient (K_{oc}) and total organic carbon (TOC) content of the aquifer matrix are used for contaminant sorption and retardation calculations.
- Contaminant sorption calculations can be made based on retardation coefficients (R_D), bulk density of the aquifer matrix, distribution coefficients (K_D) of contaminants, and aquifer porosity.
- Retardation coefficients (R_D): is determined based on bulk density, distribution coefficients K_D , and porosity.
- Bulk density: Bulk density of the aquifer matrix is determined based on laboratory samples and used in calculating retardation coefficients.
- Distribution coefficients (K_D) can be estimated from octanol-water partition coefficients (K_{oc}) and total organic carbon (TOC) content of the aquifer matrix.
- Octanol-water partition coefficients (K_{oc}) can be estimated from published values for individual contaminants.

- Porosity of the aquifer matrix is determined from laboratory samples and used in calculating retardation coefficients. Porosity will also be an input parameter in analytical and numerical models.
- Moisture content: can be measured using ASTM D-2216 method.

Task 3. Physical and Geochemical Characterization of the Study Area

The results of the field and laboratory investigations (Task 2) are used for physical and geochemical characterization of the site. Physical characteristics include topography and surface-water features, man-made features, and regional geology and hydrogeology. Site geology and hydrogeology will include lithology, stratigraphy, and grain-size distributions. Groundwater hydraulics will include water-table maps, flow directions and gradient, hydraulic conductivity, effective porosity, and specific yield for transient models, groundwater velocity, preferential flow paths, and groundwater use in the vicinity of the site. Climatological characteristics include evapotranspiration and rainfall for the site.

Geochemical characterization include delineating mobile and residual-phase LNAPLs that serve as sources of contamination dissolved in the groundwater. Groundwater chemistry includes dissolved-phase BTEX contaminants and inorganic and geochemical indicators of biodegradation. This include contour maps of BTEX, electron acceptors (dissolved oxygen, nitrate, manganese, and sulfate), metabolic by products (ferrous iron and methane), reduction/oxidation potential, alkalinity, pH, temperature, chloride, and total dissolved solids.

Calculations are made to investigate processes that affect contaminant concentrations

and total mass of contaminants in the groundwater system. If LNAPLs remain at the site, fuel/water partitioning calculations is made to account for the partitioning from this phase into groundwater. Groundwater velocity calculations are made to account for the advective transport of dissolved contaminants. The mixing, i.e., hydrodynamic dispersion, that occurs downgradient from source areas in the direction of the advective velocity and also laterally and vertically to the direction of groundwater flow is investigated based on the plumes of BTEX contaminants and inorganic chemicals and geochemical indicators of biodegradation. Contaminant sorption and retardation calculations are based on aquifer matrix total organic carbon (TOC) content and the organic carbon partitioning coefficient (K_{oc}) for each contaminant. Biodegradation calculations are based on decay rates for aerobic respiration, denitrification, reduction of ferric (III) iron, sulfate and methanogenesis.

Task 4. Groundwater Model

Monitored natural attenuation can be simulated and evaluated using a solute fate and transport model. Analytical and numerical models that include the transport processes advection, dispersion, retardation, and biodegradation is used for this task. Appropriate analytical solutions is used for preliminary analysis of BTEX concentrations in the groundwater at the site; this involve consideration of one-dimensional (e.g., Bear, 1972; Van Genuchten and Alves 1982, and Wexler 1992), two-dimensional (Wilson and Miller, 1978), and three-dimensional (Domenico, 1987) analytical solutions to the contaminant transport equation. A three-dimensional numerical code such as RT3D (Clement, 1997) can be selected to develop a model of contaminant transport for the site.

This code was originally developed to support transport of contaminant modeling at natural attenuation demonstration sites (Lu et al., 1999; Clement et al., 2000), and the current version of this code is fully supported by the Pacific Northwest National Laboratory in Richland, Washington, USA. However, if it is determined that the advection and dispersion processes have been significantly affected by saltwater intrusion at the coastal boundary, resulting in a variable-density groundwater velocity flowfield, it may be necessary to consider using a more complex code such as PHWAT (Mao et al. 2006), which couples the variable-density transport code SEAWAT (Guo and Langevin, 2002) and PHREEQC-2 (Parkhurst and Appelo, 1999).

The hydrogeologic setting at the site is conceptualized and the groundwater model is constructed based on the conceptual model that was developed according to the characterization. Starting values for the groundwater model parameters is based on the field and laboratory investigations (Task 2) and the physical and geochemical characterization of the study area (Task 3). The three-dimensional distribution of mobile and residual LNAPLs will be delineated to define the source area(s) for the plume of BTEX contaminants dissolved in the groundwater. The groundwater model is calibrated by comparing observed and calculated values for hydraulic heads and plumes for BTEX and other constituents such as dissolved oxygen, nitrate, ferrous iron, sulfate and methane. A sensitivity analysis is conducted to determine the effects of the uncertainties in aquifer and geochemical parameters, particularly hydraulic conductivity and reaction rates, have on concentrations of BTEX and the other constituents.

Task 5. Evaluation of Monitored Natural Attenuation

The determination of whether natural attenuation is occurring at the aquifer is based on primary and secondary lines of evidence established during the investigation (ASTM, 2010). The primary line of evidence, which is a stable or shrinking plume rather than an expanding plume, will be the BTEX contour maps prepared as a result of the groundwater sampling. Secondary lines of evidence, which include geochemical data that serve as indicators of naturally occurring biodegradation and estimates of natural attenuation rates (Wiedemeier et al., 1996), is based on electron acceptor/reduction product concentrations of oxygen, nitrate, manganese (II), iron (II), sulfate, and methane measured within the BTEX plume. For example, depletions in dissolved oxygen, nitrate, and/or sulfate and increases in dissolved manganese, iron, and methane in the dissolved plume will indicate that biodegradation is occurring (Beck and Mann, 2010). The groundwater modelling results is used to help decide whether the monitored natural attenuation process results in BTEX contaminant levels declining to acceptable levels within a specified time. If projections of contaminant levels based on the model results indicate that this objective cannot be met, then additional remedial alternatives is recommended for further investigation. Along with continued intrinsic remediation, these additional alternatives would include options such as excavation of contaminated soils, complete LNAPL recovery, pumping and treating, bioslurping (vacuum-enhanced recovery), enhanced bioremediation (inducing air or oxygen into the unsaturated zone), air sparging (injecting air into contaminated groundwater), bioventing, and installation of reactive barriers.

CONCLUSION

Coastal regions have high population density which increase the use of petroleum products. The uses of petroleum products in these areas cause the contamination of groundwater sources and therefore posing a serious health and environmental problem. To address the pollution problem, several technologies have been developed. This paper focused on natural attenuation process.

Natural attenuation makes use of biological, chemical or physical processes to mitigate pollution by transforming organic pollutants into inorganic substances. Natural attenuation is energy saving, economical and environmentally friendly. Natural attenuation of BTEX compounds involves biodegradation in which petroleum hydrocarbons are broken down by microbially-facilitated chemical reactions to reduce their concentration in groundwater. Biodegradation involves either aerobic or anaerobic respiration. In aerobic respiration, the electron sink or acceptor is molecular oxygen. When molecular oxygen is lacking or insufficient, other compounds such as (NO_3), manganese (Mn^{+4}), ferric iron (Fe^{+3}), sulfate (SO_4^{-2}) or carbon dioxide (CO_2) act as terminal electron acceptors and facilitate anaerobic respiration of BTEX in the prescribed order. In aerobic respiration, BTEX react with oxygen and produces water and carbon dioxide only while in anaerobic respiration, BTEX react with an electron acceptor (NO_3 , Mn^{+4} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , or CO_2) to produce water, carbon dioxide, and a reduced electron acceptor. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in groundwater sources is influenced by other factors such as contaminant concentration and composition, nutrients, pH value, physical and chemical characteristics, and the history of the contaminated environment regarding pollution.

The paper describes the stages to determine the spatial distribution of petroleum hydrocarbon contamination and modeling. First stage includes realistic development of conceptual model of the site including hydrogeologic characteristics and contamination history of the site and applied past or current remedial activities. Second stage includes field and laboratory investigations to collect data for field and laboratory analyses with soil and groundwater sampling techniques including conventional soil borings, monitoring well installation, and water quality sampling to determine nature and extent of the contamination. Third stage includes physical and geochemical characterization of the site according to the result of the field and laboratory investigations. Site geology and hydrogeology is determined in detail. Dissolved phase BTEX contaminants and inorganic and geochemical indicators of biodegradation are defined. Calculations is made to investigate processes that affect contaminant concentrations in groundwater; fuel/water partitioning calculations is made to account for the partitioning; groundwater velocity calculations is made to account for the advective transport of dissolved contaminants, contaminant sorption and retardation calculations are made. Hydrodynamic dispersion is investigated based on the plumes of BTEX contaminants and inorganic chemicals and geochemical indicators of biodegradation. Fourth stage includes groundwater model. This stage describes simulation of the monitored natural attenuation using a solute fate and transport model. Analytical and numerical models are used including the transport processes advection, dispersion, retardation, and biodegradation. At the last stage monitored natural attenuation is evaluated. Primary and secondary lines of evidences are used for the determination of whether natural attenuation is occurring at the

aquifer. BTEX contour maps are used for primary lines of evidence. If the plume is shrinking or stable, it indicates that biodegradation is occurring. Geochemical data is used for secondary lines of evidence. Depletions in dissolved oxygen, nitrate, sulfate and increases in dissolved manganese, iron, and methane in the dissolved plume indicate that biodegradation is occurring. The groundwater modeling results are used for whether the BTEX contaminant levels declining to acceptable levels with natural attenuation. In other case other remedial techniques should be considered.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) (Project number: 1059B211200206). We would like to thank Professor Serdar BAYARI of Hydrogeology Division of Geological Engineering Department at Hacettepe University.

REFERENCES

- Akbulut, C., 2009. Groundwater modelling of the Karaduvar (Mersin) aquifer and site selection of permeable reactive barrier for remediation of petroleum pollution. MSc Thesis, University of Mersin, Department of Geological Engineering, Institute of Natural and Applied Sciences, Mersin, Turkey.
- Anderson, R.T., Lovely, D.R., 1997. Ecology and biogeochemistry of in situ groundwater bioremediation. *Advances in Microbial Ecology*, 15, 289-350.
- ASTM D-2216, 2010. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, American Society of Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2010. Standard Guide for Remediation of Ground Water by Natural Attenuation at Petroleum Release Sites, E1943-98. American Society of Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- Azubuikwe, C.C., Chikere, C.B., Okpokwasili, G.C., 2016. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32 (11), 1-18.
- Babaarslan, C., 2001. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons, Ankara University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, MSc Thesis, 91p. (unpublished, Turkish with English Abstract).
- Banerjee, A., Roy, A., Dutta, S., Mondal, S., 2016. Bioremediation of hydrocarbon - A Review. *International Journal of Advanced Research* 4 (6), 1303-1313.
- Bauer, R.D., Maloszewski, P., Zhang, Y., Meckenstock, R.U., Griebl, C., 2008. Mixing-controlled aerobic and anaerobic biodegradation of toluene in porous media - results from two-dimensional laboratory experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, 96, 150-168.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, Inc., New York, 764 pp.
- Beck, P., Mann, B., 2010. A technical guide for demonstrating monitored natural attenuation of petroleum hydrocarbons in groundwater. Technical Report, No: 15, CRC Care, Australia.
- Caetano, M.O., Schneider, I.A.H., Gomes, L.P., Kieling A.G., Miranda L.A.S., 2017. A compact remediation system for the treatment of groundwater contaminated with BTEX and TPH. *Environmental Technology*, 38 (11), 1408-1420.
- Cassidy, D.P., Srivastava, V.J., Dombrowski, F.J., Lingle J.W., 2015. Combining in situ chemical oxidation, stabilization, and anaerobic bioremediation in a single application to reduce contaminant mass and leachability in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 297, 347-355.

- Chen, C.S., Hseu, Y.C., Liang, S.H., Kuo, J.Y., Chen, S.C., 2008. Assessment of genotoxicity of methyl-tert-butyl ether, benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene to human lymphocytes using comet assay. *Journal of Hazardous Materials*, 153, 351-356.
- Chen, K.F., Kao, C.M., Chen, C.W., 2010. 13th IWA International Specialist Conference on Diffuse Pollution and Integrated Watershed Management Location: Seoul, South Korea Date: OCT 12-15, *Journal of Environmental Sciences* 22(6), 864-871.
- Chen, K.F., Kao, C.M., Wang, J.Y., 2005. Natural Attenuation of Mtbe at Two Petroleum-Hydrocarbon Spill Sites. *Journal of Hazardous Materials* 125(1-3), 10-16.
- Chiu, H.Y., Hong, A., Lin, S.L., Surampalli, R.Y., Kao, C.M., 2013. Application of natural attenuation for the control of petroleum hydrocarbon plume: Mechanisms and effectiveness evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 126-137.
- Chiu, H.Y., Verpoort, F., Liu, J.K., Chang Y.M., Kao, C.M., 2017. Using intrinsic bioremediation for petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater clean up and migration containment: Effectiveness and mechanism evaluation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72, 53-61.
- Clement, T.P., Johnson, C.D., Sun, Y., Klecka, G. M., Bartlett, C., 2000. Natural Attenuation of Chlorinated Ethane Compounds: Model Development and Field-Scale Application at the Dover Site. *Journal of Contaminant Hydrology*, 42 (2000), 113-140.
- Clement, T.P., 1997. RT3D (Version1.0): A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-species Transport in 3-Dimensional Groundwater Systems. Report PNNL-11720, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 59 pp.
- Clement, T.P., Sun, Y., Hooker, B.S., Petersen, J.N., 1998. Modeling Multispecies Reactive Transport in Ground Water. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 18 (2), 79-92.
- Çobaner, M., Yurtal, R., Doğan, A., Motz, L.H., 2012. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. *Journal of Hydrology*, 464, 262-280.
- Coresuil, et al., H.X., Monier, A.L., Gomes, A.P.N., Chiaranda, H.S., Rosaria, M., Alvarez, P.J.J., 2011. Biodegradation of Soybean and Castor Oil Biodiesel: Implications on the Natural Attenuation of Monoaromatic Hydrocarbons in Groundwater. *Ground Water Monitoring & Remediation* 31 (3), 111-118.
- Da Silva, M.L.B., Corseuil, H.X., 2012. Groundwater microbial analysis to assess enhanced BTEX biodegradation by nitrate injection at a gasohol-contaminated site. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 67, 21-27.
- Davis, G.B., Patterson, B.M., Trefry, M.G., 2009. Evidence for instantaneous oxygen-limited biodegradation of petroleum hydrocarbon vapors in the subsurface. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 29(1), 126-137.
- Declercq, I., Cappuyns, V., Duclos, Y., 2012. Monitored natural attenuation (MNA) of contaminated soils: State of the art in Europe, A critical evaluation. *Science of the Total Environment*, 426, 393-405.
- Department of Environmental Protection, 2004. Use of monitored natural attenuation for groundwater remediation, Land and Water Quality Branch, Environmental Regulation Division, Department of Environmental Protection, Perth.
- Dobson, R., Schroth, M.H., Zeyer, J., 2007. Effect of water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (3), 235-248.
- Domenico, P.A., 1987. An analytical model for multi-dimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 91, 49-58.
- Dyer, M., 2003. Field investigation into the biodegradation of TCE and BTEX at a former metal plating works. *Engineering Geology*, 70 (3-4), 321-329.

- El-Naas M.H., Acio J.A., El Telib A.E., 2014. Aerobic biodegradation of BTEX: progresses and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1104-1122.
- Fernandes A.N., Gouveia C.D., Grassi M.T., Crespo, J.S, Giovanela, M. 2014. Determination of Monoaromatic Hydrocarbons (BTEX) in Surface Waters from a Brazilian Subtropical Hydrographic Basin. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 92, 455-459.
- Fiori, S.M., Zalba, S.M., 2003. Potential impacts of petroleum exploration and exploitation on biodiversity in a Patagonian Nature Reserve, Argentina *Biodiversity and Conservation*, 12(6), 1261-1270.
- Guerin, T.F., Horner, S., McGovern, T, Davey B., 2002. An application of permeable reactive barrier technology to petroleum hydrocarbon contaminated groundwater. *Water Research*, 36 (1) 15-24.
- Guo, W., Langevin, C.D., 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Groundwater Flow. U.S. Geological Survey Techniques of Water-resources, Investigations Book 6, USA.
- Hunkeler, D., Hohn, E., Hohener, P., Zeyer, J., 1997. ²²²Rn as a Partitioning tracer to detect mineral oil contaminations: Laboratory Experiments and preliminary field measurements. *Environmental Science and Technology* 31, 3180-3187.
- Indumathi, M.N., Bokam, R., Vijay, L., Ravi, K., 2017. An assessment of subsurface contamination of an urban coastal aquifer due to oil spill. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 (4), 148.
- Kamath, R., Connor J.A., McHugh, T.E., Nemir, A., Le, M.P., Ryan, A.J., 2011. Use of long-term monitoring data to evaluate benzene, MTBE, and TBA plume behavior in groundwater at retail gasoline sites. *Journal of Environmental Engineering*, 138, 458-69.
- Kao C.M., Wang, C.C, 2000. Control of BTEX migration by intrinsic bioremediation at a gasoline spill site. *Water Resources*, 34(13), 3413-3423.
- Kao, C.M., Chen, C.Y., Chen, S.C., Chien, H.Y., Chen, Y.L., 2008. Application of in situ biosparging to remediate a petroleum-hydrocarbon spill site: field and microbial evaluation. *Chemosphere*, 70, 1492-1499.
- Kao, C.H., Chen, C.S., Tsa, F.Y., Yang, K.H., Chien, C.C., Liang, S.H., Yang, C.A., Chen, S.C., 2010. Application of real-time PCR, DGGE fingerprinting, and culture-based method to evaluate the effectiveness of intrinsic bioremediation on the control of petroleum-hydrocarbon plume. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 409-416.
- Kara, A., 2006. Modelling soluble petroleum hydrocarbons in groundwater in Batman. Gebze Technical University, Institute of Science and Technology, Gebze, Turkey, MSc. Thesis, 85 p (unpublished)
- Khan F.I., Husain T., 2003. Evaluation of a petroleum hydrocarbon contaminated site for natural attenuation using 'RBMNA' methodology, *Environmental Modelling and Software* 18, 179-194.
- Khan F.I., Husain, T., Hejazi, R., 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*, 71, 95-122.
- Konecny, F., Bohacek, Z., Müller, M., Kovarova, M., Sedlackova, I., 2003. Contamination of soil sand ground water by petroleum hydrocarbons and volatile organic compounds-Case study: Elslav Brno, *Bulletin of Geosciences*, 78 (3), 225-239.
- Lu, G., Clement, T.P., Zheng, C., Wiedemeier, T.H., 1999. Natural Attenuation of BTEX Compounds: Model Development and Field-Scale Application. *Groundwater*, 37(5), 707-717.
- Mao, X., Prommer, H., Barry, D.A., Langevin, C.D., Panteleit, B., Li, L., 2006. Three-Dimensional Model for Multi-Component Reactive Transport with Variable Density Groundwater Flow. *Environmental Modelling Software*, 21, 615-628.
- Margesin, R., Schinner, F., 2001. Bioremediation (natural attenuation and biostimulation) of diesel-oil-contaminated soil in an Alpine glacierskiing area. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 3127-3133.

- Maric, N., Ilic M., Miletic S., Gojgic-Cvijovic, G., C., Beskoski V., Vrvic M.M., Papic P., 2015. Enhanced in situ bioremediation of groundwater contaminated by petroleum hydrocarbons at the location of the Nitex textiles. *Serbia Environmental Earth Science*, 74, 5211-5219.
- McMurty, D.C., Elton R.O., 1985. New approach to in situ treatment of contaminated groundwaters. *Environmental Progress*, 4(3), 168-70.
- Mirzaee, E., Gitipour, S., Mousavi, M., Amini, S., 2017. Optimization of total petroleum hydrocarbons removal from Mahshahr contaminated soil using magnetite nanoparticle catalyzed Fenton-like oxidation. *Environmental Earth Sciences*, 76 (165), 1-13.
- Moreels, D., Bastiaens, L., Ollevier, F., Merckx, R., Diels, L., Springael, D., 2004. Evaluation of the intrinsic methyltert-butylether (MTBE) biodegradation potential of hydrocarbon contaminated subsurface soils in batch microcosm systems. *FEMS Microbiology Ecology*, 49, 121-128.
- Motz, L.H., Sedighi, A., 2009. Representing the Coastal Boundary Condition in Regional Groundwater Flow Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(8), 821-831.
- Motz, L.H., Sedighi, A., 2013. Saltwater Intrusion and Recirculation of Seawater at a Coastal Boundary. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(1), 10-18.
- Mukhopadhyay, A., Quinn, M., Al-Haddad A., Al-Khalid, A., Al-Qallaf, H., Rashed, T., Bhandary, H., Al-Salman, B., Bushehri, A., Boota A, Bhatt, M., 2017. Pollution of fresh groundwater from damaged oil wells, North Kuwait. *Environmental Earth Sciences*, 76(145), 1-16.
- Naidu, R., Nandy, S., Megharaj, M., Kumar R.P., Chadalavada, S., Chen Z., Bowman, M., 2012. Monitored natural attenuation of a long-term petroleum hydrocarbon contaminated sites: a case study. *Biodegradation*, 23, 881-895.
- Neuhauser, E.F., Ripp, J.A., Azzolina, N.A., Madsen, E.L., Mauro, D.M., Taylor, T., 2009. Monitored natural attenuation of manufactured gas plant tar mono and polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater: a 14-year field study. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 29, 66-76.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. Version 2: User's Guide to PHREEQC-A Computer Code for Speciation, Reaction-path, 1D-transport, and Inverse Geochemical Calculations. Technical Report, 99-4259, U.S. Geological Survey, USA.
- Prommer, H., Davis, G.B., Barry, D.A., 1999. Geochemical changes during biodegradation of petroleum hydrocarbons: field investigations and biogeochemical modelling. *Organic Geochemistry*, 30 (6), 423-435.
- Prommer, H., Davis, G.B., Barry, D.A., Miller, C.T., 2003a. Modelling the fate of petroleum hydrocarbons in groundwater. In: *Health and Environmental Assessment of Site Contamination* (Langley, A., Gilbey, M. and Kennedy, B. Eds), (Proceedings of the Fifth National Workshop on the Assessment of Site Contamination. Adelaide 13-15 May 2002). Published by the Australian Environmental Protection and Heritage Council (EPHC) incorporating the National Environmental Protection Council (NEPC), 21-45.
- Prommer, H., Barry, D.A., C. Zheng, C. 2003b. MODFLOW/MT3DMS based reactive multi-component transport model. *Ground Water*, 41 (2), 247-257.
- Raynauld, M., Peel, M., Lefebvre, R., Molson, J.W., Crow, H., Ahad, J.M.E., Ouellet, M., Aquilina, L., 2016. Understanding shallow and deep flow for assessing the risk of hydrocarbon development to ground water quality. *Marine and Petroleum Geology*, 78, 728-737.
- Rifai, H.S., Newell, C.J., Gonzales, J.R., Dendrou, S., Dendrou, B., Kennedy L., Wilson, J., 1996. BIOPLUME III -Natural Attenuation Decision Support System, User's Manual, Version 1.0, Air Force Center For Environmental Excellence, San Antonio, TX, 272 p.
- Robertson, W.D., Moore, T.A., Spoelstra, J., Li, L., Elgood, R.J., Clark, I.D., Schiff, S.L., Aravena, R., Neufeld, J.D., 2012. Natural attenuation of septic system nitrogen by anammox. *Ground Water*, 50, 541-553.

- Ruggieri, R., Forti, P., Antoci, M.L., Waele, J.D., 2017. Accidental contamination during hydrocarbon exploitation and the rapid transfer of heavy-mineral fines through an overlying highly karstified aquifer (Paradiso Spring, SE Sicily). *Journal of Hydrology*, 546, 123-132.
- Skubal, K.L., Barcelona, M.J., Adriaens, P., 2001. An assessment of natural biotransformation of petroleum hydrocarbons and chlorinated solvents at an aquifer plume transect. *Journal of Contaminant Hydrology*, 49, 151-169.
- Stasik, S., Wick L.Y., Wendt-Potthoff, K., 2015. Anaerobic BTEX degradation in oils and stailings ponds: impact of labile organic carbon and sulfate-reducing bacteria. *Chemosphere*, 138, 133-9.
- Su, X.S., Lv, H., Zhang, W.J., Zhang, Y.L., 2013. Evaluation of petroleum hydrocarbon biodegradation in shallow groundwater by hydrogeochemical indicators and C S-isotopes. *Environmental Earth Science*, 69, 2091-2101.
- Suarez, M.P., Rifai, H.S. 2004. Modeling natural attenuation of total BTEX and benzene plumes with different kinetics. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 24 (3), 53-68.
- Teng, Y., Feng, D., Song, L., Wang, J., Li, J., 2013. Total petroleum hydrocarbon distribution in soils and groundwater in Songyuan oil field, Northeast China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185 (11), 9559-9569.
- Thapa, B., Kumar, K.C.A., Ghimire, A., 2012. A Review on bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminants in soil. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology* 8(I).
- Uçankuş, T., Ünlü, K., 2008. The effect of aquifer heterogeneity on natural attenuation rate of BTEX. *Environmental Geology*, 54 (4), 759-776.
- UK, EA, 2000. Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater, R&D Publication 95, prepared by Envirospainwalland LGC plc, Environment Agency, Bristol.
- U.S. EPA, 1999. Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank sites. EPA (United States Environmental Protection Agency), Washington, D.C.
- U.S. EPA, 2012. Petroleum Hydrocarbons and Chlorinated Solvents Differ In Their Potential For Vapor Intrusion. (United States Environmental Protection Agency) Office of Underground Storage Tanks, Washington, D.C.
- Van Genuchten, M., Th. Alves, W.J., 1982. Analytical Solutions of the One-Dimensional Convective-Dispersive Solute Transport Equation: U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin Number, 1661, 151 p.
- Van Stempvoort D., Biggar, K., 2008. Potential for bioremediation of petroleum hydrocarbons in groundwater under cold climate conditions: a review. *Cold Regions Science and Technology*, 53 (1), 16-41.
- Van Stempvoort, D.R., Armstrong, J., Mayer, B., 2007. Microbial reduction of sulfate injected to gas condensate plumes in cold groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 92, 184-207.
- Wallis, I., Prommer, H., Pichler, T., Post, V., Norton, S.B., Annable, M.D., Simmons, C.T., 2011. Process-Based Reactive Transport Model to Quantify Arsenic Mobility during Aquifer Storage and Recovery of Potable Water. *Environmental Science & Technology*, 45(16), 6924-6931.
- Washington State Department of Ecology, 2005. Guidance on Remediation of Petroleum-Contaminated Ground Water By Natural Attenuation. Toxics Cleanup Program. Publication 05-09-091, 143 p.
- Weaver, J.M.C., Cave, L., Talma, A.S., 2007. Groundwater Sampling, a Comprehensive Guide for Sampling Methods (Second Edition). Water Research Commission, Groundwater Sciences, The Council for Scientific and Industrial Research, South Africa, TT 303/07.
- Wexler, E.J., 1992. Analytical solutions for one-, two- and three-dimensional solute transport in ground-water systems with uniform flow: United States Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 3, Chapter B7, 190 p.

- Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J., Wilson, J.T., 1999a. *Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface*: John Wiley and Sons, New York, 617 p.
- Wiedemeier, T.H., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Miller, R.N., Hansen, J.E. 1999b. *Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Ground Water*, Air Force Center For Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brooks Air Force Base, San Antonio, TX.
- Wiedemeier, T.H., Swanson, M.A., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Miller, R.N., Hansen, J.E. 1996. *Approximation of Biodegradation Rate Constants for Monoaromatic Hydrocarbons (BTEX) in Ground Water*. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 16 (3), 186-194.
- Wilson, J.T., 2011. *An Approach for Evaluating the Progress of Natural Attenuation in Groundwater*. EPA 600-R-11-204.
- Wilson, J.L., Miller, P.J., 1978. *Two-dimensional plume in uniform ground-water flow*. *American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Division*, 104, no. HY4, 503-514.
- Wisconsin Department of Natural Resources, 2014. *Guidance on Natural Attenuation for Petroleum Releases. Remediation and Redevelopment Program*. Report RR-614.
- Yeung, C.W., Van Stempvoort, D.R., Spoelstra, J., Bickerton, G., Voralek, J., Greer, C.W., 2013. *Bacterial community evidence for anaerobic degradation of petroleum hydrocarbons in cold climate groundwater*. *Cold Regions Science and Technology*, 86, 55-68.
- Yu, S.P., Lu, J.F., Sun, G.Y., 2003. *Impact of oil field exploitation on eco-environment of the Daqing lakes*. *Chinese Geographical Science*, 13(2), 175-181.
- Zeeb, P., Wiedemeier, T.H., 2007. *Technical Protocol for Evaluating the Natural Attenuation of MTBE*. American Petroleum Institute Publishing Services, Washington D.C., Publication No: API 4761.
- Zhang, Y., Qian, H., Wang, J., Si, C., Chen, Z., Dang, J., Zheng, Z., 2017. *Variations in the environmental characteristics of groundwater slightly contaminated with petroleum: effects of enhanced bioremediation in northeast China*. *Environmental Earth Sciences*, 76 (90), 1-8.
- Zheng, Z., Zhang Y., Su, X, Cui, X., 2016. *Responses of hydrochemical parameters, community structures, and microbial activities to the natural biodegradation of petroleum hydrocarbons in a groundwater-soil environment*. *Environmental Earth Sciences*, 75 (1400), 1-13.

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

• İnsan ile Yerküre arasındaki etkileşimlere ilişkin bilgi ve deneyimleri doğal çevreyi de gözleterek daha güvenli ve rahat bir yaşam ortamı sağlamak amacı ile insanlığın hizmetine sunmayı hedefleyen Jeoloji Mühendisliği mesleğinin, günlük yaşamdaki yerini ve önemini daha etkin bir şekilde yansıtmak,

• Bu alanda ulusal ve uluslararası gelişmeleri Jeoloji Mühendisleri'nin bilgisine sunmak,

• Konu ile doğrudan veya dolaylı etkinliklerde bulunan biliminsanları, araştırmacılar, mühendisler ve diğer uygulayıcılar arasındaki bilgi ve deneyim paylaşımını güçlendirecek ve hızlandıracak, kolay erişilebilen, geniş katılımlı bir tartışma ortamı sağlamak ve bunları yayma olanağı yaratmak,

• Türkiye'nin toplumsal ve ekonomik kalkınmasını yakından ilgilendiren jeolojiye ilişkin sorunların daha etkin bir şekilde çözüme kavuşturulması açısından büyük önem taşıyan kurumlararası işbirliğinin başlatılmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunmak,

• Türkçe'nin Jeoloji Mühendisliği alanında bilim dili olarak geliştirilmesini ve yabancı sözcüklerden arındırılmasını özendirmek amaçlarına sahiptir.

KAPSAM VE NİTELİK

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, ulusal ve uluslararası platformlarda, yerbilimlerinin uygulamaya yönelik alanlarında çalışmalar yapan herkesin katkısına açıktır. Bu çerçevede;

- İnsanların yaşamını etkileyen jeolojik süreçler ile mühendislik yapıları ve bunlara ilişkin sorunlar ve çözümler
- Jeolojik kaynakların yönetimi ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi
- Doğal ve yapay kirleticiler ve ekosisteme etkileri
- Jeolojik anıtların korunması
- Jeolojik sorunların çözümüne katkıda bulunan arazi ve laboratuvar yöntemlerinin ve tekniklerinin geliştirilmesi

ile ilgili kuramsal ve uygulamalı çalışmaları kapsayan ürünler, Yayın Kurulu'nun değerlendirmesinden geçtikten sonra Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde yayımlanır.

Jeolojinin uygulama alanlarına ilişkin her türlü çalışma Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nin yayın amaçlarına uygundur. Bununla birlikte, çalışmaya konu olan sorunun kullanılan teknik ne olursa olsun, bilimsel yöntemlerle ele alınması ve jeolojinin uygulama alanlarına ilişkin olması aranan temel nitelikler arasındadır. Çalışmanın daha önce Türkçe yayımlanmamış olması gerekmektedir. Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde, yeni yapıyla beş tür yazı yayımlanacaktır:

1- ELEŞTİREL İNCELEME (Review Paper): 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- ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article): Özgün bir çalışmanın sunulduğu yazıdır. Kuramsal temel, yeterli miktar ve nitelikte veriye dayalı bulgu ve sonuçların ayrıntılıyla

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 (Technical Note): 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 (Research Note): Henüz tamamlanmamış, eksik veri ve bulgularla yüzeysel değerlendirmelere dayalı, kendi içinde tutarlı, özgün, deneysel, uygulamalı veya kuramsal araştırmaların ön sonuçlarının 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 (View, Comment and Reply): Dergide yayımlanan yazılar hakkında her türlü görüş, yorum ve bunlara ilişkin yanıtları içerir. Editörün uygun gördüğü uzunlukta yayımlanır.

YAZILARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAYINA KABUL İLKELERİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ Editörlüğü'ne 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, az veya önemli ölçüde düzeltilmesi koşuluyla yayımlanmasına veya reddine Editörce karar verilir ve sonuç yazarlara 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 görüp değerlendirebilirler.

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

Gönderilen yazılar, JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayımlansın veya yayımlanmasın yazarlara iade edilmez.

YAZIM DİLİ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayım dili olarak "Türkçe" ve "İngilizce" kullanılmaktadır. Derginin oldukça geniş bir yurt dışı aboneliği ve sürümü olduğu için, Türkçe makalelerin, kabulden sonra "Genişletilmiş bir İngilizce Özeti'nin yazılması gerekmektedir. Dergide; ayrıca yazıların başlıkları, özetleri ve tüm çizelgeler ile şekillerin açıklamaları Türkçe ve İngilizce olarak iki dilde birlikte verilmelidir.

YAZIM KURALLARI

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nde yayımlanması kabul edilen yazıların basım öncesi dizgi işlemleri Editörlükçe yazarlara gönderilecek olan "**Makale Yazım Formatı**"na göre yazarlar tarafından yapılır. Zaman tasarrufu, ekonomiklik ve yazıların son şeklinin yazarlar tarafından da kontrolünü sağlamak açısından tercih edilen bu yöntemde, yazarlar yazılarını baskıya girecek şekilde bilgisayarda formata uygun bir şekilde dize ederler ve bırakılan boşluklara da şekil ve çizelgeleri yerleştirerek (camera-ready uygulamasına benzer şekilde) basım aşamasına getirerek Editörlüğe gönderirler.

Metin Bölümü

- 1- **Metin:** A4 boyutunda (29,7 x 21 cm) kağıtların üzerine bilgisayarda, 1,5 satır aralıkla, 10 punto ve Times New Roman yazı karakteri ile yazılmalıdır. Sayfa kenarlarında 3'er cm boşluk bırakılmalı ve sayfalar numaralandırılmalıdır.
- 2- **Başlık:** konuyu en iyi şekilde belirtecek ve 12 kelimeyi geçmeyecek şekilde kısa seçilmeli ve Türkçe başlığın (tamamı büyük harflerle ve koyu yazılmış) yanısıra, İngilizcesi (İtalik ve normal büyük harflerle) de yazılmalıdır. Eğer yazı İngilizce yazılmış ise, önce İngilizce sonra Türkçe başlık verilmelidir.
- 3- **Öz:** yazının başlangıcında 200 kelimeyi geçmeyecek şekilde hazırlanmış Öz/Abstract (Türkçe ve İngilizce) bulunmalıdır. Bu bölüm, yayının diğer bölümlerinden ayrı olarak yayımlanabilecek düzende yazılmış, yazının tümünü en kısa, ancak öz biçimde yansıtır nitelikte (özellikle çalışmanın amacını ve sonuçlarını yansıtarak) olmalıdır. Yazı Türkçe yazılmışsa Abstract'ın, İngilizce yazılmışsa Öz'ün başlığı ve metin kısmı italik karakterle yazılmalıdır. Ayrıca, Öz ve Abstract bölümlerinin altında bir satır boşluk bırakılarak *Anahtar Kelimeler ve Key Words* (en az 2, en çok 6 kelime alfabetik sıraya göre) verilmelidir. Eğer yazı İngilizce hazırlanmış ise, önce Abstract sonra Öz verilmelidir.
- 4- Yazının genel olarak aşağıda belirtilen düzene göre sunulmasına özen gösterilmelidir:
 - a) Başlık (Türkçe ve İngilizce)
 - b) Yazar ad(lar)ı ve adres(ler)i (yazar adları koyu karakterle ve soyadları büyük harflerle, adresler normal italik karakterlerle)
 - c) Öz (anahtar kelimeler eklenerek)
 - d) Abstract (key words eklenerek)
 - e) Giriş (amaç, kapsam, çalışma yöntemleri, vd.)
 - f) Metin bölümü (yöntemler, çalışılan malzeme, saha tanımlamaları, vd.)
 - g) Tartışmalar
 - h) Sonuçlar ve Öneriler
 - i) Katkı belirtme (gerekliyse)
 - j) Kaynaklar

- 5- Metin içinde ana bölüm başlıkları dışında en fazla üç alt başlık oluşturulmalı ve başlıklara numara verilmemelidir. Bunların yazım şekli aşağıdaki gibi olmalıdır:

ÖZ

ABSTRACT

GİRİŞ

ANA BAŞLIK

Birinci Derece Alt Başlık

İkinci derece alt başlık

Üçüncü derece alt başlık

TARTIŞMALAR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KATKI BELİRTME

KAYNAKLAR

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

Kaynaklar

- a) Metin içinde kaynaklara değinme yapılırken aşağıdaki örneklerde olduğu gibi, bibliyografya araştırmacı soyadı ve tarih sırasıyla verilir.
....Ford (1986) tarafından....
....bazı araştırmacılar (Williams, 1987; Gunn, 1990; Saraç ve Tarcan, 1995)

- b) Birden fazla sayıda yazarlı yayınlara metin içinde değinirken ilk soyadı belirtilmeli, diğer yazarlar için vd. ibaresi kullanılmalıdır.
....Doyuran vd. (1995)....
....Smart vd.(1971)....
- c) Ulaşılamayan bir yayına metin içinde değinme yapılırken bu kaynakla birlikte alıntının yapıldığı kaynak da aşağıdaki şekilde belirtilmelidir. Ancak Kaynaklar Dizisinde sadece alıntının yapıldığı kaynak belirtilmelidir.
....Dreybrodt(1981; Schuster and White, 1971)....
- d) Kişisel görüşmelere metin içinde soyadı ve tarih belirtilerek değinilmeli, ayrıca "Kaynaklar Dizini"nde de yer verilmelidir. (Soyadı, Adı, Tarih. Kişisel görüşme. Görüşülen kişinin/kişilerin adres(ler)i)
- e) Kaynaklar, yazar soyadları esas alınarak alfabetik sırayla verilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, "Kaynaklar Dizini"nde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen esas alınmalıdır:

Sürelî yayınlar ve bildirimler

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.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Makalenin Başlığı. Sürelî Yayının Adı (kısaltılmamış), Cilt No. (Sayı No.), 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.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Bildirinin Başlığı. Sempozyum veya Kongrenin Adı, Editörler, Basımevi, Cilt No. (birden fazla ciltten oluşuyorsa), Düzenlendiği Yerin Adı, Sayfa No.]

Kitaplar

Palmer, C.M., 1996. *Principles of Contaminant Hydrogeology* (2nd Edition). Lewis Publishers, New York, 235 p.

Ketin, İ., Camitez, N., 1972. *Yapısal Jeoloji*. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, Sayı:869,520 s.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Yayınevi, Basıldığı Şehrin Adı, Sayfa Sayısı.]

Raporlar ve Tezler

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).

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Raporun veya Tezin Başlığı. Kuruluşun veya Üniversitenin Adı, Arşiv No. (varsa), Sayfa Sayısı (yayımlanıp, yayımlanmadığı)]

NOT: Tüm kaynaklarda ilk satırdan sonraki satırlar 0.7 cm içeriden başlanarak yazılmalıdır.

Eşitlikler ve Formüller

- a) Eşitlikler elle yazılmamalı ve bilgisayardan yararlanılmalıdır. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir.
- b) Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir.
- c) Eşitliklerde kullanılacak alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (I_d , x^2 gibi).
- d) Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir.
- e) Karekök işareti yerine parantezle birlikte üst indis olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{\text{maks}} = \sigma_c^{0.5}$ gibi).

- f) Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine "/" simgesi kullanılmalıdır. Çarpma işareti olarak genellikle herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak zorunlu hallerde "*" işareti tercih edilmektedir ($y=5 * 10^{-3}$ gibi).
- g) Kimyasal formüllerde iyonların gösterilmesi amacıyla Ca^{++} veya CO^{-} gibi ifadeler yerine Ca^{2+} ve CO_3^{2-} kullanılmalıdır.
- h) İzotop numaraları, "¹⁸O" şeklinde verilmelidir.

Çizelgeler

- a) Yazarlar, derginin boyutlarını dikkate alarak, çizelgeleri sınırlamalı ve gerekiyorsa metinde kullanılanla oranla 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, fotoğraf ve levhalar)

- 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 verilmesinde, 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 yapılırsa bibliyografik bilgiler dipnotta değil, "Kaynaklar Dizini"nde verilmelidir.

YAZILARIN GÖNDERİLMESİ

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nin "Yayın Amaçları ve Kuralları, Yayına Kabul İlkeleri"nde belirtilen ilkelere uygun olarak elektronik ortamda hazırlanmış yazılar, e-posta ile gönderilmelidir.

E-posta adresi: topal@metu.edu.tr

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ EDITÖRLÜĞÜ TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası

Hatay Sokak No: 21 Kocatepe/Ankara

Tel : (312) 432 30 85 / (312) 434 36 01

Faks : (312) 434 23 88

E-posta : topal@metu.edu.tr

AYRI BASKILAR

Dergide yayımlanması kabul edilen yazıların ayrı baskısından on adet yazarına veya birden fazla yazarlı yazılarda yayım için başvuruyu yapan yazara olanaklar çerçevesinde ücretsiz olarak gönderilir. Ondan fazla ayrı baskı talebinde bulunulması halinde, Jeoloji Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ücret, her ayrı baskı için yazarlar tarafından ödenir.

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 1- Araştırma Makalesi / Research Article
Sinem ERİŞİŞ, Atiye TUĞRUL, Murat YILMAZ, Selman ER
Bazaltik Kayaçların Mineralojik ve Petrografik Özelliklerinin Akustik Emisyon Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması
Investigation of the Effects of Mineralogic and Petrographical Characteristics of Basaltic Rocks on Acoustic Emission
- 23- Araştırma Makalesi / Research Article
Işık YILMAZ
Şişen Killerin İyileştirilmesinde Jips Kolonu Performansının Araştırılmasına İlişkin Laboratuvar Model Çalışması
A Laboratory Model Study Related with the Determination of Gypsum Column Performance in Treatment of Expansive Soils
- 39- Araştırma Makalesi / Research Article
Müge K. AKIN
Düzce Kent Merkezi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi
Evaluation of Liquefaction Potential of Soils in Düzce City Center
- 57- Araştırma Makalesi / Research Article
Saffet Deniz KARAGÖZ, Mehmet Yalçın KOCA
Determination of Engineering Geological Conditions of A Plant-Site: A Case Study in An Open Pit Mine in Çine, Aydın
Bir Tesis Alanının Mühendislik Jeolojisi Koşullarının Belirlenmesi: Örnek Çalışma, Çine, Aydın'da Yer Alan Bir Açık Ocak Feldspat Maden Sahası
- 99- Derleme / Review Paper
Nurkan KARAHANOĞLU
Jeotermal Rezervuarlarla İlgili Sayısal Modelleme/Benzeşim Çalışmaları
Numerical Modeling/Simulation Studies of the Geothermal Reservoirs
- 131- Derleme / Review Paper
Zübeyde HATİPOĞLU-BAĞCI, Louis H. MOTZ
Methods for Investigation of Natural Attenuation and Modeling of Petroleum Hydrocarbon Contamination in Coastal Aquifers
Kıyı Akiferlerinde Petrol Hidrokarbon Kirliliğinin Doğal Gideriminin Araştırılması ve Modellenmesi Yöntemleri

EDİTÖR / EDITOR

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

Müge AKIN
Abdullah Gül Üniversitesi
Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü
Sümer Kampüsü 38080
Kocasinan /KAYSERİ
E-posta : mugeakink@gmail.com

Makale Gönderim Adresi:

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenişehir, 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 : Temmuz 2019
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

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

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

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

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

Hüseyin ALAN	Başkan / President
Yüksel METİN	İkinci Başkan / Vice President
Faruk İLGÜN	Yazman / Secretary
D. Malik BAKIR	Sayman / Treasurer
M. Emre KIBRIS	Mesleki Uygulamalar Üyesi / Member of Professional Activities
Gonca ŞAHİN	Sosyal İlişkiler Üyesi / Member of Social Affairs
Buket YARARBAŞ ECEMİŞ	Yayın Üyesi / Member of Publication

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.

