

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 42

Sayı - Number 1

ISSN 1016 - 9172

Haziran / June 2018



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
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Kayseri

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

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:8/7/7 İskitler/Ankara
Tel : (0312) 384 54 88
Baskı Tarihi : Temmuz 2018
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 TÜZER (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.

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

-
- 1- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Arzu FIRAT ERSOY, Duygu KARAGÜLLÜ
Sögütlü Deresi (Trabzon) Su Kalitesi Parametrelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi
Evaluation of Water Quality Parameters of Sögütlü River (Trabzon) Using Geographical Information System
- 17- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Ali ELMAS
Kıbrıs Adası Yapısal Süreksizliklerinin EGM08 Gravite Verileri Kullanılarak Belirlenmesi
Determination of Structural Discontinuities in Cyprus Island by Using EGM08 Gravity Data
- 33- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Mehmet ÖZÇELİK
Kabataş-Mecidiyeköy Metro (İstanbul) Tünellerinde Zor Zemin Koşullarının Tünel Kazısına Etkisi
Effect of Difficult Ground Conditions on Tunnel Excavations in Kabataş-Mecidiyeköy Metro (Istanbul) Tunnel
- 49- **Araştırma Makalesi / Research Article**
Feyat TAZ, Ömer ÜNDÜL, Hasan DENEK
Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin Yapım Aşamalarında Karşılaşılan Sorunların Değerlendirilmesi
Evaluation of Problems Encountered During the Construction of the Çamlıca Hill Access Tunnels
- 77- **Derleme / Review Paper**
Nurkan KARAHANÖĞLU
Yeraltısuyu Çekimi Sonucu Oluşan Yüzey Çökmesi Problemi; Bilimsel Araştırmaların Tarihsel Gelişimi
Surface Subsidence Problem Due to Groundwater Withdrawal; A Historical Review
- 107- **Derleme / Review Paper**
Serhan HANER, Murat DEMİR
Nefelinli Siyenit: Bir Gözden Geçirme
Nepheline Syenite: A Review



Araştırma Makalesi / Research Article

Söğütlü Deresi (Trabzon) Su Kalitesi Parametrelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi

*Evaluation of Water Quality Parameters of Söğütlü River (Trabzon) Using Geographical
Information System*

Arzu FIRAT ERSOY , Duygu KARAGÜLLÜ 

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, TRABZON

Geliş (Received): 12 Eylül (September) 2017, Düzeltme (Revised): 04 Ekim (October) 2017, Kabul (Accepted): 14 Aralık (December) 2017

ÖZ

Tüm canlıların yaşam kaynağı olan ve içme, kullanma, enerji ve birçok amaç için kullanılan suya olan gereksinim her geçen gün artmaktadır. Su kaynaklarının plansız kullanımı günümüzdeki en önemli problemlerden biridir. Aşırı kullanım nedeniyle su kaynakları çevresel faktörlerden olumsuz etkilenmekte ve kirlenmektedir. Bu çerçevede su kaynaklarının yönetimi havza bazında sadece su miktarı yönünden değil, kalitesi açısından da önemlidir. Bu çalışmada, Trabzon ili Söğütlü Deresi ve yan kollarında 17 farklı noktadan alınan su örneklerinin hidrokimyasal özellikleri belirlenmiş, konumsal analiz teknikleri kullanılarak havza su kalitesi parametreleri açısından sınıflandırılmıştır. Söğütlü Deresi'nde çözülmüş oksijen (DO) değerleri 2.76-11.24 mg/l arasında; sertlik değerleri (FS) 5.1-21.8 FS arasında değişme göstermektedir. Yüzeysel suyun pH değeri 6.63-7.5 arasında; elektriksel iletkenlik (EC) değeri 61-258 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında ve toplam çözülmüş katı madde miktarı (TDS) 58-223 mg/l arasında değişmektedir. Söğütlü Deresi yüzeysel suyu "Kıta İçi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıflarına göre Fe, Mn ve Al açısından II., III. ve IV. Sınıf sular sınıfında yer almaktadır. Kirlilik parametreleri NO_2 ve NO_3 açısından da yine II., III. ve IV. Sınıf sular sınıfındadır. Söğütlü Deresi yüzeysel suyunun fiziksel, kimyasal ve kirlilik analizleri, yüzeysel suyunun son yıllarda özellikle çevre şartlarından olumsuz etkilenerek kirlendiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Su kalitesi, fiziksel ve kimyasal parametreler, IDW, Söğütlü Deresi, Trabzon

ABSTRACT

The need for drinking, use, energy and water for many purposes is increasing day by day as a source of life for all living things. Unplanned use of water resources is one of the most important problems today. Due to overuse, water resources are adversely affected and polluted by environmental factors. The management of water resources in this framework is important not only in terms of water quantity but also in terms of its quality. In this study, hydrochemical properties of water samples taken from 17 different points in Trabzon city Söğütlü River and its branches were determined and the basin was classified in terms of different water quality parameters by using spatial analysis techniques. Dissolved oxygen (DO) values at Söğütlü Stream ranged from 2.76 to 11.24 mg/l; Hardness values (FS) vary between 50.75-218.48 mg/l. pH value in surface water is between 6.63 and 7.5; the electrical conductivity (EC) value is between 61-258 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the total dissolved solids (TDS) is between 58-223 mg/l. Surface water of Söğütlü Stream classified as Fe, Mn and Al is in II., III. and IV category according to "Classifications of Inland Surface Water Resources". In terms of NO_2 and NO_3 pollution parameters, also water

class is in II., III. and IV. category. Physical, chemical and pollution analyses made on the surface water of Söğütlü River show that surface water has been polluted in recent years due to unfavorable environmental conditions.

Keywords: *Water quality, physical and chemical parameters, IDW, Söğütlü River, Trabzon*

GİRİŞ

Yaşam için vazgeçilmez olan su kaynakları açısından ülkemiz bilinenin aksine su sıkıntısı çeken ülkeler arasına girmek üzeredir. Bunun nedeni, küresel ısınma, aşırı ve bilinçsiz tüketim, alt yapı eksiklikleri ve su miktarındaki kayıplardır. Artan nüfusla birlikte kişi başına düşen su miktarı her geçen gün azalmaktadır ve bu sebeple yeraltı sularının yanı sıra yerüstü sularının kullanımı da artış göstermekte, yerüstü suları için kalite problemlerini değerlendirme ve geleceğe dönük çözümler üretme konusu önem kazanmaktadır.

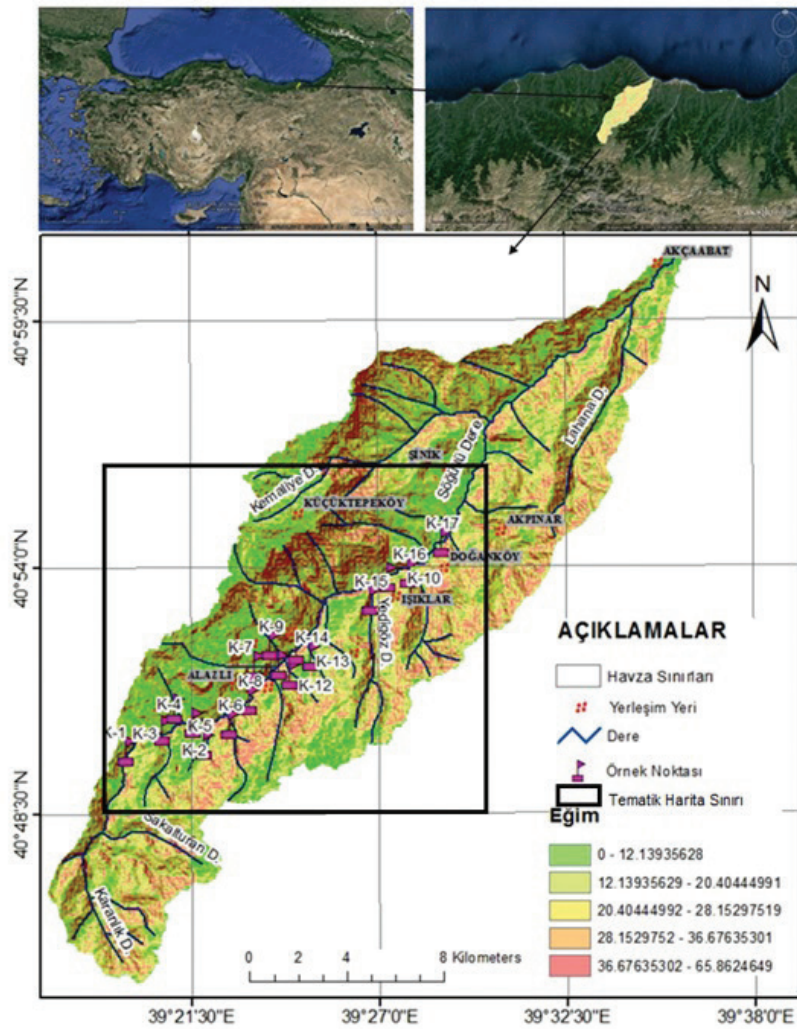
Celep (2009), “Trabzon İli Yeraltı ve Yerüstü Sularının Hidrojeolojik, Hidrokimyasal İncelenmesi ve Su Kalitesinin İncelenmesi” isimli çalışmada Trabzon ilinin yeraltı ve yerüstü sularını inceleyerek suların kimyasal açıdan karbonatlı ve sülfatlı sular sınıfında olduklarını belirlemiştir. Çalışma sonucunda, yüzey sularının “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’ne” göre Cu, Pb, Ni, Al ve Mn açısından II., III. ve IV. Sınıf sular sınıfında olduğu belirlenmiştir.

Gültekin vd. (2013), “Quality Assessment of Surface and Groundwater in Solaklı Basin (Trabzon, Turkey)” isimli çalışmada Solaklı Havzasında 33 örnekleme noktasında yeraltı ve yüzey suyu çalışmaları yapmışlardır. Çalışma sonucunda hem iz element değerlerinin hem de kirlilik parametrelerinin nüfus merkezlerinde yoğunlaştığını belirleyerek gerekli tedbirlerin alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Ülkemizin birçok bölgesinde akarsular, kanalizasyon atıkları da dahil olmak üzere, organik maddeler tarafından aşırı derecede

kirletilmektedir. Sanayi kentlerinde de yine akarsular, organik ve inorganik maddeler ile kirlenmektedir. Bu nedenle, yüzey sularının kalitesi çoğunlukla düşüktür. Yüzey sularının kalitesinin tanımlanması, “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’nin” Kıta İçi Yüzeysel Sularının Sınıflandırılması ile yapılmaktadır. İçme sularının kalitesi ise “TSE 266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Standardı” ile tanımlanmaktadır. Kıta içi yüzeysel suların kalitelerine göre yapılan sınıflamalara göre; I. Sınıf: Yüksek kaliteli su; II. Sınıf: Az kirlenmiş su; III. Sınıf: Kirliliği yüksek su; IV. Sınıf: Çok kirlenmiş su olarak tanımlanmaktadır. Su kalitesini tanımlayan parametreler ve bunlara ait sınır değerleri I., II., III. ve IV. Sınıf için ayrı ayrı verilmiştir.

Bu çalışma ile ülkemizdeki su yönetiminin kurumsal yapısı dikkate alınmış 273 km² alana sahip olan Söğütlü Havzası (Trabzon) yüzey suyu kalitesi problemleri ortaya konularak önerilerde bulunulmuştur (Şekil 1). Söğütlü Havzası yüzey suyu kalitesini belirlemek amacı ile, Söğütlü Deresi yüzey suyunda fiziksel parametreler, anyon-kasyonlar, iz element ve kirlilik parametreleri analizleri yaptırılarak elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu değerlendirmeler hem “TSE 266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Sınıflaması” (TSE 266, 2014) ile hem de “Kıta içi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıfları” (Resmi Gazete, 2009) ile karşılaştırılmıştır. Ölçüm yapılan her nokta için temel hidrojeolojik bilgiler içeren bir veri bankası oluşturulmuştur. Oluşturulan bu veri bankasında sular kalite açısından sınıflandırılmış, içilebilir ve kullanılabilir özellikleri araştırılmıştır. Oluşturulan tematik haritalar, su sınıflama kriterleri ile değerlendirilip yorumlanmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

Figure 1. The location map of the study area.

MATERYAL VE METOT

Saha çalışmalarında, Söğütli Deresinde yağışlı dönemde 17 örnek noktasında ana anyonkasyon, kirlilik ve iz element analizleri için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar havzada kaynağa yakın mesafeden başlanarak yüzey suyu boyunca ana ve yan kollardan alınan örneklerle yapılmıştır (Şekil 1). Örnekleme işleminde SKKY Numune Alma ve Analiz

Metotları Tebliği (2009)'nde önerilen yöntemler uygulanmıştır. Örnek alınırken majör anyonkasyon, iz element ve kirlilik analizleri için 100 ml'lik polietilen şişeler kullanılmıştır. Numune almadan önce, numune alınacak su ile şişeler en az üç defa çalkalanarak kullanılmışlardır. Ölçüm yapılan her noktadan 2 ayrı örnek alınmış ve bu örneklerden birine metallerin çökmesini engellemek ve sağlıklı metal analizi sonuçları için 1 ml nitrik asit eklenmiştir.

Örnekleme yapılan noktalarda sıcaklık (T), pH, elektriksel iletkenlik (Eİ), çözülmüş oksijen (DO), toplam çözülmüş madde miktarı (TDS), bulanıklık ve tuzluluk parametreleri YSI marka cihaz kullanılarak yerinde ölçülmüştür. Alınan örneklerin koordinatlarının belirlenmesinde Garmen Etrex Legend Cx marka el GPS' i kullanılmıştır.

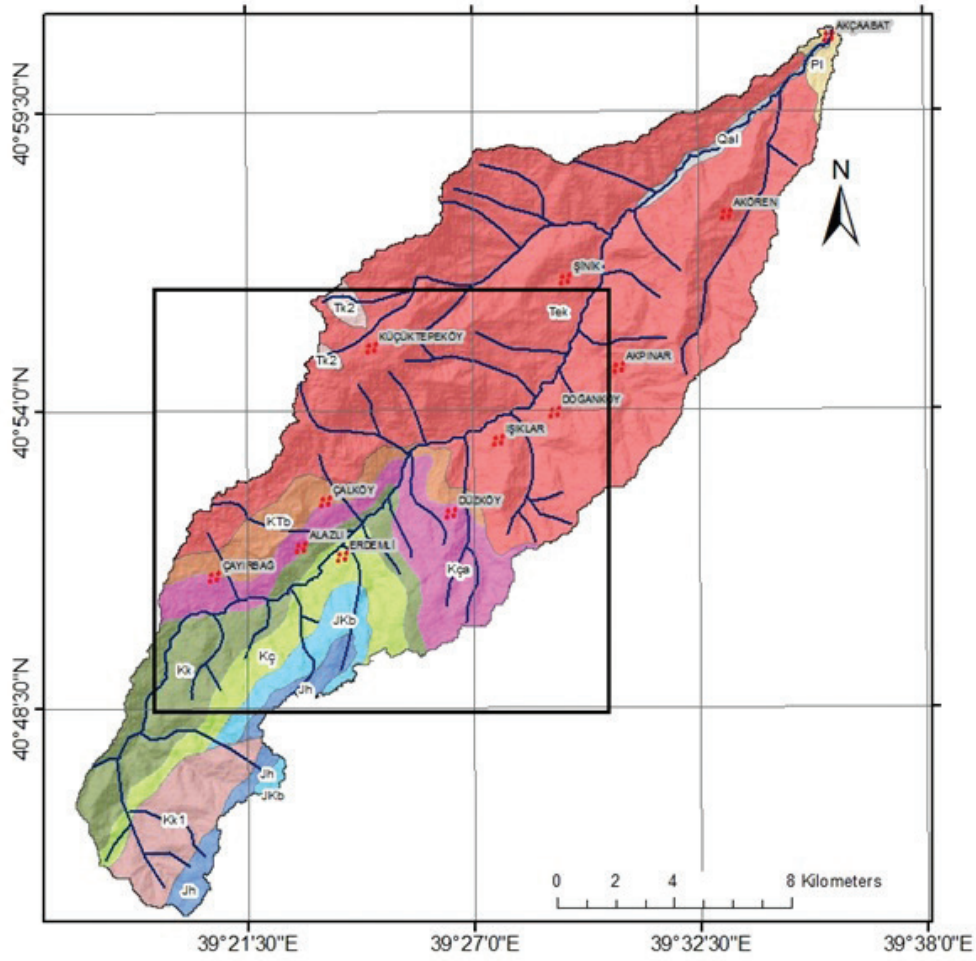
Laboratuvar çalışmalarında yüzey sularından alınan 1 ml nitrik asit eklenmiş olan 100 ml'lik su örneklerinin iz element (Fe, Mn, Al, Cu, Pb, Ni, Co, Cd, As, Cr, F⁻) analizleri yapılmıştır. Ana kation (Ca, Mg, Na) analizleri nitrik asitsiz olan 100 ml su örnekleriyle ICP-OES yöntemi ile yapılmıştır. Ana anyonlar (SO₄²⁻, Cl⁻) ve kirlilik (NO₂⁻, NO₃⁻) analizleri ise nitrik asitsiz olan 100 ml su örneklerine Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

ÇALIŞMA ALANI VE ÇEVRESİNİN JEOLojİSİ

Türkiye'nin tektonik ve jeolojik birlikteliklerinden biri olan Doğu Pontidler, yapısal ve litolojik özellikler göz önünde bulundurularak Kuzey ve Güney Zon olarak tanımlanan iki ayrı bölgeye ayrılmıştır (Ketin, 1966). Kuzey Zon, Üst Kretase ve Orta Miyosen volkanik ve piroklastik kayalarla karakteristik iken; Güney Zon ise Üst Kretase öncesi tortul birimler ile karakteristiktir.

Doğu Pontid, Kuzey Zon içerisinde yer alan inceleme alanında, en altta yer alan Geç Jura- Erken Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Berdiga formasyonunun altında izlenen volkano-tortul karakterli birim Hamurkesen formasyonu olarak adlandırılmıştır. Berdiga formasyonu gri, bej renkli, orta-kalın tabakalı ve yer yer masif karbonatlardan meydana gelmiştir (Korkmaz, 1993). Çatak formasyonu, inceleme alanında Berdiga formasyonu üzerine uyumlu

olarak gelen bazik karakterli volkano-tortul birimdir. Formasyon başlıca bazalt, andezit ve piroklastlar ile kumtaşı, silttaşı, marn, şeyl ve kırmızı-bordo renkli killi kireçtaşı düzeylerinin aralanmasından oluşur. Çatak formasyonunu üstelleyen asidik karakterli kayaç ve piroklastlar Kızılkaya formasyonu olarak adlandırılmıştır (Güven, 1993). Kızılkaya formasyonu, çoğunlukla riyodasitik, dasit ve piroklastlardan oluşur. Çağlayan formasyonu ikinci evreli bazik karakterli volkanit, volkanoklastik ve çökel kaya aralanmasından oluşan volkano-tortul birimdir. Çağlayan formasyonu'nun egemen kaya türünü oluşturan bazalt, andezit ve piroklastlarının arasında kumtaşı, marn ve kırmızı-bordo renkli killi kireçtaşı ara seviyeleri bulunur. İnceleme alanında türbiditik fasiyes çökellerinden oluşan birim, Bakırköy formasyonu, genel olarak killi, kumlu kireçtaşı, marn, şeyl ve az oranda kumtaşı aralanmasından oluşmuştur (Güven, 1998). Genellikle kırıntılı çökellerle başlayıp üst zonlara doğru volkanik karakterli istif ilk olarak Güven (1993) tarafından Kabaköy formasyonu olarak tanımlanmıştır. İnceleme alanında yüzeylenen Kaçkar granitoyiti I (Kk1) ve Kaçkar granitoyidi II (Tk2) intrüzifleri; Eosen yaşlı Çağlayan formasyonu içinde izlenir. Genellikle gri, yeşilimsi gri, yer yer pembemsi renkte, çok kırıklı çatlaklı olan granitoyitler taneli veya porfirik dokuludur. Beşirli formasyonu, kaba taneli kırıntılı çökellerle başlayıp üst zonlara doğru tüflerle temsil edilmektedir. Çakıltası, kumtaşı ve tüflerden oluşan birim, Beşirli formasyonu, Kabaköy formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, inceleme alanının havza sınırları içerisinde iç kesimlerinden doğan ve Karadeniz'e dökülen Söğütlü Deresi'nin denize yakın kesimlerindeki düzlük alanlarda çökelen kil, silt, kum, çakıl ve blok yığınlarından oluşan güncel oluşuklardır. İnceleme alanına ait jeoloji haritası Şekil 2'de verilmiştir.



AÇIKLAMALAR

□ Havza Sınırları 〰 Dere :: Yerleşim Yeri

Litoloji

□ Kuvaterner, Alüvyon, Qal	□ Geç Kretase, Çağlayan Formasyonu, Kça
□ Pliyosen, Beşirli Formasyonu, Pl	□ Geç Kretase, Kızılkaya Formasyonu, Kk
□ Tersiyer, Kaçkar Granitoyidi-II, Tk2	□ Geç Kretase, Çatak Formasyonu, Kç
□ Eosen, Kabaköy Formasyonu, Tek	□ Malm-Alt Kretase, Berdiga Formasyonu, JKb
□ Tersiyer, Kaçkar Granitoyidi-I, Kk1	□ Liyas-Dogger, Hamurkesen Formasyonu, Jh
□ Geç Kretase-Paleosen, Bakırköy Formasyonu, KTb	□ Tematik Harita Sınırı

Şekil 2. Çalışma alanına ait jeoloji haritası (Güven, 1993, 1998).

Figure 2. The geological map of the study area (Güven, 1993, 1998).

BULGULAR**Su Kimyası**

Söğütlü Deresi'nde 17 adet örnekleme noktasında yapılan yüzey suyu analiz sonuçları Çizelge 1, Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir. Su örneklerinin pH değerinin 6.63 ile 7.5 arasında, DO değerinin ise 2.76 ile 11.24 mg/l arasında değiştiği belirlenmiştir. Kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre su örnekleri DO açısından I. Sınıf ile IV. Sınıf arasında değişmektedir. Tüm örnekler elektriksel iletkenlik açısından değerlendirildiğinde I. Sınıf, TDS açısından ise tatlı su sınıfındadır.

Majör anyon ve kation sonuçlarına göre tüm su örneklerinin TSE 266 Türk İçme Suyu Standardında tanımlanan sınır değerlerin altında bulunduğu ve kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre I. Sınıf sular sınıfında olduğu görülmektedir (Çizelge 1).

Kimyasal analiz sonuçları iz elementler açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde Fe değerlerinin K1 ve K5 örnekleri dışındaki tüm noktalarda TSE 266'da tanımlanan sınır değerlerin üzerinde bulunduğu görülmektedir. Kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre ise I. Sınıf ile IV. Sınıf sular arasında değişmektedir (Çizelge 2).

Çizelge 1. Söğütlü Deresi yüzey sularında bulunan fiziksel parametreler, majör anyon ve kation değerleri (mg/L).

Table 1. Physical parameters, major anion and cation values (mg/L) in the Söğütlü River surface water.

Örnek No	T(°C)	pH	DO	Eİ (µS/cm)	TDS	Sertlik (FS)	Ca	Mg	Na	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
K-1	8	7.5	11.24	61	58	5.1	15.4	2.99	2.39	6.22	2.263	48.8
K-2	15.20	7.1	10.71	258	223	18.5	61.9	7.64	7.06	30.61	5.49	179.34
K-3	15	7.36	9.7	250	217	21.8	71.1	9.96	5.76	4.96	1.62	248.88
K-4	12.45	6.98	11.05	105	95	8.9	28.5	4.5	3.52	11.19	2.75	88.45
K-5	16.52	7.17	9.41	136	114	11.8	37.9	5.88	1.82	7.48	1.52	126.27
K-6	16.44	7.41	8.26	99	82	8.5	25.5	5.28	2.06	0.9	1	93.94
K-7	10.43	6.89	8.53	185	78	13.4	46.8	4.33	3.36	0.87	1	159.82
K-8	10.98	6.82	<u>5.36</u>	85	162	14.2	49.4	4.59	3.71	0.7	0	172.02
K-9	13.22	7.25	<u>4.57</u>	152	130	13.8	46.7	5.29	4.57	0	0	167.75
K-10	20.05	7.08	<u>4.31</u>	141	116	12.8	40.8	6.39	2.52	9	2.28	131.15
K-11	10.67	6.63	<u>3.68</u>	119	107	11.3	38.5	4.38	2.98	5.84	1.66	125.66
K-12	11.82	6.74	<u>3.64</u>	115	102	12.1	38.4	6.04	3.45	12.16	2.6	122
K-13	12.03	7.02	<u>3.74</u>	125	109	13.6	43.3	6.89	3.61	12.38	2.62	139.08
K-14	10.92	7	<u>3.72</u>	76	61	14.6	45.9	7.65	3.65	10.54	2.67	150.67
K-15	9.5	6.72	<u>3.52</u>	109	94	12.3	39.2	6.21	1.88	6.82	1.77	128.71
K-16	15.60	6.75	<u>3.9</u>	100	100	11.4	37.7	4.89	2.97	4.7	1.52	126.88
K-17	15.04	6.67	<u>2.76</u>	143	119	13.4	65.5	9.67	4.9	12.78	2.93	216.55
TS266		6.5-9.5	5	2500					200	250		

Çizelge 2. Söğütlü Deresi yüzey sularında bulunan iz elementler (değerler mg/L).

Table 2. Trace elements in the Söğütlü River surface water (values are mg/L).

Örnek No	Fe	Al	Cu	Pb	Co	Mn	Ni	Cd	As	Cr	F ⁻
K-1	0.165	<u>0.343</u>	0.006	0.003	0	0.024	0.001	0	0.001	0.003	0.125
K-2	<u>1.69</u>	<u>1.29</u>	0.001	<u>0.011</u>	0.003	<u>0.157</u>	0.005	0	0.008	0.001	0.13
K-3	<u>2.73</u>	<u>1.49</u>	0	<u>0.012</u>	0.003	<u>0.178</u>	0.010	0	0.008	0.001	0.07
K-4	<u>1.11</u>	<u>0.967</u>	0.004	<u>0.012</u>	0.002	<u>0.105</u>	0.003	0	0.002	0.002	0.16
K-5	0.074	<u>0.210</u>	0.005	0.008	0	0.026	0.001	0	0.003	0.003	0.09
K-6	<u>0.261</u>	<u>0.437</u>	0.006	0.007	0.001	0.041	0.001	0	0.003	0.002	0
K-7	<u>0.429</u>	<u>0.450</u>	0.004	0.009	0.001	0.045	0.001	0	0.004	0.001	0
K-8	<u>0.45</u>	<u>0.494</u>	0.005	0.005	0	0.046	0.001	0	0.003	0.003	0
K-9	<u>1.93</u>	<u>1.86</u>	0.002	<u>0.012</u>	0.003	<u>0.170</u>	0.006	0	0.004	0.002	0
K-10	<u>0.861</u>	<u>1.16</u>	0.005	0.003	0.001	<u>0.079</u>	0.003	0	0.006	0.001	0.14
K-11	<u>3.52</u>	<u>2.37</u>	0.003	0.005	0.003	<u>0.203</u>	0.005	0	0.004	0.001	0.09
K-12	<u>3.42</u>	<u>2.84</u>	0	<u>0.015</u>	0.005	<u>0.458</u>	0.009	0	0.002	0.001	0.11
K-13	<u>4.55</u>	<u>3.66</u>	0.002	<u>0.016</u>	0.006	<u>0.569</u>	0.010	0	0.006	0	0.13
K-14	<u>3.44</u>	<u>2.79</u>	0.001	0.007	0.004	<u>0.256</u>	0.006	0	0.004	0	0.17
K-15	<u>1.51</u>	<u>1.99</u>	0.003	<u>0.013</u>	0.001	<u>0.137</u>	0.003	0.001	0.001	0.001	0.12
K-16	<u>1.58</u>	<u>1.85</u>	0.004	0.006	0.002	<u>0.107</u>	0.003	0	0.004	0.002	0.09
K-17	<u>7.12</u>	<u>6.02</u>	0.009	0.016	0.008	<u>0.604</u>	0.017	0	0.006	0.001	0.12
TS266	0.2	0.2	2	0.01		0.05	0.02	0.005	0.01	0.05	1.5

Mn için TSE 266'da tanımlanan sınır değer 0.05 mg/l dir. Çizelge 2 incelendiğinde Mn değerlerinin 0.024 ile 0.604 arasında değiştiği ve K 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 nolu su örneklerinde Mn değerinin sınır değeri aştığı belirlenmiştir. Kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre ise su örnekleri I. Sınıf sular ile III. Sınıf sular arasında değişmektedir.

Analiz sonuçları Al açısından değerlendirildiğinde, örneklerin tüm noktalarda sınır değer olan 0.2 mg/L'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre I. Sınıf sular ile IV. Sınıf sular arasında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 2 incelendiğinde, Söğütlü Deresi yüzey sularının Pb değerlerinin 0.003 ile 0.016 mg/L arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler açısından kıta içi yüzeysel su kaynakları sınıflamasına göre I. ve II. Sınıf sular sınıfında yer almaktadır. Ayrıca TSE 266'ya göre K 2, 3, 4, 9, 12, 13, 15 nolu örneklerin içme suyuna uygun olmadığı belirlenmiştir. Söğütlü Deresi yüzey sularının iz element analiz sonuçları incelendiğinde Cu, Ni, Co, Cd, As, Cr ve F değerleri açısından kıta içi yüzeysel su kaynakları sınıflamasına göre I. Sınıf sular sınıfında yer aldığı belirlenmiştir (Çizelge 2).

Söğütlü Deresi'nde gerçekleştirilen 17 adet yüzey suyu örnek noktasına ait analiz sonuçları kirlilik parametreleri açısından incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre yüzey sularında NO_2 değerleri 0-0.96 arasında değişmektedir. Bu değerler açısından için TSE 266'ya göre K1, 2, 3, 4, 11, 13, 14, 16 numaralı örneklerin içmeye uygun olmadığı ve kıta içi yüzeysel su kaynaklarının sınıflarına göre I-IV. Sınıf sular sınıfında olduğu belirlenmiştir. Yüzey sularında NO_3 değerleri 0-14.87 arasında değişmekte olup ve bu değerlere göre I ve II. ve III. Sınıf sular sınıfında bulunmaktadır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Söğütlü Deresi yüzey sularında bulunan kirlilik parametreleri.

Table 3. Pollution parameters in the Söğütlü River surface water.

Örnek No	NO_2^-	NO_3^-	Örnek No	NO_2^-	NO_3^-
K-1	<u>0.87</u>	5.21	K-9	0	0
K-2	<u>0.96</u>	14.87	K-10	0	6.36
K-3	<u>0.74</u>	2.83	K-11	<u>0.79</u>	2.77
K-4	<u>0.72</u>	8.15	K-12	0	7.5
K-5	0	3.55	K-13	<u>0.74</u>	7.74
K-6	0	0.85	K-14	<u>0.74</u>	9
K-7	0	0.82	K-15	0	5.01
K-8	0	0.77	K-16	<u>0.83</u>	5.53
			K-17	0	8.37
TS266	0.5	50		0.5	50

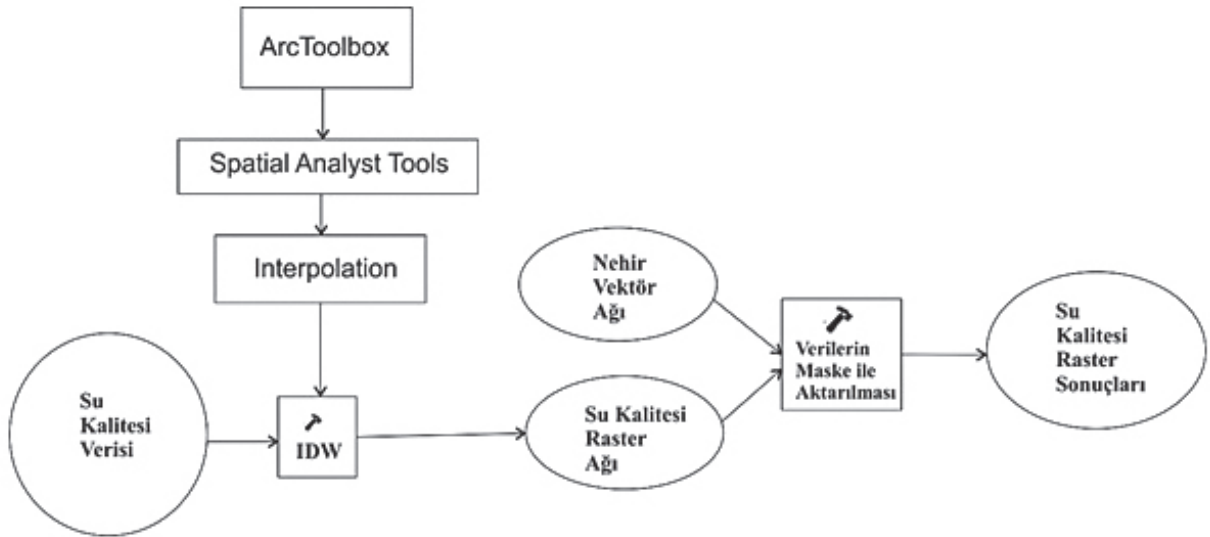
IDW Yöntemi ile Söğütlü Deresi'nde tematik haritaların oluşturulması

Söğütlü Havzası için, ARCGIS yazılımı kullanılarak sayısal yükseklik modeli (SYM),

eğim haritası ve 3 boyutlu arazi modeli (TIN) oluşturulmuştur. Bir havzanın ortalama yüksekliği, sıcaklık ve yağışı etkilemektedir. Sıcaklık, yağış, bitki örtüsü verileri de havza hidrojeolojisini doğrudan etkiler. Havza hidrojeolojisinin tanımlanmasında ARCGIS yazılımına ait ArcHydro modülü kullanılmıştır. ArcHydro modülü kullanılarak havza sınırları ve havzadaki yüzey sularının akış yönü belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında toplanan su kimyası verilerinin ve ölçümü yapılan noktaların koordinatları ve niteliksel özellikleri Excel formatından ArcGIS 10.1 Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımı modülüne aktarımı ile gerçek uzay koordinatlarına sahip noktasal verilerin depolama işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz işlemi sırasında veri tabanında saklanan nokta özellikleri ve su kalitesi değerleri analiz edilmiştir. ArcGIS jeoistatistiksel analiz modülü kullanılarak analiz edilmiş ve jeoistatistiksel veri modelleri oluşturulmuştur. Verinin olmadığı noktalar için yapılan tahminler, IDW (Ters Ağırlıklı Mesafe) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. ArcGIS jeoistatistiksel analiz modülü uygulama akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.

Söğütlü Deresi'nde yapılan 17 adet örnekleme noktasına ait veriler ARCGIS 10 modülü olan IDW (Inverse Distance Weighting) tekniği ile değerlendirilmiş ve tematik haritalar oluşturulmuştur. IDW tekniği enterpole edilecek yüzeyde yakındaki noktaların uzaktaki noktalarda daha fazla ağırlığa sahip olması esasına dayanmaktadır. Bu teknik enterpole edilecek noktadan uzaklaştıkça ağırlığı da azaltan ve örnekleme noktalarının ağırlıklı ortalamasına göre bir yüzey enterpolasyonu yapmaktadır.



Şekil 3. ArcGIS jeoistatistiksel analiz modülü uygulama akış şeması.

Figure 3. Application flowchart of ArcGIS geostatistical analysis module.

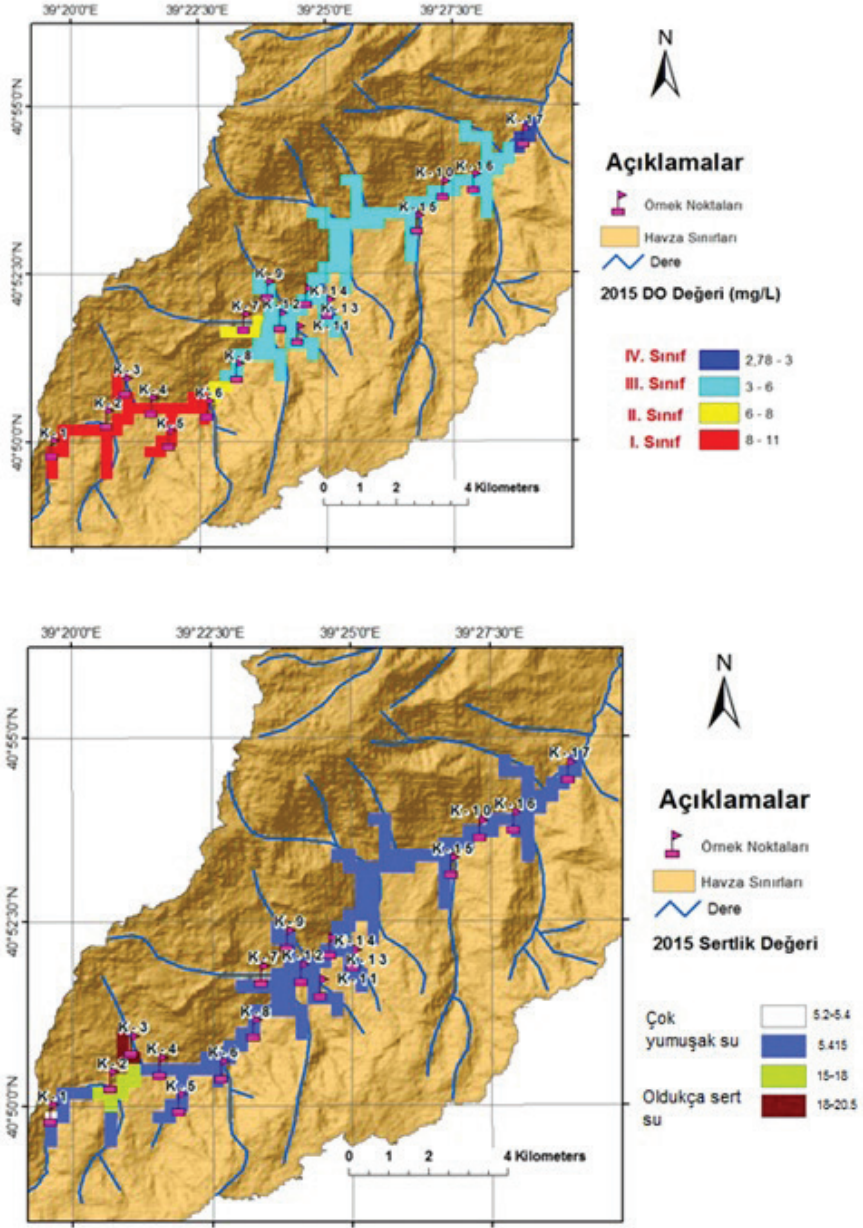
Bu çalışmada, Söğütlü Deresi yüzey suyunda 17 örnekleme noktasında IDW tekniği kullanılarak, her bir hücre için nehir ağını maskeleme işlemi yapılmış ve nehir ağındaki hücreler su kalitesi verilerini yorumlayabilmek için su kalitesi ağına dönüştürülmüştür.

Söğütlü Havzası yüzey suyunda 17 noktadan elde edilen fiziksel parametreler, majör anyon ve kation değerleri ve kirlilik parametreleri için IDW yöntemi ile tematik haritalar hazırlanmıştır.

DO değerleri için hazırlanan tematik haritada, değerlerin Söğütlü Deresi'nde akış yönünde yani güneyden kuzeye doğru arttığı görülmektedir. Sertlik değerleri için hazırlanan haritada, Söğütlü Deresi yüzey suyunun genellikle "çok yumuşak sular" ile "oldukça sert sular" sınıfında olduğu görülmektedir (Şekil 4).

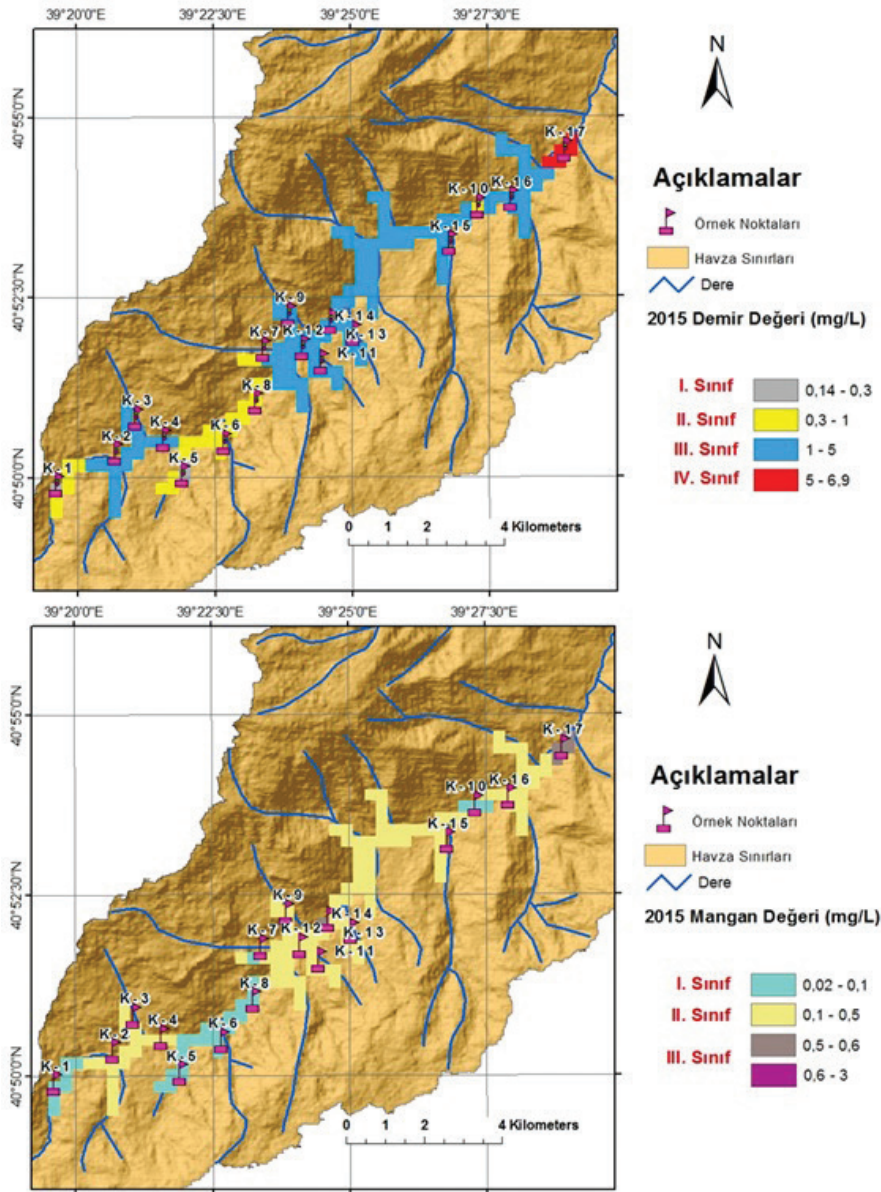
Fe, Mn, Al ve Pb değerlerine göre hazırlanan tematik haritalarda, Söğütlü Deresi'nde akış boyunca güneyden kuzeye doğru değerlerde artış gözlenmektedir. Kıta içi yüzeysel su kaynaklarına göre değerlendirildiğinde, yukarıda adı geçen değerler açısından akarsuda kirlenme söz konusudur. Söğütlü yüzey suyunda güneyden kuzeye doğru su kalitesinde azalma gözlenmiştir (Şekil 5 ve 6).

Kirlilik parametreleri için hazırlanan haritalarda NO₂ değerleri açısından neredeyse tüm ölçüm noktalarında IV. Sınıf sular sınıfında olduğu yani yüzey suyunda kirlilik oluşturduğu belirlenmiştir. NO₃ değerleri incelendiğinde ise Söğütlü Deresi yüzey suyunun kuzey kesimlerinde değerlerin yükseldiği, II. ve III. Sınıf sular şeklinde bulunduğu görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 4. Söğütlü Havzası'nda DO ve sertlik değerleri için hazırlanan tematik harita.

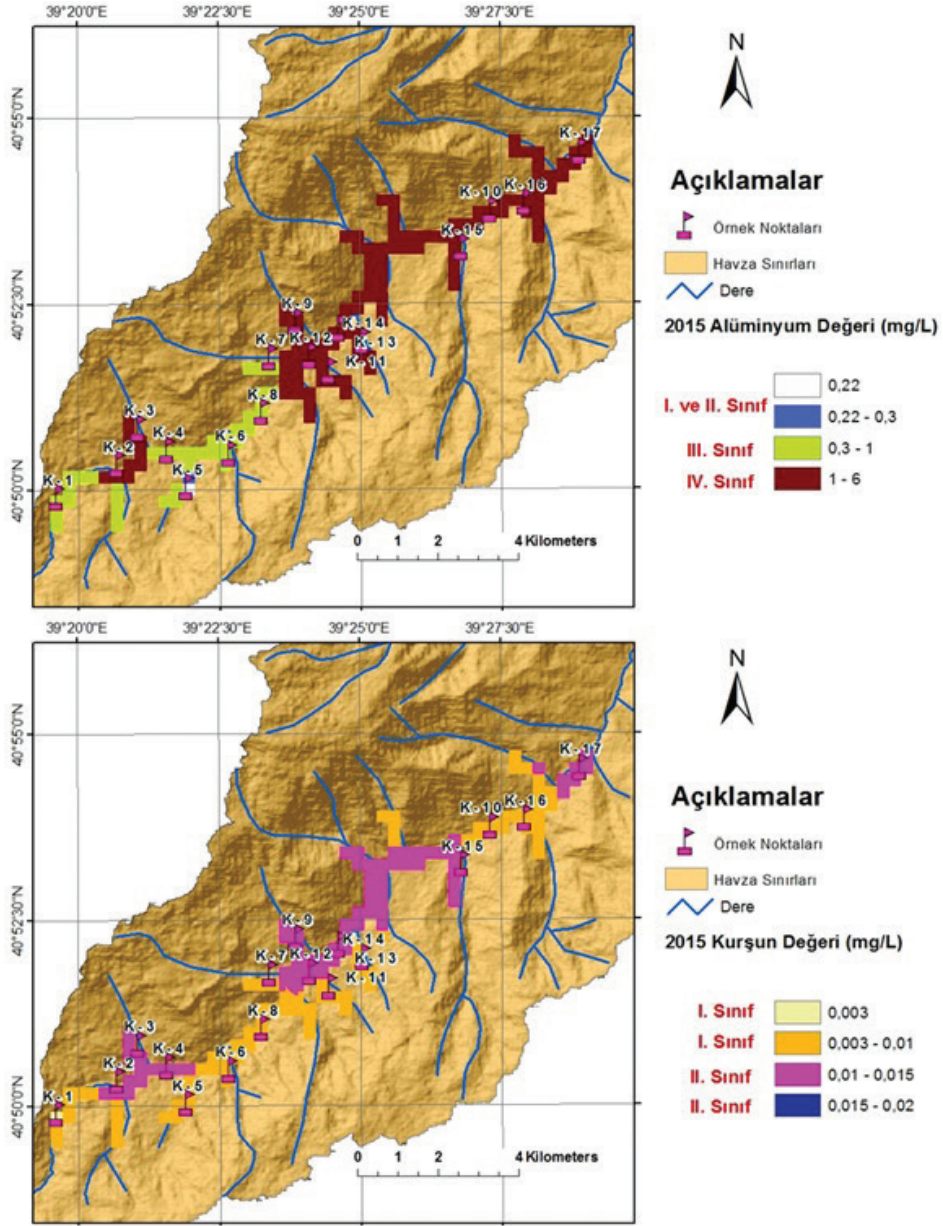
Figure 4. Thematic map prepared for DO and hardness values in the Söğütlü Basin.



Şekil 5. Söğütlü Havzası'nda Fe, Mn değerleri için hazırlanan tematik harita.

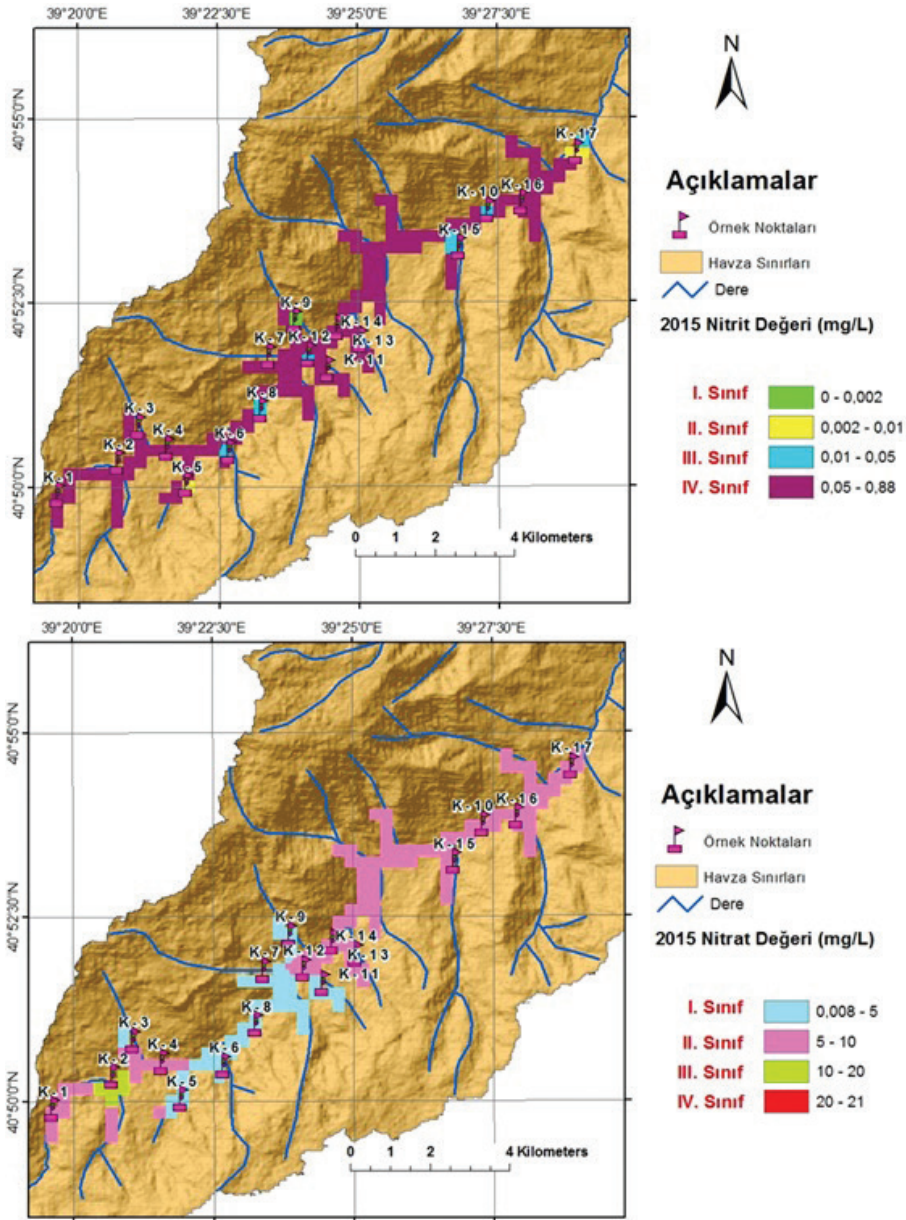
Figure 5. Thematic map prepared for Fe, Mn values in the Söğütlü Basin.

Fırat Ersoy, Karagüllü



Şekil 6. Söğütlü Havzası'nda Al ve Pb değerleri için hazırlanan tematik harita.

Figure 6. Thematic map prepared for Al ve Pb values in the Söğütlü Basin.



Şekil 7. Söğütlü Havzası'nda NO_2 ve NO_3 değerleri için hazırlanan tematik harita.

Figure 7. Thematic map prepared for NO_2 ve NO_3 values in the Söğütlü Basin.

SONUÇLAR

Suların fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak kirlenmesi nedeni ile suların kalitesinde değişiklikler meydana gelmektedir (Kara ve Çömlekçioğlu, 2004). Bu çalışmada Trabzon ili Söğütlü Deresi'nde akış istikametinde güneyden kuzeye doğru 17 örnekleme noktasında fiziksel, kimyasal ve kirlilik parametreleri analiz edilerek yüzey suyunda su kalitesi belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonuçları hem TS266 İnsani Tüketim Amaçlı Sular Sınıflaması ile hem de Kıta İçi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıflarına göre değerlendirilmiştir.

Fiziksel parametreler açısından irdelendiğinde pH değerlerine göre Söğütlü Deresi yüzey suyu tüm örnekleme noktalarında I. Sınıf sular sınıfındadır. DO değerleri açısından derenin kuzeye yakın kesimlerinde II., III. ve IV. Sınıfta yer almaktadır. Sertlik değeri yüzey suyunda 5.1-21.8 FS arasında değişmekte ve bu değerlere göre su örnekleri “çok yumuşak sular” ile “oldukça sert sular” sınıfları arasında bulunmaktadır. Yüzey sularında gözlenen yüksek sertliğinin nedeni havzada yer alan kumlu kireçtaşı, kireçtaşı ve marnlarda bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının çözünme yolu ile suya geçmesidir.

Fe, Mn, Al ve Pb değerleri, Söğütlü Deresi'nde akış yönünde güneyden kuzeye doğru artış göstermektedir. Buna göre, su örnekleri iz element değerleri açısından II., III. ve IV. Sınıf'ta yer almaktadır. NO_2 değerlerine göre yüzey suları çoğunlukla IV. Sınıf sular sınıfındadır.

Yüzey sularının kalitesini, suda çözünmüş bileşenler belirlemektedir. Ayrıca suyun kalitesi insan faaliyetlerinden de etkilenmektedir. Söğütlü Deresi yüzey suyunda yukarıda adı geçen parametrelerin “Kıta İçi Yüzeysel Su Kaynaklarının Sınıfları”nda tanımlanan sınır değerleri aştığı görülmektedir. Bunun başlıca

nedeni çevresel etkilerdir. Bölgede eğimin yüksek olması ve çok yağış alması çözünmüş madde konsantrasyonunu artırmaktadır. Doğu Karadeniz Bölümü'nde son yıllarda, akarsularda denize doğru yaklaştıkça nitrit, nitrat, sülfat, fosfat değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir (Gültekin vd. 2013). Söğütlü Havzasında yer alan bazik karakterli volkanik kayalardan yüzey sularına Mg, Na, K, Ca, Cu, Fe, Al, Mn, Pb çözünerek geçmektedir. Ayrıca Doğu Karadeniz Bölümü'nde yer alan kurşun, çinko ve bakır madenleri de yüzey sularında iyon içeriğinin artmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak havzada yerleşim alanlarının sık olması ve atıklarının doğrudan akarsulara deşarj edilmesi de suda organik kirlenmeyi artırmaktadır.

Akarsu havzalarının içme-kullanma suyu olma açısından kalitesini bozan parametrelerin belirlenmesi, bu konuda gerekli önlemlerin alınması ve korunması, akarsuların ileriki yıllarda alternatif kaynak olarak kullanılabilmesi açısından son derece önemlidir. Bu nedenle havzada yüksek eğime sahip yamaçların kontrol altına alınması, tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirildiği bölgelerin atıkları yönünden denetlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, bölgede bulunan yerleşim birimlerinin ve sanayi tesislerinin kanalizasyon atıklarını doğrudan Söğütlü Deresi'ne bırakılması engellenmelidir.

KAYNAKLAR

- Celep, S., 2009. Trabzon İli Yeraltı ve Yerüstü Sularının Hidrojeolojik, Hidrokimyasal İncelenmesi ve Su Kalitesinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Gültekin, F., Fırat Ersoy, A., Hatipoğlu, E. ve Celep, S., 2011. Trabzon İli Akarsularının Yağışlı Dönem Su Kalitesi Parametrelerinin Belirlenmesi. Ekoloji, 21, 82, 77-88.

- Gültekin, F., Fırat Ersoy, A., Hatipoğlu, E. ve Celep, S., 2013. Quality Assessment of Surface and Groundwater in Solaklı Basin (Trabzon, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72, 2, 213-224.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu. MTA Yayınları, Ankara, 65 s.
- Güven, İ., 1998. 1/100000 Ölçekli Açınama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, Trabzon-C28 ve D28 paftaları. Jeoloji Etütleri Dairesi, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara
- Kara, C. ve Çömlekçioğlu, U., 2004. Karaçay (Kahramanmaraş)'ın Kirliliğinin Biyolojik ve Fiziko-Kimyasal Parametrelerle İncelenmesi. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7, 1.
- Ketin, I., 1966. Anadolu'nun Tektonik Birliktelikleri. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 66, 23-34.
- Korkmaz, S., 1993. Tonya-Düzköy (GB Trabzon) Yöresinin Stratigrafisi, KTÜ Jeoloji Müh. Bölümü 3. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 36, 151-158.
- Okay, A.I., Şahintürk, O., 1997. Geology of the eastern Pontides. *Report of Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*, 68, 291– 311.
- Resmî Gazete, 2009. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma ve Analiz Metodları, Çevre ve Orman Bakanlığı, Başbakanlık Basımevi. 27372.
- TSE 266, 2014. İnsanı Amaçlı Tüketim Suları Standartları, Ankara.



Araştırma Makalesi / Research Article

Kıbrıs Adası Yapısal Süreksizliklerinin EGM08 Gravite Verileri Kullanılarak Belirlenmesi

Determination of Structural Discontinuities in Cyprus Island by Using EGM08 Gravity Data

Ali ELMAS 

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, TRABZON

Geliş (Received): 29 Eylül (September) 2017, Düzeltme (Revised): 23 Kasım (November) 2017, Kabul (Accepted): 29 Aralık (December) 2017

ÖZ

Bu çalışmada uydu gravite ve düşey birinci türev verilerine toplam yatay türev ve eğim açısı teknikleri uygulanarak, Kıbrıs Adası'nın yapısal süreksizliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bölgenin yapısal süreksizlikleri belirlenirken, toplam yatay türev haritasının maksimum genlikleri ile eğim açısı haritasının sıfır genlik değerlerinden yararlanılmıştır. Belirlenen çizgisellikler, çalışma alanının bilinen süreksizlikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile önceki çalışmalar arasında iyi bir uyum olmakla birlikte, yeni süreksizlik sınırları tespit edilmiştir. Bunun yanında Kıbrıs adasının temel kaya topoğrafyası, Parker-Oldenburg ters çözüm algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmanın, bölgenin jeolojik yapısının daha iyi anlaşılmasına katkı koyacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Toplam Yatay Türev, Eğim Açısı, Kıbrıs Adası, Birinci Düşey Türev, Yapısal Süreksizlik.

ABSTRACT

In this study, it was aimed to determine the structural discontinuities of the Cyprus Island by applying total horizontal derivative and tilt angle techniques to the vertical first derivative data of satellite gravity data. When determining the structural discontinuities of the zone, the maximum amplitudes of the total horizontal derivative map and the zero amplitude values of the tilt angle map were utilized. The specified lineaments are compared with known discontinuities in the study area. Along with a good harmony between this study and previous studies, new discontinuity boundaries were determined. In addition, the basement topography of the Cyprus Island is calculated by using the Parker-Oldenburg inversion algorithm. It is believed that the study will contribute to a better understanding of the geological structure of the region.

Keywords: Horizontal Gradient Magnitude, Tilt Angle, Cyprus Island, First Vertical Derivative, Structural Discontinuity.

GİRİŞ

Literatürde mevcut gravite çalışmalarında, fay türü yapıları ve çizgisellikleri belirlemek için Toplam Yatay Türev (TYT) ve Eğim Açısı (EA) teknikleri genellikle Bouguer gravite verilerine göre düzenlenmiştir (Nabighian, 1972; Miller ve Singh, 1994; Lyngsie vd., 2006; Cooper ve Cowan, 2006; Altınoğlu vd., 2015). Gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerinin kullanımının faydalarını ilk kez Evjen (1936) belirtmiştir. Alçak geçişli süzgeç kullanılmasıyla elde edilen gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerinin yorumlanmasında, fay türü jeolojik yapıları görüntülemek için EA tekniğinin ilk kullanımı Oruç ve Keskinsezer (2008), Oruç (2010) ve Oruç ve Selim (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise yukarıda bahsedilen teknikler, rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerine uygulanmıştır. Bu sebeple, öncelikle bölgeye ait Bouguer gravite verilerinden rejyonel ve yerel gravite verilerini elde etmek için Butterworth alçak geçişli süzgeç kullanılmıştır. Daha sonra, rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerini hesaplamak için Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) yöntemi (Gunn, 1975) kullanılmıştır. Çalışma alanındaki yeni fay türü yapıları ve çizgisellikleri belirlemek için de Arısoy ve Dikmen (2011) tarafından geliştirilen, TYT ve EA sınır analiz tekniklerini de içeren POTENSOF programı kullanılmıştır. Parker-Oldenburg algoritması, temel kaya geometrisini görüntülemek için son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Oruç vd., 2013). Gomez-Ortiz ve Agarwal (2005) bu algoritmayı Matlab programlama diliyle yazarak yayımlamışlardır.

Ergon (1986), Kıbrıs'ın manyetik haritalarını veri-işlem yöntemleriyle analiz edilerek bölgenin genel yapısı ve bilinen cevher yataklarıyla olan ilişkilerini ele almıştır. Literatürde

birçok araştırmacı Kıbrıs'ın Bouguer gravite anomalisini değişik yöntemlerle yorumlayarak, alana ait temel jeolojik birimleri belirlemeye çalışmışlardır (Moores ve Vine, 1971; Greenbaum, 1972; Bear, 1963; Gass ve Masson-Smith, 1963; Robertson, 1975; Robertson ve Woodcock, 1979). Vine ve Moores (1989) yaptıkları paleomanyetik çalışmalarla Trodos Masifi'nin yapısının, okyanusal tabakalarla ilişkisini ortaya koymuşlardır. Khan vd. (1972) bu masifin 0.5 km kalınlığındaki yüzey tabakası altında iki kırılma yüzeyi saptamış ve ikinci katmanın kalınlığının 1.5 km ile 2.0 km arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Bu çalışmada Kıbrıs Adası'nın rejyonel gravite verilerine birinci düşey türev yöntemi, sınır analiz ve ters çözüm teknikleri uygulanarak, Kıbrıs Adası'nın tektonik yapısı ile temel kaya topoğrafyası modellenmeye çalışılacaktır.

KIBRIS ADASI GENEL JEOLJİSİ

Kıbrıs'ta ilk jeolojik çalışma Gaudry (1862) tarafından yapılmıştır. Kıbrıs Adası; Beşparmak Dağları, Trodos Ofiyoliti (Trodos Masifi) ve Mamonia Kompleksi olmak üzere üç tektonik birimi kapsar (Şekil 1). Bunların her biri Doğu Akdeniz'de Neotetis okyanus havzalarının kapanmasıyla sonuçlanan levha hareketlerinin ve çok çeşitli paleo-ortamların ürünleridir (Hakyemez, 2004).

Geç Triyas riftleşmesi ile Gondwana'nın kuzey kenarından ayrılan Kimmer Kıtası Erken Jura'da parçalanarak mikrokıtalara oluşturmuştur (Şengör ve Yılmaz, 1981). Beşparmaklar bölgesi, bu mikrokıtalardan biri olup yavaşça çökmekte olan bir karbonat platformunu temsil eden Anatolid-Torid platformunun güney kenarında yer almıştır (Robertson ve Woodcock, 1986). Geç Kretase'de güneydeki okyanus havzası içinde

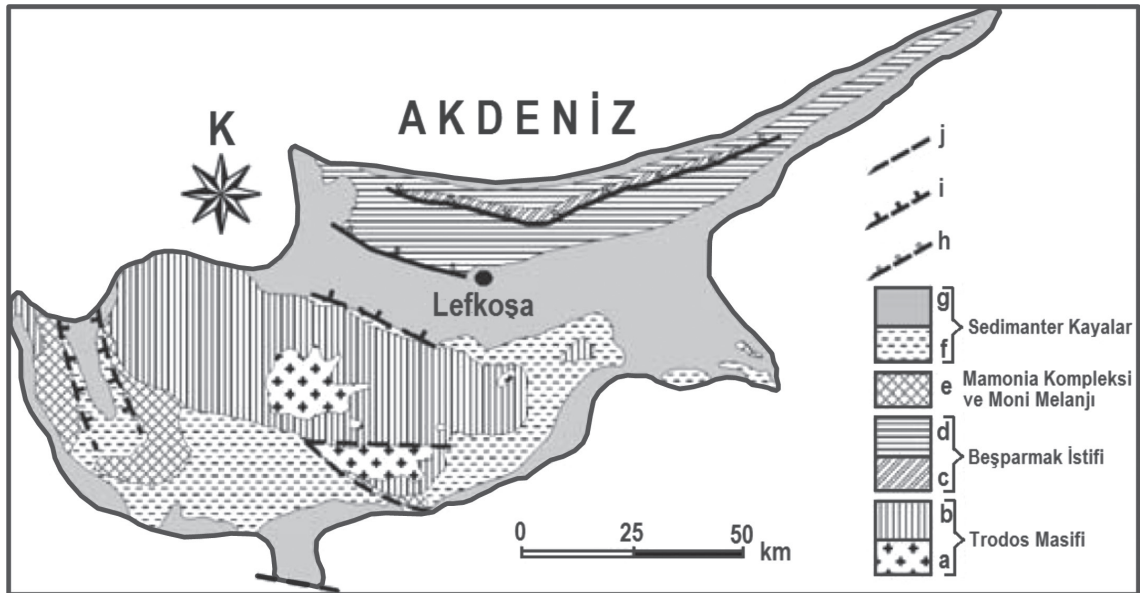
Afrika-Avrasya yaklaşmasına bağlı olarak, kuzey yönlü bir dalma-batma zonu üzerinde Trodos Ofiyoliti oluşmuştur. Bölgesel ölçekte Trodos Ofiyoliti Mesozoyik'te Doğu Akdeniz'de yer alan çok sayıda, küçük okyanus havzalarından birinin bir bölümünü içerir (Robertson ve Xenophontos, 1993) ve Kıbrıs'tan başlayarak doğuya doğru Türkiye ve İran'dan geçerek Umman'a kadar uzanan bir kuşakta yüzeyler. Bu ofiyolit kuşağı Arap-Afrika levhasının kuzey kenarını oluşturan Alpin dağ zincirinin önemli bir bölümüdür. Güneybatı Kıbrıs'taki Mamonia Kompleksi başlıca Triyas lavları ve Mesozoyik sedimanter kayaçları ile daha az oranda ofiyolitik kayaçlar, ekstrüzyonlar ve fay zonları boyunca yer alan metamorfiklerden oluşmaktadır (Robertson ve Xenophontos, 1993). Mesozoyik platform kayaçları yaygın şekilde makaslanmış, tektonik olarak bresleşmiş ve düşeye yakın eğimli fay zonları boyunca dilimlenerek yukarı çıkarılmıştır (Robertson ve Woodcock, 1986). Afrika ve Avrasya'nın devam eden yaklaşması Güney Kıbrıs açıklarında yer alan hendekteki dalma-batma ile karşılaşmış ve hem Trodos hem de Beşparmak Dağları Oligosen-Miyosen dönemleri boyunca genel olarak bir yay önü konumda kalmıştır. Bölge hızla çökmüş ve kuzeydoğu'dan (Adana Havzası veya İskenderun Körfezi) beslenen dev bir denizaltı yelpazesi kompleksinin derine gömülmüş bir parçasını oluşturmuş ve kalın bir çökel istifleriyle örtülmüştür (Weiler, 1965). Miyosen sonundan orta Pliyosen'e kadar yenilenen sıkışma deformasyonu sonucunda Beşparmak Dağları'nın doğu ve merkezi bölgelerinde büyük ölçekli bindirme ve kuzey eğimlenme gerçekleşmiştir (Robertson ve Woodcock, 1986). Beşparmak Dağları'nın geç Miyosen dönemindeki son yerleşimi Mesarya Ovası'nın altında Trodos volkanik temelinin faylanması nedeniyle olmuş, bu faylar boyunca daha sonra gerçekleşen hareketler Mesarya

bölgesi Pliyosen sedimantasyonunu etkilemiştir (Robertson, 1977). Trodos Masifi çevresi ve Güneybatı Kıbrıs Mamonia Napları'nın yerleşimi sonrasında kuzeydeki Beşparmaklar bölgesinden farklı bir jeolojik gelişim göstermiştir: Trodos Masifi çevresi Kampaniyen'de Perapedhi Formasyonu'nun umber ve radyolaritleri, Maastrihtiyen-Tersiyer döneminde de Lefkara Grubu'nun tebeşirleriyle temsil edilen pelajik bir çökelti sahne olurken adanın güneybatı bölgesi Maastrihtiyen'in bir bölümünde normal pelajik çökeltiden uzaktır. Çünkü o dönemde oldukça kalın bir volkanojenik çökel istifi depolanmış ve Trodos Masifi'nin güney kenarı, allokton birimlerin bu çökellerin üstüne yerleşmesiyle şiddetli olarak deforme olmuştur (Robertson ve Hudson, 1974). Bu dönemde Trodos Masifi'nin bütün güney kenarı dilimlenmiş, bütün bir kütle olarak güneybatıya doğru eğimlenmiş ve bu dönemin hemen sonrasında birikmeye başlayacak olan marn ve tebeşirlerin pelajik karakteriyle belirlenen derin bir su kütlesi altında kalmıştır. Bu kenar boyunca Paleosen ve erken-orta Eosen döneminde pelajik karbonat çökeltisi devam etmiştir. Trodos kuzeyi ise yükselmiş, çok düşük sedimantasyon etkisi altında kalmış veya olasılıkla denizaltı erozyonuna uğramıştır. Bu bölgelerde Orta ve Üst Eosen çökelleri çok incedir veya hiç yoktur. Trodos'un güney ve doğusunda pelajik tebeşir ve marnlar Oligosen-erken Miyosen sırasında da maksimum kalınlıkta çökeltirken kuzeyde zaten yükselmiş olan bölgelerde bu çökeller yine çok incedir. Trodos'un kuzeybatısında bu dönem çökelleri bölgesel yükselimin önemli kanıtı olan resif ve kavkılı kireçtaşı oluşumlarını içermektedir (Robertson, 1977). Orta Miyosen başlangıcında Lefkara sedimantasyonunu sona erdiren tektonik hareketler Trodos Masifi'nin bugünkü güney kenarına yakın bir bölge olan Limasol Ormanı bölgesinin yükselimiyle başlamıştır. Üste doğru

sığlaşarak lagün çökelleriyle devam eden karbonat istifi, yerel resif gelişimleri ve jips depolanması ile sona ermiştir. Trodos Masifi'nin büyük bölümü Pliyosen dönemi boyunca tektonik olarak duraylı, su üstü konumda veya düşük su düzeyi altında kalmıştır (Robertson, 1977). Pleyistosen'de tektonik duraylılık sonrası birbirini izleyen şiddetli ve aralıklı yükselim dönemleri başlamıştır (Robertson, 1977). Kıbrıs'ın yükselimi, köken olarak Afrika kıtasına ait bir birim olarak düşünülen Eratosthenes denizaltı tepesinin Kıbrıs aktif kenarıyla güçlü çarpışması sağlamaktadır (Robertson vd., 1995). Doğu Akdeniz'in doğusunda deprem verileri kuzeydoğu yönlü dalma-batmanın yerel olarak Güneybatı Kıbrıs

altında devam ettiğini göstermektedir (Kempler ve Ben Avraham, 1987; Ambraseys ve Adams, 1993).

Çalışma alanının jeolojisi ve bölgedeki önemli yapısal elemanlar Şekil 1'de görülmektedir. Farklı araştırmacılar değişik zamanlarda (Gaudry, 1862; Baroz, 1979; McCallum ve Robertson, 1995a, 1995b; Çuhadar vd., 1997; Hakyemez vd., 2002; Hakyemez, 2004) farklı veri setleri kullanarak, Kıbrıs'ın tektonik yapısını araştırmışlardır. Bu çalışmada ise Kıbrıs Adası'na ait rejyonel gravite verilerinin birinci düzey türev değerleri kullanılarak, bölgeye ait fay türü jeolojik yapılar ve çizgisellikler gibi süreksizlik gösteren yapı sınırları belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Kıbrıs Adası'nın yapısal birimleri. a: plütonik kompleks, b: ekstrüzyfler ve levha dayklar, c: Mesozoyik-Eosen, d: Oligosen-Miyosen, e: Mamonia kompleksi ve Moni melanjı, f: Kretase-Miyosen, g: Pliyosen-güncel, h: bindirme, i: normal fay, j: tektonik hat (Hakyemez 2004'den düzenlenmiştir).

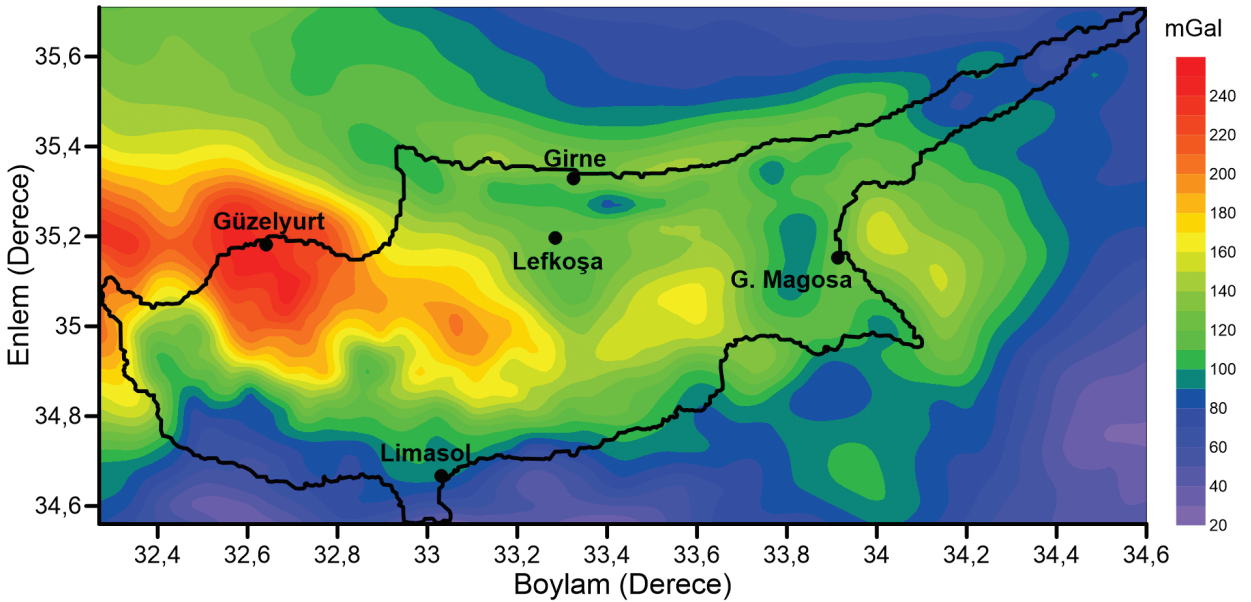
Figure 1. Structural units of Cyprus island. a: plutonic complex, b: extruders and plate dykes, c: Mesozoic-Eocene, d: Oligocene-Miocene, e: Mamonia complex and Moni-melange, f: Cretaceous-Miocene, g: Pliocene-current, h: overlap, i: normal fault, j: tectonic line (modified after Hakyemez, 2004).

KIBRIS ADASI EGM08 BOUGUER ANOMALİLERİ

EGM08 Bouguer gravite verileri, CGMW (Commission for the Geological Map of the World) ve UNESCO işbirliği ile 2008 yılı başlarında oluşturulan WGM (World Gravity Map) projesinin bir sonucudur (Sönmez, 2015). WGM projesi UNESCO'nun desteği altındaki Uluslararası Jeodezi Birliği'ne (IAG) bağlı Uluslararası Gravite Alanı Servisi'nin (IGFS) bir merkezi olan Bureau Gravimetric International (BGI) tarafından yürütülmüştür. Projede öncelikle Serbest Hava ve Bouguer gravite verileri kara, hava ve deniz ölçümleri ve son yıllarda yapılan küresel ve bölgesel ölçümlerin arşiv bilgileri derlenmiştir. Daha

sonra 5'x5' aralıklarda (yaklaşık 9 km) yerkürenin topografya ve batimetri veri tabanından da yararlanılarak ultra yüksek dereceli küresel harmoniklerle Bouguer anomali grid verileri 1 mGal duyarlılığında belirlenerek yayınlanmıştır (Pavlis vd., 2008). EGM08 uydu ve yüzey ölçümlerini birleştiren küresel bir modeldir. Şekil 2'de görülen çalışma alanına ait Bouguer gravite verileri Dünya Gravite Modeli'nden (EGM08) elde edilmiştir (Pavlis vd., 2008).

Tektonik yapılarla ilgili olarak maksimum gravite değerleri Trodos Masifi üzerinde görülmektedir (Şekil 2). Tektonik yapılarla ilişkili olarak, gravite değerleri farklı doğrultularda yönelimler sergilemektedir (Şekil 2).

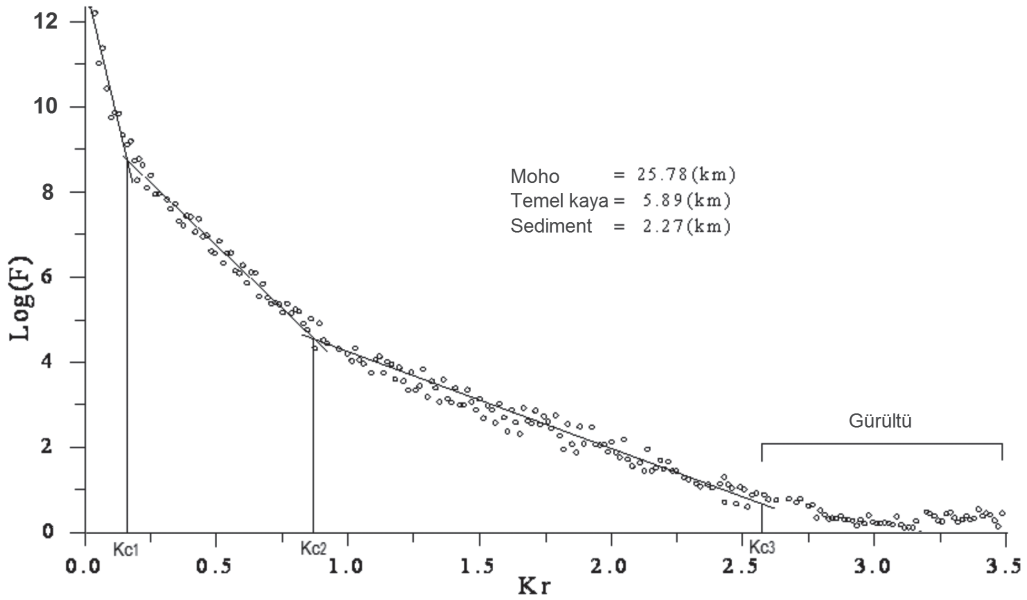


Şekil 2. Kıbrıs ve civarının EGM08 Bouguer anomali haritası.

Figure 2. EGM08 Bouguer anomaly map of Cyprus and its surroundings.

Çalışma alanına ait derin ara yüzey sınırlarının ortalama derinlikleri, Bhattacharyya (1967) tarafından geliştirilen radyal ortalama genlik spektrumu tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Bu teknik, gravite verilerinin 2B Fourier dönüşümüne bağlıdır. Ara yüzey derinlikleri, dalga sayısı ile gravite verilerinin logaritmik güç spektrumu arasındaki doğrusal

ilişkinin eğiminden elde edilir. Hesaplama sonucunda üç farklı ara yüzey derinliği bulunmuştur (Şekil 3). Genlik spektrumunun eğimli parçalarından sediment, temel kaya ve Moho sınırlarına ait derinlikler sırasıyla 2.27 km, 5.89 km ve 25.78 km olarak bulunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Kıbrıs adası EGM08 Bouguer anomalilerinin radyal ortalama logaritmik genlik spektrumu ve derin ara yüzey sınırlarının ortalama derinliklerinin ve kritik dalga sayılarının belirlenmesi.

Figure 3. Radial average logarithmic amplitude spectrum of Cyprus island EGM08 Bouguer anomalies and determination of mean depths and critical wave numbers of deep interface boundaries.

Genlik spektrumu tekniği kullanılarak 5.89 km derinlik değeri hesaplanan temel kaya topoğrafyasını modellemek için Parker-Oldenburg algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, ara yüzeyin Fourier dönüşümü ile gravite verilerinin Fourier dönüşümü arasındaki

bağıntıya dayanır. Bu bağıntı, jeolojik yapının bir ara yüzeyinin yoğunluğundan ve belirlenen derinliğinden yinelenerek oluşturulur (Parker, 1973; Oldenburg, 1974). Düzensiz bir homojen tabakanın gravite değerlerini hesaplamak için kullanılan Fourier dönüşümü aşağıdaki gibidir:

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

Burada $f[\Delta g(x)]$, z_0 , $z_1(x)$, k , G , ve ρ parametreleri, jeolojik yapının ara yüzeyinin sırasıyla gravite değerlerinin Fourier dönüşümü, ortalama derinliği, her ölçü noktası altındaki derinlik, dalga sayısı, gravite sabiti ve sınırının üstündeki ve altındaki ortamların yoğunluklarından belirlenen yoğunluk farkıdır. Ortalama z_0 derinliğinden ve yoğunluk farkından hareketle ara yüzey sınır derinlikleri denklem 1'den yinelemeli olarak hesaplanır. Yinelemeler belli bir yineleme sayısına ulaşıncaya veya sıfıra bir önceki ve sonraki yinelemede kestirilen derinlikler arasındaki hataların, sıfıra yakın seçilen yakınsama kriterinden küçük oluncaya kadar devam ettirilir.

SÜREKSİZLİKLERİ BELİRLEME TEKNİKLERİ

Özellikle potansiyel alan verileri ile sığ veya derin faylar arasındaki ilişkiyi görüntüleyebilmek için kullanışlı olan TYT tekniği, jeolojik yapıların yanal süreksizlik sınırlarını belirleyebilmek için kullanılmaktadır (Lyngsie vd., 2006). TYT'nin genliği, birinci düşey türev değerlerine göre denklem 2'de verildiği gibi ifade edilir:

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

Burada $\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}$ ve $\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}$ ve terimleri rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerinin x- ve y- yönlerindeki türevlerini ifade etmektedir. TYT tekniğinin en çok tartışılan zayıf yönü, derin veya düşük yoğunluk sunan yeraltı yapılarına ait kenarlarda düşük genlik sunmaları ve böylece bu yapılara ait kenar etkilerini yeterince yansıtamamalarıdır (Miller ve Singh, 1994; Cooper ve Cowan, 2006). Yöntemin bu zayıf noktasından yola

çıkan araştırmacılar son yıllarda normalize edilmiş türev yöntemleri geliştirmişlerdir (Miller ve Singh, 1994; Cooper ve Cowan, 2006). Bu tekniklerden biri EA tekniğidir ve hem sığ, hem de derin yapılar için iyi sonuçlar vermektedir (Miller ve Singh, 1994). EA tekniği, yoğunluk farkının güçlü veya zayıf olması durumunda iyi sonuç verir. Eğer yoğunluk farkı pozitifse, EA değerinin işareti anomaliye sebep olan kaynağın üzerinde pozitif, kenarlarında sıfır ve dışında negatif olur. Denklem 3'e göre, düşey türevin toplam yatay türeve oranının ark tanjantı, EA haritasında sıfır değerler üretir. Bu sıfır değerli konturlar jeolojik birimlerin ve fay tipi yapıların, yoğunluk değişimlerine bağlı olarak yanal süreksizlik sınırlarını temsil etmektedir (Miller ve Singh, 1994).

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial z}\right)^2}} \right) \quad (3)$$

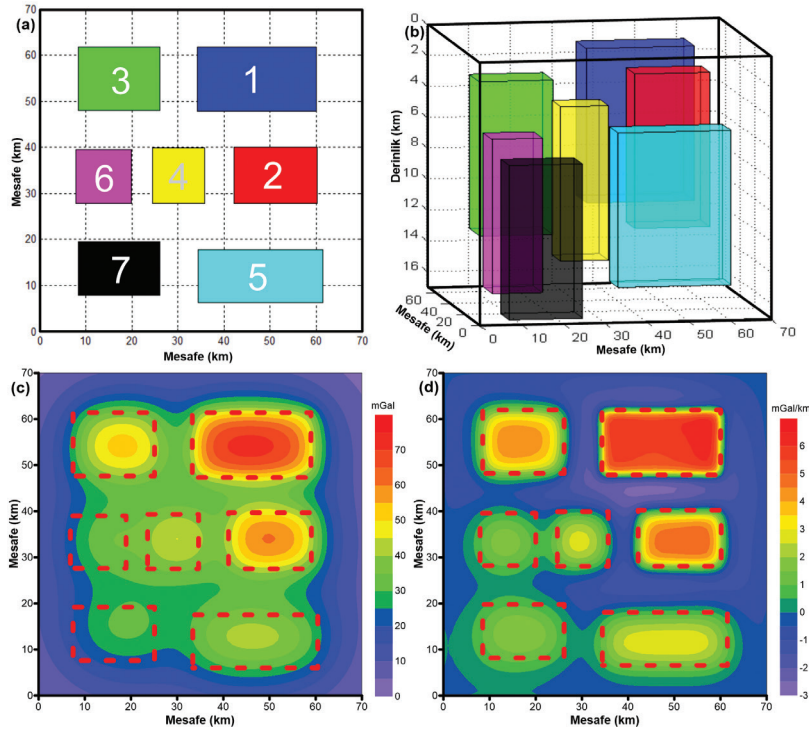
Burada φ parametresi EA'nın genliğini temsil eder.

Şekil 4a ve 4b'de, yoğunluk farkları aynı (0.3 gr/cm³) olan farklı derinlik ve boyutlara sahip yedi dikdörtgen cisimden oluşan kuramsal model görülmektedir. Kuramsal modelin etkilerini, çizgisel yapıları belirlemede kullanılan teknikler üzerinde görmek için, Arısoy ve Dikmen (2011) tarafından geliştirilen POTENSOFT yazılımı kullanılmıştır. Cisimler aynı yoğunluk farkına sahip olmalarına rağmen, yüzeyden olan derinlikleri sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 km olarak tasarlanmıştır (Şekil 4b). Bu modelden hesaplanan gravite haritası Şekil 4c'de görülmektedir. Hesaplanan gravite verilerinin birinci düşey türev haritası ise Şekil 4d'de görülmektedir. Şekil 4c ve 4d karşılaştırıldığında,

farklı derinliklerdeki cisimlerin konumlarını görüntüleme işleminde, türev haritasının gravite haritasına göre daha başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Daha sonra, TYT ve EA teknikleri, kuramsal modelden hesaplanan gravite değerleri ile ve gravite değerlerinin birinci düşey türev değerleri ile test edilmiştir.

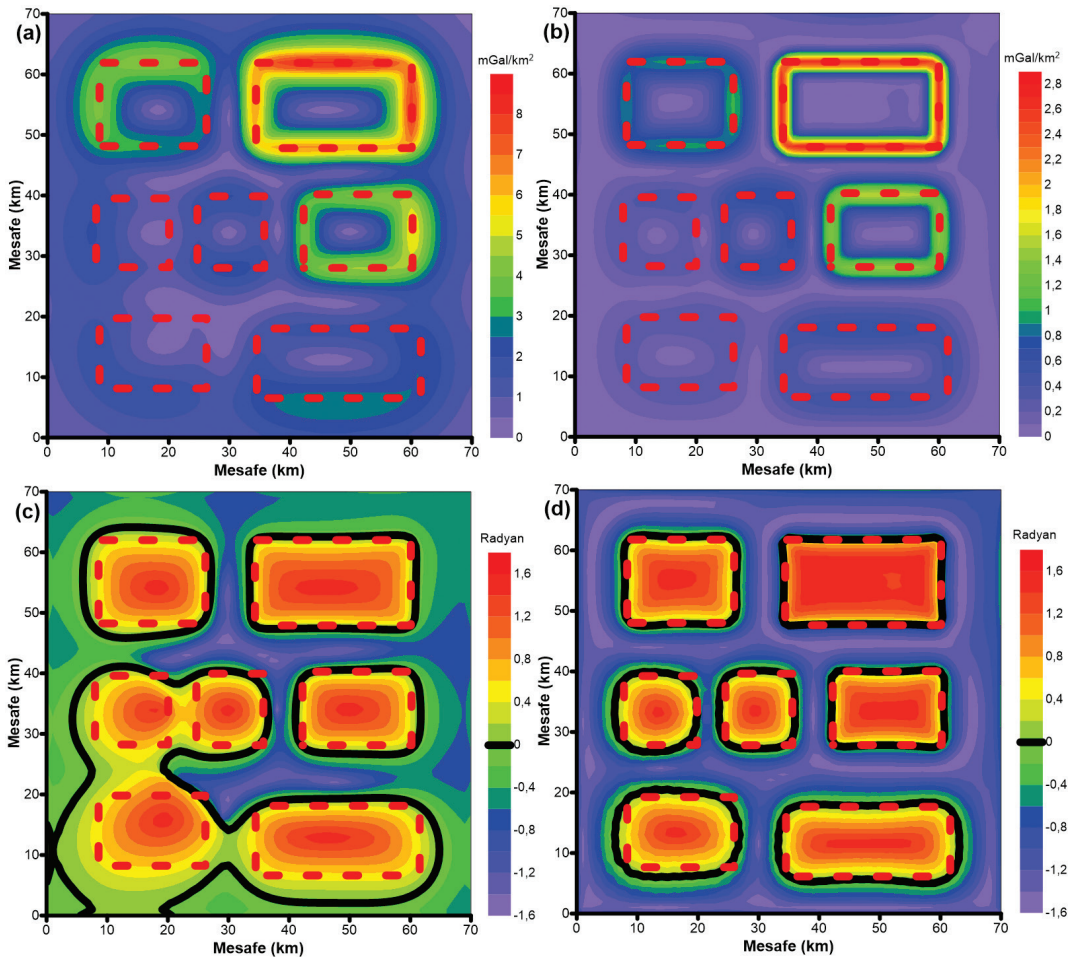
Şekil 5a ve 5b'deki TYT tekniğinin sonuçlarına göre, sığ cisimlerin yanal süreksizlik sınırları iyi bir biçimde görüntülenebiliyorken, cismin derinliği arttıkça bu netliğin azaldığı görülmektedir. Ayrıca burada, türev verileri kullanılarak bulunan sonucun (Şekil 5b) gravite verileri kullanılarak bulunan sonuçtan (Şekil 5a) daha doğru olduğu görülmektedir. TYT tekniğinin doğasından dolayı, cismin derinliği

arttıkça maksimum genlikte hızlı bir azalma olur. Böylece bu tekniğin sığ süreksizliklere daha duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. EA tekniği kullanılarak bulunan genlik haritaları ise Şekil 5c ve 5d'de görülmektedir. Bu tekniğin genlik haritalarına bakıldığında, cisimlerin sınırları üzerinde sıfır genlik değerleri görülür. Ancak, türev verileri kullanılarak bulunan EA genlik haritasına bakıldığında, sıfır konturlarının, derinlik artsa da, süreksizlik sınırları üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 5d). Diğer taraftan, doğrudan gravite verileri kullanılarak bulunan EA genlik haritasına bakıldığında ise, sıfır konturlarının, özellikle derinlik arttıkça, süreksizlik sınırlarından uzaklaştığı görülmektedir (Şekil 5c).



Şekil 4. a) Sonlu düşey prizmatik modeller, b) modellerin üç boyutlu görünümü, c) modellerin gravite anomali haritası, d) gravite verilerinin birinci düşey türev haritası.

Figure 4. a) Finite vertical prismatic models, b) three-dimensional view of models, c) gravity anomaly map of the models, d) first vertical derivative map of the gravity data.



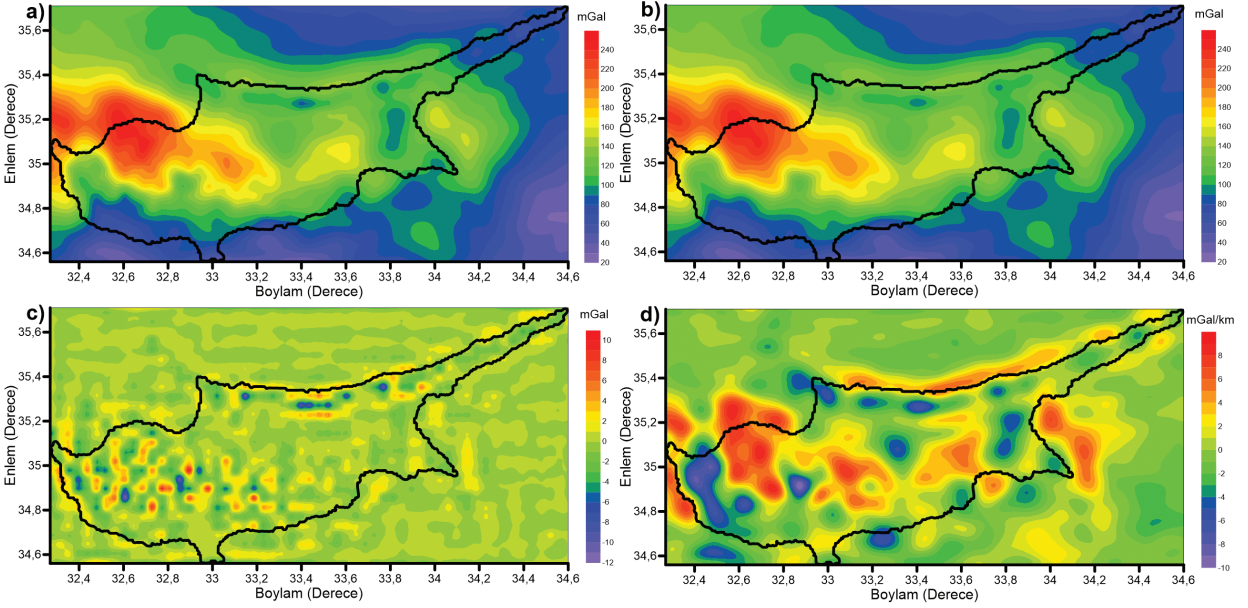
Şekil 5. a) Gravite anomalisinin TYT haritası, b) gravitenin birinci düşey türev anomalisinin TYT haritası, c) gravite anomalisinin EA haritası, d) gravitenin birinci düşey türev anomalisinin EA haritası.

Figure 5. a) Horizontal gradient map of the gravity anomaly, b) horizontal gradient map of the first vertical derivative of the gravity anomaly, c) tilt angle map of the gravity anomaly, d) tilt angle map of the first vertical derivative of the gravity anomaly.

Gravite Anomalilerinin Ayırımı ve Sınır Analizleri

Bölgeye ait Bouguer gravite değerlerinin ve rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerinin bölgenin temel kaya topoğrafyası ve tektonik yapısıyla uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 6a ve 6d). Tabaka kalınlıklarındaki azalmaya bağlı olarak gravite değerleri Trodos Masifi üzerinde artmaktadır.

Çalışma alanının rejyonel gravite anomalisinin elde edilmesi için alçak geçişli süzgeç kullanılmıştır. Bouguer gravite, rejyonel gravite, yerel gravite ve birinci düşey türev haritaları sırasıyla Şekil 6a, 6b, 6c ve 6d'de görülmektedir.



Şekil 6. a) Bouguer gravite haritası, b) rejyonel gravite haritası, c) yerel gravite haritası, d) rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev haritası.

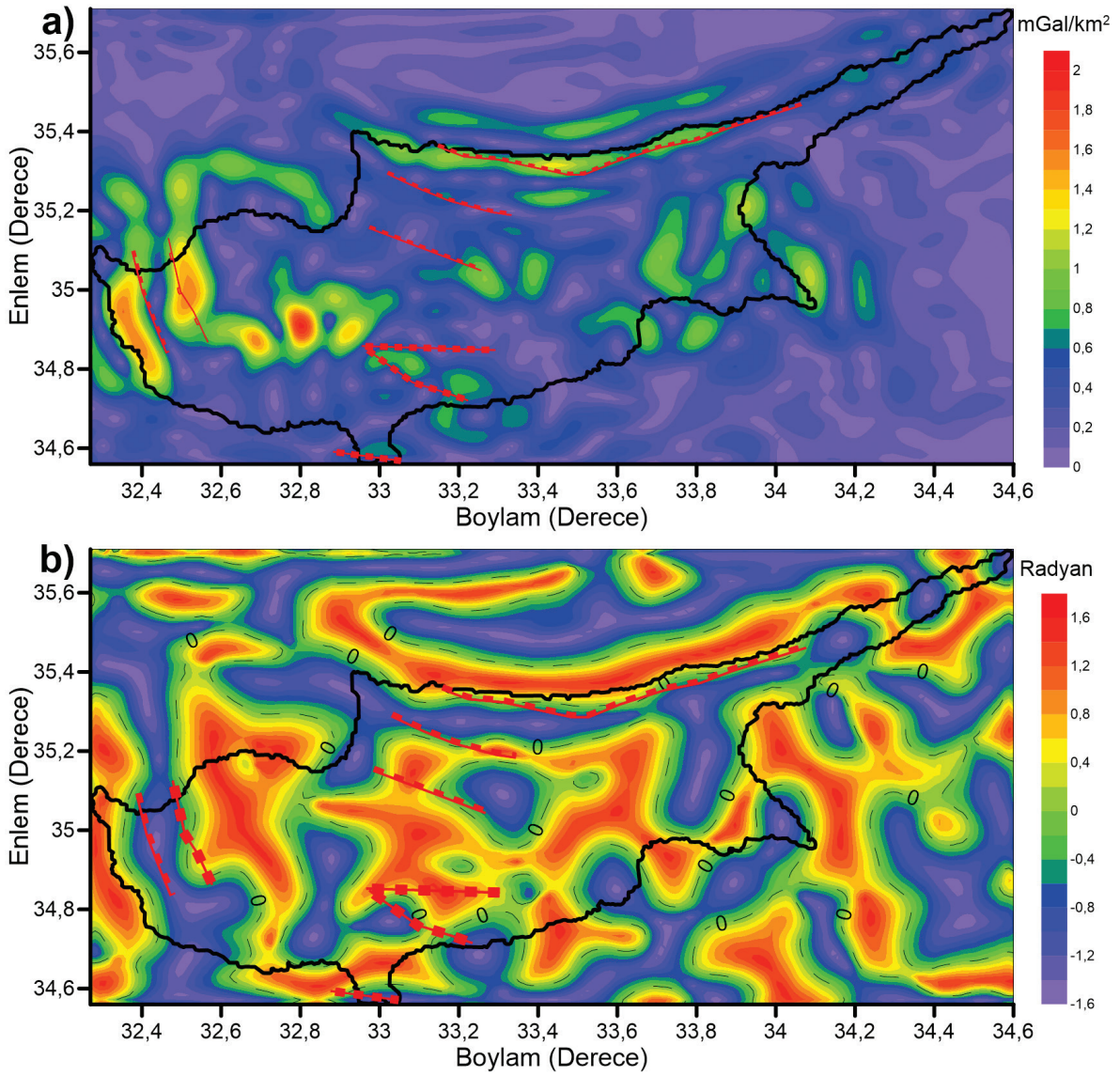
Figure 6. a) Bouguer gravity map, b) regional gravity map, c) local gravity map, d) the first vertical derivative map of the regional gravity values.

Rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerinden hesaplanan TYT genliğinin maksimum değerleri ile EA genliğinin sıfır değerleri, çalışma alanındaki tektonik süreksizlikleri ve çizgisellikleri gösteren yapıları temsil etmektedir.

TYT'in maksimum genlik değerleri tektonik süreksizliklerin çeşitli doğrultularda uzanımlar sergilediklerini göstermektedir (Şekil 7a). Böylece, çalışma alanının bazı kısımlarındaki yeni fay türü yapılar ve yoğunluk farkı sunan kütle sınırları, TYT genlik haritasında görülebilir (Şekil 7a). EA genlik haritasına bakıldığında ise, çizgisellik gösteren hem derin hem de sığ yapı kenarları üstünde sıfır genlik değerleri

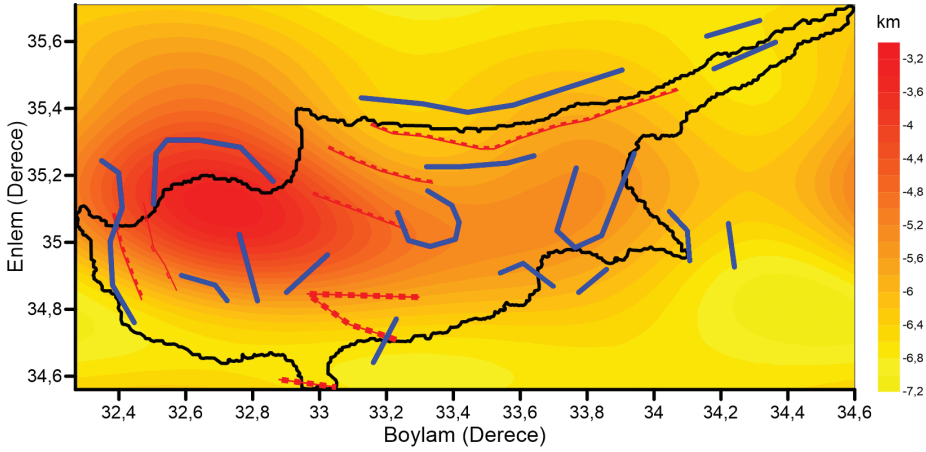
görülmektedir (Şekil 7b). Bu genlik haritasından jeolojik süreksizliklerin değişik doğrultularda uzanım yaptıkları anlaşılmaktadır.

Altın ve gümüş gibi ekonomik değeri olan birçok maden yatağı ağırlıklı olarak tektonik süreksizlikler ile yakından ilişkili oldukları için (Ercan vd., 2014), Trodos Masifi'ndeki maden yataklarının yerlerini belirlemede tektonik yapıya işaret eden çizgiselliklerin önemi ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, çizgisel yapıların bazıları aktif fayları, bazıları eski fayları ve bazıları da yoğunluk farkı sunan kütle sınırlarını temsil etmektedir. Önceden varlığı bilinen ve bu çalışma kapsamında belirlenen çizgisel yapılar Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 7. Çalışma alanına ait reijonal gravite verilerinin birinci düşey türev anomalisinin; a) TYT haritası, b) EA haritası (kırmızı çizgiler bilinen fayları göstermektedir).

Figure 7. a) Horizontal gradient magnitude of the first vertical derivative of the regional gravity anomaly, b) tilt angle map of the first vertical derivative of the regional gravity anomaly (red lines represent the known faults of the region).



Şekil 8. Çalışma alanının temel kaya derinlikleri haritası (kırmızı çizgiler mevcut fayları ve mavi çizgiler de yeni bulunan çizgisel yapıları temsil etmektedir).

Figure 8. Depth to basement rock of the study area (red lines represent existing faults and blue lines represent newly found linear structures).

Çalışma alanına ait temel kaya topoğrafyası, rejyonel gravite verilerine Parker-Oldenburg algoritması uygulanarak belirlenmiştir (Şekil 8). Temel kaya topoğrafyasını hesaplamak için, genlik spektrumundan bulunan 5.89 km derinlik değeri, başlangıç derinlik değeri olarak kullanılmıştır. Metamorfik birim ($\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$) ile temel kaya derinliğine kadar olan Neojen sedimentleri ($\sim 2.4 \text{ g/cm}^3$) arasındaki yoğunluk farkı 0.3 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Yakınsama kriteri olarak 0.01 km seçilmiştir. Kesme dalga sayıları, genlik spektrumundan sırasıyla 0.87 km^{-1} ve 2.57 km^{-1} olarak belirlenmiştir. RMS hatası ve yinleme sayısı sırasıyla 0.003 km ve 6'dır. Rejyonel gravite verileri ile hesaplanan temel kaya topoğrafyası arasında kuvvetli bir ilişki görülmektedir (Şekil 6b ve 8). Antiklinalleri ve senklinalleri takip eden çizgisellikler, temel kaya topoğrafyasını kontrol etmektedir. Temel kaya topoğrafyasındaki alçalma ve yükselimlerdeki antiklinaller ve senklinaller arasındaki sınırların fay zonlarıyla ilişkili olmalarından dolayı (Oruç vd., 2013), bu gözlem beklentilerle uyumludur. Temel kaya topoğrafyasının en sığ yeri 3.2 km

ile Trodos Masifi'nin kuzeybatı kısmında iken, en derin yeri ise 7.2 km ile diğer alanlarda olduğu açıkça görülmektedir. Temel kaya topoğrafyasındaki alçalma ve yükselimlerin faylarla kısmen uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 8).

TARTIŞMALAR

TYT ve EA sınır analiz teknikleri kullanılarak, çalışma alanında yeni fay türü yapılar ve çizgisellikler belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan teknikler çalışma alanının rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerlerine ilk kez uygulanmıştır. Çalışma alanının bazı kısımlarında TYT haritasında maksimum genlik görülmezken, EA haritasında aynı kısımlarda sıfır genlik değerleri görülmüştür (Şekil 7a ve 7b). Gaudry (1862), Baroz (1979), McCallum ve Robertson (1995a, 1995b), Çuhadar vd. (1997), Hakyemez vd. (2002) ve Hakyemez (2004) Kıbrıs'da üç tektonik birimin sınırlarını belirlemişler, ancak bu çalışmada bulunan daha alt birimlere ait çizgiselliklere değinmemişlerdir.

Yeni bulunan çizgisellikler Şekil 8'de açıkça görülmektedir. Ergon (1986), Kıbrıs'ın manyetik haritalarını veri-işlem yöntemleriyle analiz ederek bölgenin genel jeolojik yapısı ve bilinen cevher yataklarıyla olan ilişkilerini ele almıştır. Literatürde birçok araştırmacı Kıbrıs'ın Bouguer gravite anomalisini değişik yöntemlerle yorumlayarak çalışma alanına ait jeolojik birimleri belirlemeye çalışmışlardır (Moore ve Vine, 1971; Greenbaum, 1972; Bear, 1963; Gass ve Masson-Smith, 1963; Robertson, 1975; Robertson ve Woodcock, 1979). Bu çalışmada ise, Parker-Oldenburg algoritması Kıbrıs'ın rejyonel gravite verilerine uygulanarak temel kaya topoğrafyası derinliğinin 3.2 km ile 7.2 km arasında değiştiği bulunmuştur. Khan vd. (1972) bu masifin 0.5 km kalınlığındaki yüzey tabakası altında iki kırılma yüzeyi saptamıştır ve ikinci katmanın kalınlığını 1.5 km ile 2.0 km arasında değiştiğini bulmuşlardır. Ancak bu araştırmacılar da bu çalışmada bulunan yeni fay türü yapılardan ve çizgiselliklerden bahsetmemişlerdir.

Literatürde mevcut olan, fay türü yapıları belirlemek için yapılmış gravite alanındaki çalışmalarda TYT ve EA sınır analiz teknikleri genellikle Bouguer gravite verileriyle kullanılmıştır (Nabighian, 1972; Miller ve Singh, 1994; Lyngsie vd., 2006; Cooper ve Cowan, 2006). Bu çalışmada ise, bu teknikler rejyonel gravite verilerinin birinci düşey türev değerleriyle kullanılmıştır. Çalışmada, temel kaya topoğrafyasındaki antiklinal ve senklinallerle ilgili olarak yükselim ve alçalma bölgeleri de belirlenmiştir (Şekil 8).

Bölgenin çarpışma kuşağı içinde olması ve magmatik faaliyetin yaygın oluşu doğal olarak farklı gravite anomalileri üretmektedir. Bu kütlelerin yan kayaçlar ile dokanaklarını faylardan ayırt etmek için, bu çalışmanın sonuçlarından yararlanılarak daha farklı çalışmalar yapılmalıdır.

Ayrıca sınır analiz teknikleriyle belirlenen fay zonlarının paleotektonik mi, yoksa neotektonik aktif yapı mı olduğu ayrı bir araştırma konusudur.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kıbrıs Adası'nın çizgisellik haritası oluşturularak güncel tektonik yapısı verilmiştir. Kullanılan tekniklerin geçerliliğini ortaya koymak amacıyla farklı boyutlara ve derinliklere sahip olan dikdörtgen prizma şekilli yedi kuramsal model oluşturulmuştur. Daha sonra çalışma alanının temel kaya ondülasyonu rejyonel gravite verileri yardımıyla ortaya konulmuştur. İki farklı teknik kullanılarak belirlenen çizgiselliklerin yerleri, TYT haritasının maksimum genlik değerleri ve EA haritasının da sıfır konturları kullanılarak güncel tektonik yapı belirlenmiştir.

Bu çalışma ile, Kıbrıs Adası'nda daha önce gözlenmemiş çizgisellikler ortaya konulmuştur. Kıbrıs Adası'nın kuzey ve kuzeydoğu kesimlerinde, kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı yeni çizgisellikler bulunmuştur. Adanın güneybatı kesiminde ise, çeşitli doğrultularda uzanım gösteren yeni çizgisellikler ve eski fayları kesen yeni çizgisellikler bulunmuştur. Çalışma sonucunda ortaya konulan tektonik yapının deprem üretebilecek kesimleri, daha sonra yapılacak olan çalışmalarla belirlenmelidir. Özellikle Litosfer-Astenosfer ve Moho sınırlarının modellenmesi gibi daha derin çalışmalarla, görüntülenen çizgiselliklerin ne derece deprem üretebilecekleri ortaya konulmalıdır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, gelecekte yapılacak olan kapsamlı jeofizik çalışmalarla desteklenirse, çalışma alanında henüz keşfedilmemiş maden yatakları ile deprem riskinin yüksek olduğu yerleri belirlemek daha kolay olacaktır.

KATKI BELİRTME

Yazar, bu çalışmadaki katkılarından dolayı, Kocaeli Üniversitesi'nden Prof. Dr. Bülent ORUÇ'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Altınoğlu, F.F., Sarı, M., Aydın, A., 2015. Detection of Lineaments in Denizli Basin of Western Anatolia Region Using Bouguer Gravity Data. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 415–425.
- Ambraseys, N. N., Adams, R. D., 1993. Seismicity of the Cyprus region. *Terra Nova*, 5, 8-94.
- Arısoy, M. Ö., Dikmen, Ü., 2011. Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modelling and mapping. *Computer & Geosciences*, 37, 935–942.
- Baroz, F., 1979. Étude géologique dans le Pentadaktylos et la Mésoaria (Chypre septentrionale). 2 volumes, Ph. D. thesis, 365 p., University of Nancy, France.
- Bear, L. M., 1963. The mineral resources and mining industry of Cyprus, *Geology Survey Bulletin*, 1, 184 p.
- Bhattacharyya, B.K., 1967. Some general properties of potential fields in space and frequency domain: a review. *Geosurveying* 5 (3), 127–143.
- Cooper, G. R. J., Cowan, D. R., 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers and Geosciences*, 32 (10), 1585-1591.
- Çuhadar, Ö., Akça, N., Teymur, S., İllez, H. İ., Alaygut, D., 1997. KKTC Beşparmak Dağları kuzeyindeki Miyosen yaşlı birimlerin stratigrafisi, petrografisi ve jeokimyasal değerlendirmesi. TPAO Rapor No. 3762, 36 s., Ankara.
- Ercan, Ö. A., Şeren, A., Elmas, A., 2014. Gold and silver prospection using magnetic, radiometry and microgravity methods in the Kışladağ province of Western Turkey. *Resource Geology*, DOI: 10.1111/rge.12024.
- Ergon, M., 1986. Kıbrıs jeolojisi ve maden yatakları üzerine bazı jeofizik irdelemeler. *Jeoloji Mühendisliği*, 28, 35–42.
- Evjen, H. M., 1936. The place of the vertical gradient in gravitational interpretations. *Geophysics*, 1, 127–136.
- Gass, L. G., Masson-Smith, D., 1963. The geology and gravity anomalies of the Troodos Massif, Cyprus. *Philosophical Transaction of the Royal Society, London*, A255, 417-467.
- Gaudry, A., 1862. Géologie de l'île de Chypre. *Mém. Soc. Géol. France. Sér.2*, 7(3), 106 p.
- Gomez-Ortiz, D., Agarwal, B. N. P., 2005. 3DINVER.M: A MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3-D horizontal density interface by Parker–Oldenburg's algorithm. *Computer Geosciences*, 31, 513–520.
- Greenbaum, B., 1972. Magmatic processes at oceanic ridges: Evidence from the Troodos Massif, Cyprus. *Natural Philosophical Society*, 238, 18-21.
- Gunn, P. J., 1975. Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geophysical Prospecting*, 23 (2), 300-312.
- Hakyemez, H. Y., Turhan, N., Sönmez, İ., 2002. Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nin jeolojisi. MTA Rapor No:10608, 69 s., Ankara.
- Hakyemez, A., 2004. Kuzey Kıbrıs Oligosen-Pliyosen istiflerinin planktonik foraminifera biyostratigrafisi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora Tezi, 362 s (yayımlanmamış).
- Kempler, D., Ben Avraham, Z., 1987. The tectonic evolution of the Cyprian Arc. *Annual Tectonic*, 1, 58-71.
- Khan, M. A., Summers, C., Bamford, S. A. D., Chorston, N., Poster, K. ve Vine, F. J., 1972. A reversed refraction line in the Troodos Massif, Cyprus. *Nature Physical Science*, 238, 134-136.
- Lyngsie, S. B., Thybo, H., Rasmussen, T. M., 2006. Regional geological and tectonic structures of the North Sea area from potential field modelling. *Tectonophysics*, 413 (3–4), 147–170.

- McCallum, J. E., Robertson, A. H. F., 1995a. Sedimentology of two fan-delta systems in the Plio-Pleistocene of the Mesaoria Basin, Cyprus. *Sedimentary Geology*, 215-244.
- McCallum, J. E., Robertson, A. H. F., 1995b. Late Pliocene – early Pleistocene Athalassa Formation, north central Cyprus: carbonate sand bodies in a shallow seaway between two emerging landmasses. *Terra Nova*, 7, 265-277.
- Miller, H. G., Singh, V., 1994. Potential field tilt -a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213–217.
- Moore, E. M., Vine, F. J., 1971. The Troodos; Massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust evaluation and implications. *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 268, 443-468.
- Nabighian, M. N., 1972. The Analytic Signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507–517.
- Oldenburg, D. W., 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39, 526–536.
- Oruç, B., 2010. Edge detection and depth estimation using a tilt angle map from gravity gradient data of the Kozaklı-Central Anatolia Region, Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, DOI: 10.1007/s00024-010-0211-0.
- Oruç, B., Keskinsezer, A., 2008. Structural setting of the northeastern Biga Peninsula (Turkey) from tilt derivatives of gravity gradient tensors and magnitude of horizontal gravity components. *Pure Applied Geophysics*, 165, 1913-1927.
- Oruç, B. ve Selim, H., 2011. Interpretation of magnetic data in the Sinop area of Mid Black Sea, Turkey, using tilt derivative, Euler deconvolution, and discrete wavelet transform. *Journal of Applied Geophysics* 74, 194–204.
- Oruç, B., Sertçelik, İ., Kafadar, Ö., Selim, H. H., 2013. Structural interpretation of the Erzurum Basin, Eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 105–113.
- Parker, R. L., 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31, 447–455.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K., 2008. An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 13–18, 2008. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008>. (Erişim tarihi: 11 Şubat 2017).
- Robertson, A. H. F., 1975. Cyprus umbers: basalt-sediment, relationships on a Mesozoic ocean ridge. *Journal of Geological Society*, 131, 511-531.
- Robertson, A. H. F., 1977. Tertiary uplift history of the Troodos Massif, Cyprus. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 1763-1772.
- Robertson, A. H. F., Hudson, J. D., 1974. Pelagic sediments in the Cretaceous and Tertiary history of the Troodos Massif, Cyprus. In: Hsü, K. J., Jenkyns, C. H., (eds.), *Pelagic sediments on the land and under the Sea*. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 1, 403-436.
- Robertson, A. H. F., Woodcock, N. H., 1979. Tectonic settings of the Troodos Massif in the east Mediterranean. *Proceedings of International Ophiolite Symposium, Cyprus*, 36-49.
- Robertson, A. H. F., Woodcock, N. H., 1986. The role of the Kyrenia Range Lineament, Cyprus, in the geological evolution of the eastern Mediterranean area. *Philosophical Transaction of the Royal Society, London, A 317*, 141-177.
- Robertson, A. H. F., Xenophontos, C., 1993. Development of concepts concerning the Troodos ophiolite and adjacent unit in Cyprus. In: Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N. B. W., Neary, C. R., (eds.), *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geological Society Special Publication, 76, 85-119.
- Robertson, A. H. F., Kidd R. B., Ivanov A. F., Woodside J. M., Galindo-Zaldivar J., Nieto L., 1995. Eratosthenes Seamount, easternmost Mediterranean: Evidence of Plio-Quaternary

- collisional-related processes in the easternmost Mediterranean. *Terra Nova*, 7, 254-264.
- Sönmez, T., 2015. Doğu Marmara bölgesinin litosfer dinamiklerinin EGM08 gravite anomalileri, izostazik ve termomekanik analizlerle araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, K.O.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Şengör, A. M. C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey : A plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181 - 241.
- Vine, F. J., Moores, E. M., 1989. Paleomagnetic results from the Troodos igneous massif, Cyprus. *Transactions American Geophysical Union*, 50, 131.
- Weiler, Y., 1965. The folded Kythrea Flysch in Cyprus. Ph. D. Thesis, The Hebrew University of Jerusalem, 71 p.



Araştırma Makalesi / Research Article

Kabataş-Mecidiyeköy Metro (İstanbul) Tünellerinde Zor Zemin Koşullarının Tünel Kazısına Etkisi

Effect of Difficult Ground Conditions on Tunnel Excavations in Kabataş-Mecidiyekoy Metro (Istanbul) Tunnel

Mehmet ÖZÇELİK 

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ISPARTA

Geliş (Received): 15 Aralık (December) 2017 / Düzeltme (Revised): 12 Şubat (February) 2018 / Kabul (Accepted): 03 Nisan (April) 2018

ÖZ

Son yıllarda ulaşım tünelleri mekanik yöntemlerle açılmaktadır. Verimli bir tünel kazısının gerçekleştirilebilmesi için jeolojik yapıya uygun kazı makinasının seçimi önemli bir etkidir. Bu makalede, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki jeolojik formasyonlar kazı mekaniği açısından değerlendirilmiştir. Kabataş-Mecidiyeköy istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi, Tünel açma makineleri (TBM) ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) olmak üzere iki tip tünel kazısını içermektedir. TBM kullanılarak açılacak olan tünelin iki hattının toplam uzunluğu 6180 m dir. Ayrıca, NATM yöntemiyle açılacak olan iki hattın toplam uzunluğu ise 4490 m dir. Çalışma kapsamında, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki zemin ve kayaç birimlerinin mühendislik jeolojisi çalışılmış, tünel kayacı olması açısından sınıflandırılmıştır. Zor zemin koşullarının tünel kazı çalışmalarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, jeolojik birimlerin geçirimsizlikleri ve yeraltı suyu seviyesi hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İstanbul, Jeolojik yapı, Metro, Tünel kazısı

ABSTRACT

In recent years, transportation tunnels have been excavated by mechanical methods. The selection of a suitable excavator for the geological structure is an important factor in achieving an efficient tunnel excavation. For this purpose, geological formations along the Kabataş-Mecidiyeköy tunnel alignment have been evaluated in terms of excavation mechanics. The Istanbul Metro Project between Kabatas-Mecidiyekoy stations includes two types of tunnel excavations, tunnel boring machines (TBM) and New Austrian Tunneling Method (NATM). The total length of the two lines of the tunnel to be opened using TBM is 6180 m. In addition, the total length of the two lines to be opened by NATM method is 4490 m. In this study, soil and rock units along the Kabataş-Mecidiyeköy tunnel alignment were classified in terms of engineering geology, and tunneling, and the effects of difficult ground conditions on tunnel excavation were investigated. In addition, the related information is given for the permeability of the geological units and the groundwater level.

Keywords: Istanbul, Geological structure, Metro, Tunnel excavation

GİRİŞ

Kentsel alanlarda yapılan metro çalışmalarında alt ve üst yapıların zarar görmemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi önemlidir. Metro kazıları TBM, NATM, aç-kapa tünel gibi inşaat yöntemlerinin biri veya birkaçı uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Planlanan yeraltı mühendislik yapılarının tasarımında jeolojik yapıya aktarılacak yükler yeterli duyarlılıkta belirlenebilmelidir. Bununla birlikte, kazı sırasında jeolojik yapının oluşturabileceği risklerde (şev kayması, tünel göçmesi, derin kazı çukurlarında aşırı deformasyon ve oturma, aşırı su gelimi vb.) minimize edilmelidir (Arioğlu vd., 2002). Ayrıca jeolojik yapı, tünel açma işlemlerinde tünelin zamanında ve başarılı olarak açılmasındaki önemli parametrelerden biridir. Son yıllarda dünyada birçok projede kullanılan TBM'ler ilerleme sırasında oluşan gerilmeleri, sağlam kayanın basınç direnci düzeyine yaklaştırırlar. Yeraltında karşılaşılan jeolojik birimlerin türü TBM'lerin ilke olarak aynı, fakat ayrıntıda çeşitli yönlerden farklı olmasını gerektirmiştir. Örneğin, kullanılacak kafa tasarımları ve keski tipleri, makinayı dengeleme sistemleri, tahkimat sistemleri, çıkarılan pasayı taşıma sistemleri çeşitli yönlerden sert, orta sert, yumuşak ve akıcı jeolojik birimler için farklılıklar göstermektedir. Bir tünel yapımında TBM kullanımı öncesi jeolojik yapının araştırılması geleneksel tünel açma yöntemlerinden daha ayrıntılı olmalıdır. Kaya sertliği ile ilgili özgül problemler, kaya tabakalarının duruş ve değişimi, kayacın

dayanma süresi tünel açma makinesinin başarısını etkileyen önemli öğelerdendir (Deere vd., 1974). Sonuçta, açılacak yeraltı açıklığı boyunca kazılacak jeolojik birimlerin önceden bilinmesi, kullanılacak TBM seçiminde en önemli etmenlerden biri olmuştur (Tunçdemir, 1998). TBM'lerin bilinçli seçilmesi ve kullanımı; hızlı, ekonomik ve verimli tünel ve galeri açmanın en temel unsurudur. Mecidiyeköy - Kabataş istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi, TBM ve NATM tünel açma yöntemleri olmak üzere iki tünel kazı tipini içermektedir. Metro güzergahında 4 istasyon yer almaktadır. İki hat olarak açılan tüneller, NATM tünel delme yöntemi (4490 m) ve TBM yöntemiyle (6180 m) kazılmaktadır. Ek olarak muhtelif lokasyonlarda inşaat shaftları, TBM giriş shaftları gibi yapılar yer almaktadır. İstasyonların tamamı yüzeye yakın olmakla beraber yeraltındadır. Genel olarak ray hattı, peron seviyesi ile bunlara bağlanan merdiven grupları delme tünelledir. Peron ile bilet holü arasındaki ara katlar genellikle aç-kapa yöntemiyle yapılmaktadır. Bilet holü/konkors seviyesi aç-kapa inşaat yöntemi kapsamındadır.

Bu çalışmada seçilen, Kabataş-Mecidiyeköy tünel güzergahındaki (Şekil 1) zemin ve kayaç birimlerinin mühendislik jeolojisi incelenmiş, tünel kayacı olması açısından bunlar sınıflandırılmıştır. NATM yöntemiyle açılacak olan shaft, peron tünelleri, makas tünelleri ve bağlantı tünelleri ile TBM kullanılarak yapılacak olan ana hat kazı çalışmalarında zor zemin koşullarının etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. Kabataş-Mahmutbey istasyonları arasındaki İstanbul Metro Projesi lokasyon haritası.

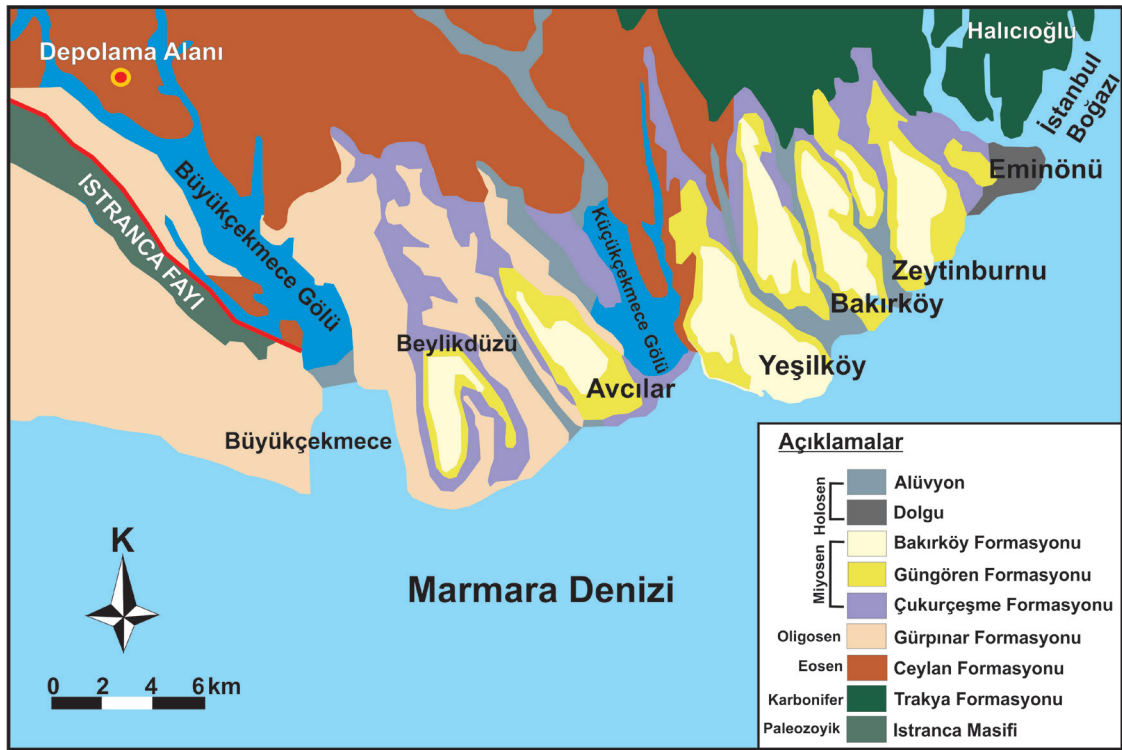
Figure 1. Location map of Istanbul Metro Project between Kabataş and Mahmutbey stations.

JEOLOJİ

Çalışma alanı jeolojik olarak Trakya ve Ceylan formasyonlarından oluşmaktadır (Şekil 2). Trakya formasyonu genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası birimleri ve bunların ardalanmasından meydana gelmektedir. Formasyon içerisinde kalınlıkları 2-3 m olan ve nadiren 50-60 m'ye ulaşan diyabaz ve andezit daykları yer almaktadır (Ketin, 1991; Seymen, 1995). Çoğunlukla oldukça ve tamamen ayrıışmış olan bu magmatik sokulumlar, kazı sırasında fazla güçlük çıkarmamaktadır. Ancak ayrıışmamış ve diyabaz bileşimli olanlar ise önemli kazı güçlüğü yaratmaktadır. Trakya formasyonu'nun kıvrımlı ve kırıklı bir yapı sunduğu aşırı derecede kırıklandığı ve parçalandığı görülmektedir. Plastik davranış gösterme özelliği nedeniyle kiltası ve çamurtaşı birimleri aşırı derecede kıvrımlanırken, daha rijit olan kumtaşları kırılarak yer yer budinler oluşturmuşlardır. Bu formasyon, yüzeyden ortalama 3 m derinliğe kadar yapay dolgunun altındadır ve yine yüzeyden 10-15 m derinliğe kadar orta veya aşırı derecede ayrıışmıştır. Kumtaşı tabakaları silttaşı veya kiltası düzeylerine göre daha kalın katmanlıdır (5-50 cm). Silttaşı ve kiltası düzeylerinin ortalama kalınlıkları 1-10 cm

arasında değişmektedir. Tabaka yüzeyleri genelde düz-düzlemsel, kaygan veya az pürüzlü (özellikle kumtaşları) olup, kil ile sıvalıdır. Tabakalar dışındaki süreksizlik düzlemlerini; eklem takımları, faylar, makaslamalar ve düzensiz kırıklar oluşturmaktadır. Özellikle tünel ve istasyon kazıları esnasında 2-3 adet eklem takımı ve bunların yanında düzensiz çatlaklar izlenmiştir. Çatlak sıklıkları ortalama 5-20 adet/m dir (kırıklı, çok kırıklı kayaç). Çatlak yüzeyleri çoğunlukla düz ve kaygandır. Ancak yer yer özellikle kumtaşı çatlaklarında az pürüzlü yüzeyler gözlenmektedir. Çatlak aralıkları çoğunlukla mm mertebesinde ve kil ile dolguludur (Ketin, 1991; Seymen, 1995).

Çalışma sahasının yerleşim yeri olmasından dolayı tünel güzergahını temsil edecek sayıda mostra bulunamamış ve istenilen oranda çatlak ölçümü yapılamamıştır. Ancak Trakya formasyonu'ndaki tünel kazısı çalışmalarında aynada gerçekleştirilen çatlak ölçümleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Şekil 3'de çatlak sistemlerinin Gül diyagramında tünel eksenine ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 4'de ise Eşit Alan (Schmidt) diyagramı verilmiştir. Burada çatlak düzlemlerine ait doğrultuların KB ve KD, eğim yönlerinin ise KD-GB yönlerinde yoğunlaştığı görülmektedir.



Zaman	Devir	Alt Devir	Litoloji	Litolojik Özellik
SENOZOİK	KUVATERNER			ALÜVYON Çakıl, Kum, Silt, Kil
	TERSİYER	PLİOSEN		DOLGU MALZEMESİ Kuvars Çakıllı Kil, Silt
		MİYOSEN		BAKIRKÖY FORMASYONU Kireçtaşı
				GÜNGÖREN FORMASYONU Marn Aratabakalı Kil
				ÇUKURÇEŞME FORMASYONU Siltli Killi Kum, Kum
		OLİGOSEN		GÜRPINAR FORMASYONU İnce bantlı Kil
	PALEOZOİK	ORTA-ÜST EOSEN		CEYLAN FORMASYONU Kalkerli Kil, Killi Kireçtaşı, Kalkarenit, Killi Çakıllı Kum, Kumlu Kil Kırklareli Kireçtaşı, Resifal Kireçtaşı, Mamlı Kireçtaşı
KARBONİFER				TRAKYA FORMASYONU Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı, Kiltası

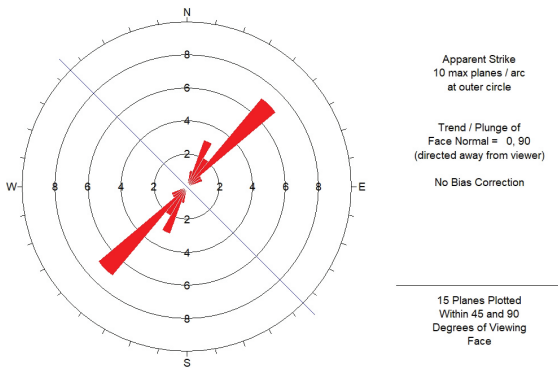
Şekil 2. İstanbul'un batı yakasının jeoloji haritası ve stratigrafik kolon kesiti (Arıç, 1955; Dalgıç, 2004; Güven, 2009).
Figure 2. Geological map and stratigraphic columnar section of the western side of Istanbul (Arıç, 1955; Dalgıç, 2004; Güven, 2009).

Özçelik

Çizelge 1. Kazı aşamasında Trakya formasyonu'nda aynada yapılan süreksizlik ölçümleri.

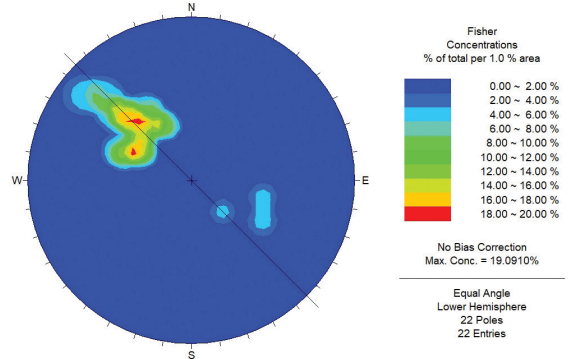
Table 1. Discontinuity measurements at the tunnel face during the excavation stage in the Thrace formation.

Lokasyon No	Çatlak sistemleri	Tabaka	
		Doğrultu	Eğim açısı
L-05 Hattu	K48B/40KD	K40D	25GD
L-05 Hattu	K46B/38KD	K55D	32GD
L-05 Hattu	K45B/41KD	K50D	30GD
L-05 Hattu	K44B/40KD	K60D	45GD
L-05 Hattu	K46B/40KD	K48D	70GD
L-05 Hattu	K48W/38KD	K53D	68GD
L-05 Hattu	K85D/80GD	K73D	45GD
L-05 Hattu	K45B/41KD	K40D	25GD
L-05 Hattu	K45B/40KD	K50D	48GD
L-05 Hattu	K44B/39KD	K60D	45GD
L-05 Hattu	K44B/42KD	K44D	40GD
L-05 Hattu	K43B/40KD	K38D	63GD
L-05 Hattu	K29B/21KD	K48D	77KB
L-05 Hattu	K44B/40KD	K53D	60KB
L-05 Hattu	K25D/66GD	K30D	45KB
L-05 Hattu	K60D/45KB	K45D	45GD
L-05 Hattu	K55D/43KB	K80D	52GD
L-05 Hattu	K58D/44KB	K55D	46GD
L-05 Hattu	K56D/45KB	K65D	50GD
L-05 Hattu	K54D/46KB	K37D	60GD
L-05 Hattu	K57D/45KB	K46D	67GD
L-05 Hattu	K58D/43KB	K40D	57GD



Şekil 3. Süreksizliklerin gül düyagramı.

Figure 3. Rose diagram of the discontinuities.



Şekil 4. Tabaka doğrultu ve eğim açılarının eşit alan (Schmidt net) diyagramında gösterimi.

Figure 4. Drawing the layer direction and slope angles at the equal area (Schmidt net) diagram.

Ceylan formasyonu kalkerli kiltası, killi kireçtaşı, kalkarenit, taban kısmında ise killi çakıllı kumtaşı ve kumlu kiltaşlarından oluşmaktadır. Bu kayaçlar ince tuf ara düzeyleri içerir.

HİDROJEOLOJİ

Çalışma alanının büyük kısmını oluşturan Trakya formasyonu hidrojeolojik olarak geçirimsiz-az geçirimli özelliğe sahiptir. Sahanın batı tarafında Trakya formasyonu üzerinde yer alan Ceylan formasyonu'nda ise genel olarak kil baskın olup geçirimsiz özelliktedir. Ancak tabana yakın kesimleri çakıl ve kum katkılı olup kısmen geçirimli olabilmektedir. Trakya formasyonu içinde yapılan basınçlı su deneylerinde Lugeon değerleri ağırlıklı olarak geçirimsiz (<1 Lugeon), çok az bir kısmı ise az geçirimli olarak (1-5 Lugeon) tespit edilmiştir. Kazı sırasında genel olarak çalışmalarını güçleştirecek yeraltı suyu akımıyla karşılaşılması beklenmemektedir. Ancak kumtaşının baskın olduğu düzeylerde, kayacın çok kırıklı veya parçalı olduğu zayıflık zonlarında beklenenin üzerinde yeraltı suyu

sızıntılarıyla karşılaşılabilir. Özellikle, Ceylan formasyonu ile Trakya formasyonu'nun dokanağında yer alan kum-çakıl seviyelerinde, az da olsa yeraltı suyu ile karşılaşılması beklenmektedir. Tünel güzergahını oluşturan kayaç biriminin geçirimsizlik özellikleri ve tünellerin sığ derinlikte yer alıyor olması nedeniyle, tünel kazılarında genel olarak damlama veya zayıf sızıntılar halinde yeraltı suyu ile karşılaşılması beklenmektedir.

TÜNEL KAZISI

Tüneller geometri ve gabarilerine göre NATM veya TBM ile açılmaktadır. Peron, makas, makas bağlantıları ve paralel tüneller arası acil kaçış bağlantı tünelleri başta olmak üzere, gerekli görülen yerlerde tünellerin bir kısmının NATM yöntemiyle; güzergah ana hat tünellerinin ise mekanize olarak TBM yöntemiyle açılması mümkündür. (Artson Geoteknik, 2016a, b). Kabataş-Mecidiyeköy metro projesinde her iki yöntemle açılan tünel kazılarının metrajları şöyledir;

1.Hat; km: 0+087.811 ile km: 0+764.189,1+991.189 ile 2+212.189, km: 3+390.080 ile 3+610.080 ve km: 4+350.199 ile 5+703.478 arası;

2. Hat boyunca ise km: 0+85.018 ile km: 0+824.982, 2+005.982 ile km: 2+226.982, km: 3+377.182 ile km: 3+59.182 ve km: 4+304.982 ile km: 5+645.222 arasındaki kısımlar NATM yöntemi kullanılarak açılmaktadır. Bununla birlikte;

1. Hat; km: 0+764.189 ile km: 1+991.189, km: 2+212.189 ile 3+390.080 ve km: 3+610.080 ile km: 4+350.189 arası;

2. Hat; km: 0+824.982 ile km: 2+005.982, km: 2+226.982 ile km: 3+377.182 ve km: 3+597.182 ile km: 4+304.982 arası kısımlar TBM kullanılarak açılmaktadır.

NATM yöntemi; kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taahhüt edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde asıl olan kazı sonrası, ilk destek oluşturulana kadar geçen zamandır. Bu yöntemin en önemli ilkesi; kayacın direncini korumak ve harekete geçirmek; tünel çevresindeki kayacın kendini destekleyen genişçe bir halka oluşturmaktır. Bunun için ilk iksa, kayanın kendisinin desteklemesine yardımcı olması amacıyla yerleştirilir ve zamanlaması çok önemlidir. Ayrıca iksada birikecek gerilmedeki jeoteknik ölçümlerin düzenli olarak yapılması ile potansiyel tehlikelerin önüne geçilmesinde ve zamanında önlem alınabilmesinde ayrıca bir öneme sahiptir. Tünellerde kazı esas olarak, üst yarı ve alt yarı olmak üzere iki kısımda yürütülmektedir. İstanbul Metrosu Tünelleri gidiş-dönüş olarak, iki ayrı hat olarak açılmakta olup; dört ayrı özellikte tünel kesiti kullanılmaktadır. Bunlar; A (Ana Hat Tünelleri), P (Peron Tünelleri), T (Makas Tünelleri) ve B Tipi (Bağlantı Tünelleri) tünellerdir. A tipi, P tipi, T tipi, B tipi tünellerde kazılar üst yarı ve alt yarı kazı olmak üzere iki kademedede açılmaktadır (Şekil 5). Ancak T tipi tünellerin kesit alanının fazla büyük olması nedeniyle; diğer tünel tiplerinden farklı olarak sadece T tipinde üst yan; kendi içinde iki ve alt yan ve tek olmak üzere, toplam üç aşamada kazılır.



Şekil 5. Üst yarı (a) ve alt yarı kazı (b) olmak üzere iki kademedeki yapılan tünel kazıları.

Figure 5. Tunnel excavations in two levels, upper half (a) and lower half (b) excavation.

TBM' ler mekanize şekilde tünel açarak ilgili istasyonlara ulaştırılmaktadır. TBM'lerin istasyonlar içinden kazı yapmadan geçebilmeleri için şaft, peron tünelleri, makas tünelleri ve bağlantı tünelleri NATM yöntemiyle daha önceden açılmaktadır. Peron tünellerinin nihai beton kaplamalarından invert betonları TBM' ler tünelden geçmeden; kemer betonları ise peron tünellerinden TBM' ler geçtikten sonra yapılmaktadır. İçinden TBM geçmesi söz konusu olmayan NATM tünellerinde ise kazı aşaması ve iksa işleri tamamlandıktan sonra ilgili diğer tünel kazılarını aksatmayacak şekilde nihai beton kaplamaları yapılmaktadır. Kısıtlı zaman içinde TBM' lerin geçeceği istasyonların TBM çalışma programını aksatmayacak biçimde peron tünellerinin kazı ve destekleme işlerinin yapılabilmesi için uygun yerler tespit edilerek NATM tünel işletme şaftları açılmakta ve ulaşım tünelleriyle peron tünellerinin yapılacağı kısımlara erişilebilmektedir. Proje kapsamında şaft yerlerinden başlanmak üzere şaftlar açılmakta ve ulaşım tünellerinin yapımını takiben peron tünelleri imal edilerek ve taban (invert) beton kaplama işleri tamamlanmaktadır.

ZEMİN KOŞULLARI

Yeraltı kazılarının güvenli ve ekonomik şekilde gerçekleştirilmesi, kazı sırasında karşılaşılabilecek kaya ve zemin koşullarının önceden doğru şekilde tespit edilmesi ve sınıflandırılmasıyla mümkündür. İnceleme alanında esas olarak Trakya formasyonu ile birlikte sahanın batı tarafında dar bir alanda Ceylan formasyonu yer almaktadır. Ceylan formasyonu ağırlıklı olarak kalkerli kil - kiltaşları ve özellikle aynı formasyonun tabanında olmak üzere çakıllı killi kum ve çakıllı kumlu kiltaşlarından oluşmaktadır. Genel olarak zayıf çimentolanmış olan birim, göreceli olarak taban kesiminde daha zayıf çimentolanmıştır. Trakya formasyonu genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası seviyelerinin ardalanmasından oluşur ve bu farklı litolojilerin her biri, yer yer daha baskın konumdadır. Ardalanma nedeniyle, Trakya formasyonu farklı litolojik seviyeler yerine, ayrışma düzeylerine göre gruplandırılmıştır.

Litolojik olarak üstte yer alan Ceylan formasyonu, mühendislik özellikleri açısından zayıf çimentolanmış sert zemin olarak değerlendirilmiştir. Trakya formasyonu ise mühendislik özellikleri açısından, tamamen

ayırışmış (W5), çok - orta derecede ayırışmış (W3-W4) ve az ayırışmış - ayırışmamış (W1-W2) kayaç olmak üzere 3 seviye halinde dikkate alınmıştır. Tamamen ayırışmış kayaç seviyesi zemine dönüşmüş, diğer iki seviye ise kayaç olarak değerlendirilmiştir. Tünel güzergahını oluşturan farklı zemin - kayaç ortamlar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

ZEMİN TABAKALARININ TÜNEL KAZISI AÇISINDAN SINIFLANDIRILMASI

Açık kazı veya tünel kazı kotlarında karşılaşılan beklenen Ceylan formasyonunun zemin niteliğindeki kısımları ile tamamen ayırışmış kayaç özelliğinde olan kısımları bu bölümde konu edilmiştir (Çizelge 2). Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'na (USCS) ek

olarak, tünel mühendisliğinde zeminler kütleli dayanım ve permeabiliteleri ile bunlara bağlı özellikleri açısından da sınıflandırılmaktadır. Bu bakımdan Terzaghi (1950), Huer (1974), Huer ve Virgens (1987), Deere vd. (1969) tarafından geliştirilen zemin sınıflamaları dikkate alınarak, tünel kazısı zemin tabakaları için yapılan sınıflandırma Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. L2 Bağlantı tünel kazısında karşılaşılan Ceylan formasyonu.

Table 2. Ceylan formation encountered in L2 connection tunnel excavation.

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+440	0+650	190	Ceylan
1+000	1+700	700	Formasyonu

Çizelge 3. Güzergahtaki zemin seviyelerinin tünelcilik açısından sınıflandırılması.

Table 3. Classification of the soil layers along the alignment from tunneling point of view.

Kesilecek Birim (Formasyon, üye - Litoloji)	SPT (N)	Birleştirilmiş zemin sınıflaması	Yeraltı suyu durumu	Tünelcilik açısından sınıflandırma
Ceylan formasyonu (Sert Kil- Çakıllı Kumlu Kil)	40	%60CL, %20CH, %10CL-ML, %10CL-GC	Yeraltı su seviyesi üstünde	Sağlam
Ceylan formasyonu (Sert Kil- Kilitaşı)	40	%60CL, %20CH, %10CL-ML, %10CL-GC	Yeraltı su seviyesi altında	Sağlam – Yavaş Dökülen
Tamamen Ayırışmış Kaya	20	%40 CL, %40SC, %10CH, %10GC- GP	Yeraltı su seviyesi üstünde	Sağlam veya Yavaş Dökülen
Tamamen Ayırışmış Kaya	20	%40 CL, %40SC, %10CH, %10GC- GP	Yeraltı su seviyesi altında	Hızlı Dökülen

Zayıf Zeminde Kazı

Kazı öncesi zemin, enjeksiyon veya jet grouting ile sağlamlaştırılarak geçirimsiz hale getirilmektir. Kazı, kırıcı uçlu makineler yardımıyla (Jack Hammer) yapılmaktadır. Ancak, kazı Kalot-Stros-Radye kademeleri halinde ve kısa adımlarla yürütülmektedir.

Orta Sertlikteki Zeminde Kazı

Orta sertlikteki zeminde kazı kırıcı uçlu makinelerle (Jack Hammer) yapılmaktadır. İki aynada bir kazı makinası ve delici makina (Jumbo) planlanmıştır. Bir aynada kazı ve kazı malzemesi nakli yapılırken, ikinci aynada çelik hasır, iksa, püskürtme beton (shotcrete) ve blonlama ile destekleme yapılmaktadır. Kazı zemini izin verdiği ölçüde tam kesit olarak açılmaktadır. Bu durum ulaşım yönünden büyük kolaylık sağlamaktadır. Olumsuz koşullarda zemin kademeli kazılacak ve halka (tünel kesiti) en kısa zamanda tamamlanacaktır. Ayrıca, gerektiğinde aynada, aynanın gelmemesi (stabilitesinin bozulmaması) için ayna göbeği bırakılmaktadır. Kazı malzemesi, geniş ölçüde oluşturulacak manevra ceplerinden yararlanılarak kamyonla shaft altına nakledilmektedir. Bu tip zeminlerde kırıcı uçlu makinelerle günlük ilerleme hızı ortalama 1 - 1.5 m'dir.

Sert Zemin Kazısı

Tünellerde ortaya çıkabilecek ve Jack Hammer ile kazılmaya izin verilmeyen zeminlerde, zemin denetimli olarak dinamit ile kazılarak aynı şekilde nakledilecektir. Sert zeminlerde günlük ilerleme hızı ortalama 1.5 - 2 m'dir.

KAYAÇ SEVİYELERİNİN TÜNEL KAZISI AÇISINDAN SINIFLANDIRILMASI

Tünel çalışmalarında ve kayaç kazı işlerinde, kayacın kütle özelliği dikkate alınmaktadır. Yeraltı kazılarında yaygın olarak kullanılan üç önemli kayaç sınıflaması vardır. Bu sınıflamalar; Kaya Kalite İndeksi (Q), Eklemlili Kaya Kütlelerinin Jeo-mekanik Sınıflaması (RMR) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sınıflamasıdır. Q-sınıflamasında, Q-değeri 0,001 ile 1000 arasında değerler almakta olup, en kötü kaya koşulu ile mükemmel kaya arasını kapsamaktadır. Benzer şekilde, 0-100 aralığında değişen puan sistemine dayalı RMR sınıflaması, çok iyi ile çok kötü olmak üzere 5 kaya sınıfını tanımlar. GSI sınıflamasında ise, kayaç kütlelerinin yapısal özelliğine bağlı olarak 5, çatlakların durumu ve ayrışma derecesi açısından (süreksizlik yüzey koşuluna bağlı olarak) ise 5 olmak üzere toplam (5 × 5) 25 kategori içinde sayısal olarak ifade edilmektedir. GSI sınıflaması, en kötüden en iyi kayaç koşuluna uygulanabilirliği nedeniyle günümüzde özellikle mühendislik değerlendirmeleri açısından RMR sınıflamasına tercih edilmektedir. Başlangıçta RMR ve Q sınıflandırma puanları ile ilişkilendirilen GSI, daha sonraki yıllarda yapılan değişikliklerle 1999'dan sonra tek başına bir sınıflandırma sistemi olarak kullanılmaktadır (Barton vd., 1974; Hoek ve Brown, 1980; Hoek, 2000; Ulusay ve Sönmez, 2000).

Saha gözlemleri, yeraltı suyu durumu ve laboratuvar deneylerinden elde edilen jeoteknik veriler (Çizelge 4) birlikte değerlendirilerek, tünel güzergahındaki kaya ortamlarının (Çizelge 5 ve 6) litoloji ve farklı ayrışma düzeyleri dikkate alınarak Q, RMR ve GSI kayaç kütle sınıflama sistemlerine göre sınıflandırılmıştır. RMR sınıflandırması Bieniawski (1993)'e göre yapılmıştır. Sınıflamada yeraltı su planı,

eklemlerdeki su basıncı/en büyük asal gerilim (sığ tüneller için en büyük asal gerilim = düşey gerilim kabul edilir), oranına göre belirlenmiş, süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise (-5) orta değeri alınmıştır (Hoek ve Brown, 1980; Hoek, 2000). RMR puanı; tünel için, süreksizlik düzeltmesi yapılarak ve GSI değerlerinin belirlenmesine yönelik olmak üzere üç şekilde hesaplanmıştır. GSI değerinin belirlenmesine

yönelik RMR hesaplamasında, yeraltı su durumu için “15” (tamamen kuru), süreksizlik yönelim düzeltmesi için ise “0” (çok uygun) puanı dikkate alınmıştır. GSI değerleri, sahada yeterli kaya mostralara görülemediği için RMR ve Q değerlerinden, yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak belirlenmiştir. Sınıflandırma sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 4. Tünel güzergahındaki jeolojik birimlerin jeoteknik özellikleri (Artson Geoteknik, 2016 a,b).

Table 4. Geotechnical characteristics of the geological units along the tunnel alignment (Artson Geotechnic, 2016 a,b).

Formasyon Özellikleri		Jeoteknik Parametreler				
Jeolojik birim	Litoloji	Birim hacim ağırlığı	Dayanım Parametreleri			Deformasyon Parametreleri
			Kohezyon c	Tek eksenli basınç dayanımı	İçsel sürtünme açısı Ø	Young modülü E
		kN/m ³	kPa	MPa	(°)	N/m ²
Ceylan Formasyonu	Sert kil	26.0-27.7		18-28		0.12-0.28
	Sert kil- kilitaşı	28.6-28.9		67-185	30-34	0.16-0.22
	Killi kum	24.5-27.4		32-47	20-26	0.23-0.30
Trakya Formasyonu	Kumlu kil	27.8-28.0	18-20	15-18	11-15	0.14-0.20
	Kumtaşı	26.3-28.4		40-165	40-56	4.9-5.40
	Silttaşı	23.5-27.6		15-25	30-35	0.28-0.26
	Kilitaşı	23.4-27.6		12-17	20-55	1.90-4.58

Çizelge 5. Mecidiyeköy - Kabataş Metro hattında NATM yöntemi ile kazılan jeolojik formasyon (başlangıçtan Kabataş istasyonuna kadar olan tünel bölümü).

Table 5. Geological formation excavated by NATM method in Mecidiyeköy - Kabataş subway line (tunnel section from the beginning to Kabataş station).

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+000	0+240	240	Trakya formasyonu
0+240	0+460	220	
4+437	4+658	221	
4+568	5+365	707	

Çizelge 6. Mecidiyeköy - Kabataş Metro hattında TBM yöntemi ile kazılan jeolojik formasyon (Kabataş İstasyonu – Mecidiyeköy şaftı arasındaki tünel bölümü).

Table 6. Geological formation excavated by TBM method in Mecidiyeköy - Kabataş subway line (tunnel section between the Kabatas Station and Mecidiyeköy Shaft).

Mesafeden (km)	Mesafeye (km)	Aradaki uzunluk (m)	Jeolojik birim
0+460	2+079	1619	Trakya formasyonu
2+079	2+300	221	
2+300	3+425	1125	
3+425	3+646	221	
3+646	4+437	791	

Özçelik

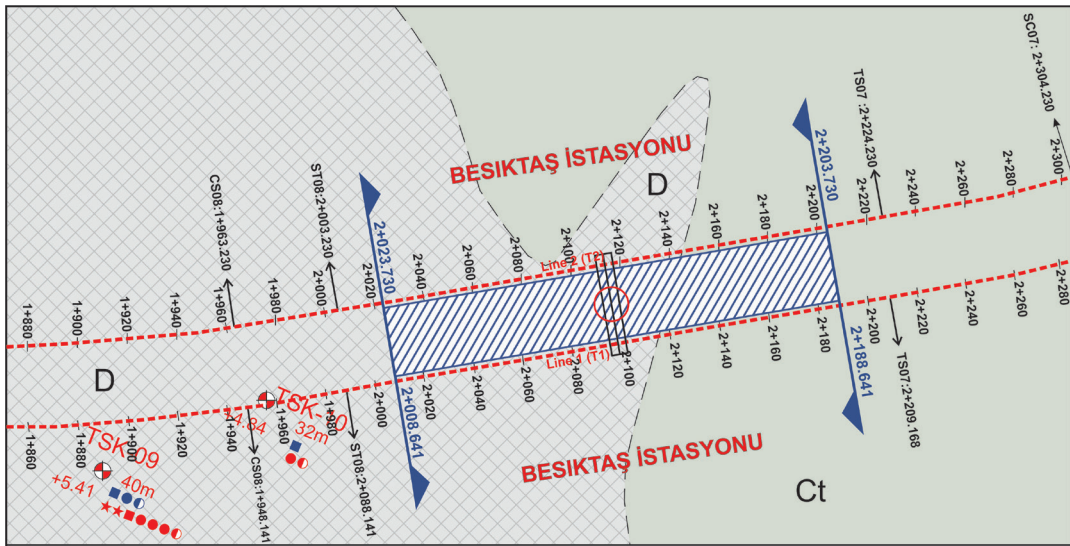
Çizelge 7. Tünel güzergahındaki kayaların litoloji ve ayrışma derecelerine göre sınıflandırılması (Artson, Geoteknik 2016 a,b).
Table 7. Classification of rocks along the tunnel alignment according to lithology and weathering degrees (Artson Geotechnic, 2016 a,b).

Kaya birimi	Kaya özellikleri	Q	RMR	GSİ	ÖNORM B 2203-1
Trakya formasyonu Çok - Orta Derecede Ayrışmış Kayaç (W3-W4)	Ağırlıklı silttaşı olmak üzere, kilitaşı - kumtaşı - silttaşı ardalanması (parçalı)	0.08 Çok fazla Zayıf Kaya	26-31 Zayıf Kaya	30	C2-B3 Baskılı - Taneli
Trakya formasyonu Az Ayrışmış - Ayrışmamış Kaya (W1-W2)	Ağırlıklı silttaşı olmak üzere, kilitaşı - kumtaşı - silttaşı ardalanması (sık çatlaklı - parçalı)	0.31 Çok Zayıf Kaya	31-36 Zayıf Kaya	40	B3 Baskılı

KAZI SIRASINDA OLUŞAN GÖÇÜK

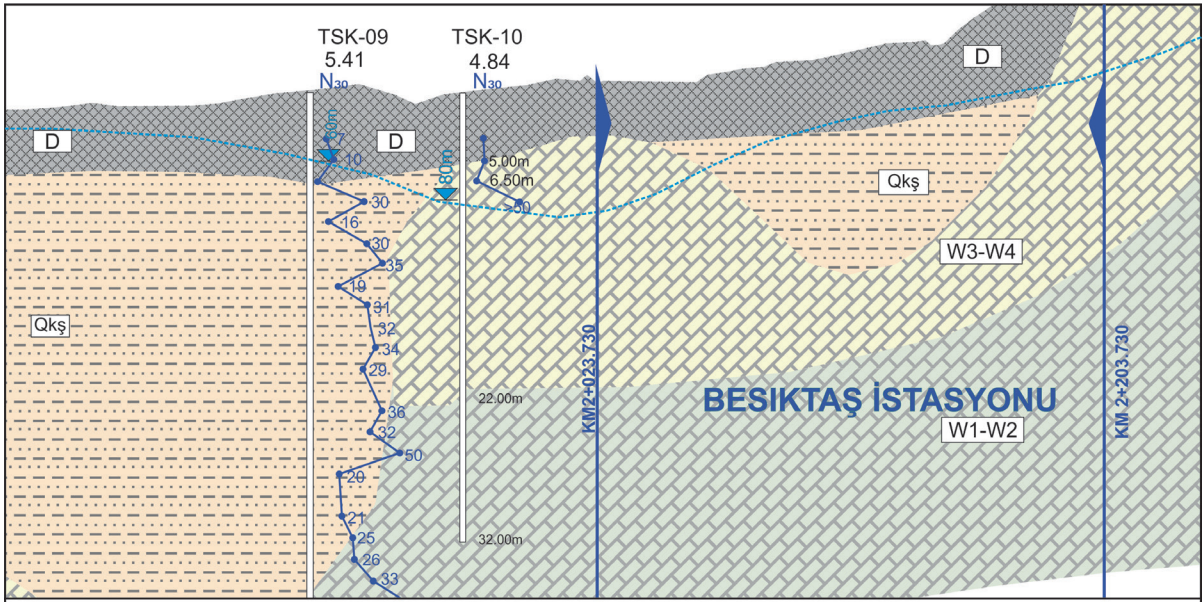
İstanbul'un Avrupa yakasında geniş alanları kaplayan kumtaşı, silttaşı ve kilitaşıdan oluşan Trakya formasyonunda ayrışma derinlikleri, dayklar, eklemler, kilitaşının yetersiz taşıma gücünden dolayı kazı mekaniği açısından sorunludur. Ayrıca, Trakya formasyonu yoğun olarak faylanmış ve kıvrılmıştır (Şekil 6 ve 7). Bu nedenle, temel kazıları ile fay ve kıvrım gibi yapıların uygun olmayan doğrultu ve eğimleri sorunlara neden olmaktadır. NATM kullanılan projenin bu kesiminde tüneller, makas

tüneli T tipi olarak açılmakta ve 14.50 m'ye kadar genişlemektedir. Yükseklikleri 9.80 m'ye çıkarken, tünellerin yeryüzü ile arasında kalan zemin kesiti yaklaşık 11.00 m'ye inmektedir. Ayrıca makas tünellerinin yanı sıra ana tünellerin de imalatları yapılmaktadır. Dar bir alanda açılan bu tünellerde, sıg örtü yükü, değişken ve suya doygun zemin koşulları, ortamdaki gerilme dağılımının değişmesi ve birincil destek sisteminin özelliklerine bağlı olarak Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda 3 m derinliğinde, 75 cm çapında bir göçük meydana gelmiştir (Şekil 8).



Şekil 6. Tünel güzergahının Beşiktaş istasyonu kesimi (km: 2 + 023.730 ile 2 + 203.730) (Artson Geoteknik, 2016 a,b).

Figure 6. Beşiktaş station section of the tunnel alignment (km: 2 + 023.730 to 2 + 203.730) (Artson Geotechnic, 2016 a, b).



Şekil 7. Beşiktaş istasyonu ve civarının jeolojik kesiti (km: 2 + 023.730 ile 2 + 203.730) (Artson Geoteknik, 2016 a, b).

Figure 7. Geological section of Beşiktaş station and its vicinity (km: 2 + 023.730 to 2 + 203.730) (Artson Geotechnic, 2016 a, b).



Şekil 8. Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda (Kabataş-Mecidiyeköy Hattı) meydana gelen göçük olayının yüzeydeki hasarları.

Figure 8. Damages at the surface due to the collapse occurred at the Beşiktaş Barbaros Boulevard (Kabataş-Mecidiyeköy Line).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Kabataş-Mecidiyeköy Tünel kazılarının, hemen hemen tamamına yakınının (asgari %95'i oranında) Trakya formasyonu içinde, çok az bir kısmı (yaklaşık %5'i) ise Ceylan formasyonu içinde bulunmaktadır. Ceylan formasyonu kalkerli sert kilttaşlarından oluşmuştur, tabanında çakıl ve kum katkılı seviyeler yer almaktadır. Trakya formasyonu ise, başlıca kumtaşı-şeyl (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası) araldanmasından oluşmakta ve farklı ayrışma seviyelerini içermektedir. Tünel kazılarında ağırlıklı olarak çok-orta derecede ayrışmış (W3-W4) kayaç seviyesi, nispeten daha az oranda ise az ayrışmış (W1) ve ayrışmamış (W2) kayaç seviyelerinin kazılması beklenmektedir. Depo sahası kazılarında ise orta derecede ayrışmış (W3) ve çok ayrışmış (W4) derecede kayaç kazılması beklenmektedir. Trakya formasyonu (kaya birimi) genel olarak kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kiltası araldanmasından oluşmakla birlikte, tünel kazıları sırasında yer yer bu litolojilerden herhangi birinin baskın olduğu kesimlerle de karşılaşılabilir. Trakya formasyonu, yaygın şekilde kıvrımlı ve eklemli olmanın yanı sıra, sıkça makaslanma ve fay zonları ile kesilmiştir. Söz konusu zonlar genellikle parçalanmış-milonitleşmiş ve killeşmiştir.

Tünel güzergahındaki tüm zemin-kayaç seviyeleri mühendislik ve tünel mühendisliği açısından değerlendirilmiş, sınıflandırılmış ve tasarım için zemin parametreleri önerilmiştir. Jeolojik yapı olarak üstte yer alan Ceylan formasyonu, mühendislik özellikleri açısından sert zemin olarak değerlendirilmiştir. Trakya formasyonu ise mühendislik özellikleri açısından, tamamen ayrışmış (W5), çok - orta derecede ayrışmış (W3-W4) ve az ayrışmış - ayrışmamış (W1-W2) kayaç seviyeleri olmak üzere üç seviye halinde ele alınmıştır. Tamamen

ayrışmış kayaç seviyesi zemin, diğer iki seviye ise kayaç olarak değerlendirilmiştir. Zemin-kayaç birimlerine ait jeoteknik parametrelerin değerlendirilmesi sonucunda geçiş zonlarında dikkatli olunması gerekmektedir. Güzergahı oluşturan farklı zemin - kayaç ortamları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Yükseklikleri 9.80 m'ye çıkarken, tünellerin yeryüzü ile arasında kalan zemin kesiti yaklaşık 11.00 m'ye inmektedir. Ayrıca, makas tünellerinin yanı sıra ana tüneller de yapılmaktadır. Dar bir alanda açılan bu tünellerde, sığ örtü yükü, değişken ve suya doygun zemin koşulları, ortamdaki gerilme dağılımının değişmesi ve birincil destek sisteminin özelliklerine bağlı olarak; Beşiktaş Barbaros Bulvarı'nda 3 m derinliğinde, 75 cm çapında göçük meydana gelmiştir. Bu nedenle, tünellerin genellikle sığ derinlikte yer alması nedeniyle, özellikle kayanın aşırı ezik olduğu kesimlerde göçük ve dolayısıyla yüzeyde oturma ile çökme tehlikelerine karşı dikkatli olunmalıdır. Otoyollar ve yan yolların altından geçen bu tür tüneller, benzer nedenlerle stabilite açısından kritik dengededir. Kritik yapıların bulunduğu bölgelerin geçişinde kazının kontrollü olarak yapılması, tünel içinde ve yüzeyde özenli şekilde jeolojik-jeoteknik ölçümler yapılması gereklidir. Jeolojik veriler ve kayaçların niteliği çok uygun gözükse bile, tünelin inşası sırasında kazı ve tünel emniyeti için gerekli deformasyon ölçümlerinin uzun süreli olarak mutlaka yapılması gerekmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazar bu çalışmadaki katkılarından dolayı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Raylı Sistem Daire Başkanlığı Avrupa Yakası Raylı Sistem Müdürlüğü, ALSİM ALARKO Sanayi Tesisleri ve Ticaret A.Ş., EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik, ARTSON Geoteknik Mühendislik

ve Müşavirlik şirketine teşekkürlerini sunar. Ayrıca, yazar makalenin geliştirilmesindeki değerli katkılarından dolayı editör Prof. Dr. Tamer TOPAL ve hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Arıç, C., 1955. Haliç-Küçükçekmece Gölü bölgesinin jeolojisi, Doktora Tezi, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
- Arıoğlu, B., Yüksel, A., Arıoğlu, E., 2002. İzmir metro projesi Nenehatun tünelineki geoteknik çalışmalar ve değerlendirilmesi. ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim 2002, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye. 358-368.
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016a. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Geoteknik etüd raporu. Cilt 1, İstanbul (yayımlanmamış).
- ARTSON Geoteknik (Artson Araştırma Sondajları Mühendislik Ticaret Limitet Şirketi), 2016b. İstanbul Metrosu Kabataş-Mecidiyeköy arası Jeolojik-Geoteknik etüd raporu. Cilt 2, İstanbul (yayımlanmamış).
- ÖNORM B 2203-1. 2001. Austrian Standards Institute, Underground works, Part 1: Cyclic Driving. Works contract, Issue 2001-12-01.
- Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6 (4), 189–236.
- Bieniawski, Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends. *Comprehensive Rock Engineering* Pergamon, 3, 553 s.
- Dalgıç, S., 2004. Factors affecting the greater damage in the Avcılar area of Istanbul during the 17 August 1999 Izmit Earthquake. *Bulletin of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Bulletin of Engineering Geology and Environment, (63) 221 – 232.
- Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.E., Schmidt, B., 1969. Design of tunnel liners and support systems, Report to UMTA, DOT, available through NTIS.
- Deere, D.U., Merrifit, A.H., Cording, E.J., 1974. Engineering geology and underground construction. 2nd International Congress of Engineering Geology, Sao Paulo, Brasil, 18-24 August, 1974.
- Güven, G., 2009. İstanbul metrosu Otogar-Kirazlı 1 arasındaki mühendislik jeolojisi ve tünel kazılarına bağlı oluşan deformasyonların değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Programı, İstanbul (yayımlanmamış).
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground excavations in rock. *Institutions of Mining and Metallurgy*. London, 382 s.
- Hoek, E., 2000. Kaya Mühendisliği. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 319 s.
- Ketin, İ., 1991. İstanbul ve dolayının jeoloji haritası. İSKİ, İstanbul (yayımlanmamış).
- Seymen, İ., 1995. İzmit Körfezi ve çevresinin jeolojisi, İzmit Körfezi Kuvarterner istifi. (ed. Meriç, E.), Kocaeli Valiliği Çevre Koruma Vakfı, Kocaeli.
- Terzaghi, K., 1950. Geologic aspects of soft ground tunneling. Chapter 11 in *Applied Sedimentation*, R. Task and D. Parker, eds. New York, John Wiley & Sons.
- Tunçdemir, H., 1998. Arazi basıncının dengelenmesi esasına göre çalışan tam cephe tünel açma makinelerinin kazı performansını etkileyen zemin özellikleri ve İzmir Metrosu örneği. 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 22-23 Ekim, Zonguldak.
- Ulusay, R., Sönmez, H., 2000. Hoek-Brown yenilme ölçütüne ilişkin değişiklik önerileri ve bunların uygulanabilirliği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 23/24 (1), 1-21.



Araştırma Makalesi / Research Article

Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin Yapım Aşamalarında Karşılaşılan Sorunların Değerlendirilmesi

Evaluation of Problems Encountered During the Construction of the Çamlıca Hill Access Tunnels

Feyat TAZ¹, Ömer ÜNDÜL², Hasan DENEK³

¹İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İSTANBUL

²İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

³Taşıyapı İnşaat Taahhüt AŞ., İSTANBUL

Geliş (Received): 19 Eylül (September) 2017 / Düzeltme (Revised): 02 Nisan (April) 2018 / Kabul (Accepted): 15 Mayıs (May) 2018

ÖZ

Nüfusu hızla artan İstanbul'da, ulaşımındaki aksamaların en aza indirilmesi için metro ve tünel gibi yeraltı yapıları inşa edilmektedir. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri, Çamlıca Cami'ne karayolu ulaşımını sağlamak amacıyla inşa edilmektedir. Tüneller, İstanbul Paleozoyik istifinde yer alan Kurtköy, Aydos ve Gözdağ formasyonları ile bu birimlere sokulum yapan Kretase yaşlı dayklar içerisinde açılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerine ait T2 Tüneli (km:0+795-1+066) ile Yaklaşım Tünelindeki (km:0+275-0+308) kazı ve destek çalışmaları ve meydana gelen jeo-mühendislik sorunlar, sayısal analizler ile birlikte değerlendirilmiştir. Tünel çalışmaları sırasında, özellikle kazı ve destek sistemlerinin yer yer yetersizliği nedeniyle ilave iyileştirme çalışmaları yapılmış ve buna rağmen yeterli duraylılık koşullarının sağlanamadığı bölgeler ile karşılaşmıştır. Tünel çalışmaları sırasında genel olarak aşırı sökülme, tünel içerisine doğru gelişen deformasyonlar ve su sızıntıları jeo-mühendislik sorunlar olarak belirlenmiştir. Tünel ilerleme hızına ve maliyetine etki eden bu sorunların değerlendirilmesinde bölgenin genel jeolojik özellikleri, tünel kazısı sırasında karşılaşılan birimlerin malzeme özellikleri, kaya kütle özellikleri, kazı ve destek uygulamaları ile güncel tünel içi gözlemler birlikte ele alınmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen kaya malzemesi ve kaya kütle parametreleri, Hoek-Brown yenilme ölçütünü ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan iki boyutlu sayısal analiz yardımlarıyla (Rocscience © Phase 2D) değerlendirilmiştir. Tünelin incelenen kesimleri için hazırlanan jeolojik en kesit modelleri sayısal olarak analiz edilmiş, elastik-plastik zon sınırları ve kalınlıkları belirlenmiş, yukarıda ifade edilen sorunlara neden olan jeolojik sınır koşulların tariflenmesine çalışılmıştır. Laboratuvar verileri, tünel içindeki gözlemler ve sayısal analizlerin birlikte değerlendirilmesi ile ortasık eklemlili killi kumtaşı ve arkozik kumtaşından oluşan ileri derecede ve tamamen ayrılmış (V-VI) seviyeler ile özellikle zayıf zonların (makaslama, fay vb.) bulunduğu kaya ortamı, aşırı sökülme potansiyelinin en yüksek olduğu alanlar olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, az-orta çatlaklı, az-orta derecede (II-III) ayrışmanın gözlemlendiği, yapısal unsurların (fay, makaslama zonu gibi) olmadığı arkozik kumtaşı ve kuvars arenit kaya ortamlarında ise aşırı sökülme potansiyelinin düşük olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri, İstanbul Paleozoyik istifi, jeo-mühendislik özellikler, sayısal modelleme.

ABSTRACT

In Istanbul, where population is rapidly increasing, underground engineering structures such as subways and tunnels are being constructed to minimize disruptions in transportation. Çamlıca Hill Access Tunnels are constructed to access road transportation to Çamlıca Mosque. Tunnels are excavated in the Kurtköy, Aydos and Gözdağ formations in Istanbul Paleozoic sequence and in the Cretaceous dykes that intrude into these units. Within the scope of this study, excavation and support works and geo-engineering problems of T2 Tunnel (km:0+795 - 1+066) and Approach Tunnel (km:0+275 - 0+308) belonging to Çamlıca Hill Access Tunnels are studied to be evaluated together with numerical analyses. During tunneling works, additional improvement works have been done especially due to inadequate excavation and support systems. However, it has been determined that proper stability conditions can not be achieved in the tunnels. In addition, generally overbreak, deformations and water inflow are other geo-engineering problems. In the evaluation of these problems affecting the rate of advance and cost, the geological characteristics of the region, the rock properties of the units encountered during the tunnel excavation, rock mass characteristics, excavation and support applications, and current tunnel observations are discussed together. The rock material and rock mass parameters obtained in the study were evaluated in two dimensional numerical analysis based on Hoek-Brown failure criterion and finite element method (Rocscience © Phase 2D software). Longitudinal geological models that were prepared for the examined sections of the tunnel, elastic-plastic zone boundaries and thickness were determined, geological boundary conditions that caused above-mentioned problems have been tried to describe. Together with the evaluation of the laboratory data, observations in tunnels and numerical analyses, rock environment that moderate-frequently jointed clayey sandstone and arkosic sandstone with highly and completely weathered (V-VI) levels and especially weak zones (shear, faults etc.) were determined the highest overbreak potential area. In addition it has been revealed overbreak potential is low at rock environment that is slight-moderately fractured, slight-moderately (II-III) weathered arkosic sandstones and quartz arenite without any structural component (fault, shear zone etc.).

Keywords: Çamlıca Hill Access Tunnels, Istanbul Paleozoic sequence, geo-engineering properties, numerical analyses.

GİRİŞ

Kaya ortamlarında açılan tünellerde, kaya biriminin fiziksel ve mekanik özellikleri, süreksizlik özellikleri (faylar, kıvrımlar vb.), ayrışma, magmatik sokulumlar, yeraltı suyu ve doğal gerilmeler gibi bölgenin jeolojisinden kaynaklı birçok sorun gelişebilmektedir. Bu sebeplerin bir veya birkaçının birlikte etkilemesinden dolayı, İstanbul Paleozoyik istifinde açılan tünellerde aşırı sökülme, göçme, kaya patlaması, tünel içine su girişi, tünel içine doğru deformasyon artışı gibi sorunlar gelişmektedir (Eriş ve Vardar, 1994; Varol ve Dalgıç, 2006). Benzer olarak, Yılmaz vd. (1994) İstanbul Paleozoyik istiftteki Karbonifer çökelleri olan kıltaşı, siltaşı, kumtaşı ve bunlara sokulum yapan diyabaz dayklarda açılan İstanbul Metrosu

ayna kazılarında aşırı sökümlerin geliştiğine değinmiştir. Albayrak (1994), İstanbul Metrosu, Elmadağ Tüneli ve diğer bazı demiryolu tünellerindeki problemlere ilişkin yapmış olduğu çalışmada, tünel aynasının kuru olması durumunda dahi çatlaklardaki kil ve yağlı killerin duraysızlık sorunları oluşturabileceğini ifade etmiştir. Dalgıç (2000), Beykoz Tüneli açımı sırasında jeolojik koşullara uygun seçilmeyen destek sistemleri nedeniyle kaya düşmesi ve çökme sorunlarıyla karşılaşıldığını ifade etmiştir. Dalgıç (2002) İstanbul Metrosu kazı çalışmalarında, Volkmann ve Schubert (2005) ise Birgl Tüneli kazı ve destek sistemlerinin optimizasyonunu araştırdıkları çalışmalar sırasında, yaptıkları yerinde ölçümler sonrası tünel içine doğru gerilmelerin arttığını ve buna bağlı deformasyonların geliştiğini belirtmişlerdir.

Benzer şekilde farklı jeolojik ortamların (birim sınırları, zayıflık zonları, dayklar, yeraltı suyu) yaratacağı değişken gerilme koşullarının TBM performansına etki edebileceği Kadıköy-Kartal Metro kazısı örneğinde ifade edilmiştir (Bilgin vd. 2008). Bu çalışmaların yanı sıra, Türkiye'deki çeşitli tünellerde, farklı jeomekanik özelliklere sahip kaya ortamlarında TBM sıkışması, duraysızlıklar vb. sorunlara bağlı olarak zaman ve maliyet artışlarının olduğu Bilgin (2016) tarafından belirtilmiştir.

Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri (ÇTUT) güzergâhında farklı jeo-mühendislik özellikler gösteren ortamlar olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, önceki çalışmalarda da belirtilen jeolojik yapıyla etkileşimli sorunların değerlendirilmesi için ÇTUT Yaklaşım Tüneli km:0+275 - km:0+308 arası ve T2 Tünelinin km:0+795 - km:1+066 arası incelenmiştir (Şekil 1). Tünel güzergâhının jeolojik özellikleri (faylar, birim sınırları, dayklar vb.), kaya malzemesi ve kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri (birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı, ayrışma, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu durumu vb.), uygulanan kazı ve destek sistemleri dikkate alınarak, tünel açımı sırasında karşılaşılan jeo-mühendislik sorunlar değerlendirilmiştir. Tünel projelendirilmesi aşamasında belirlenen RMR kaya kütle sınıflaması da dikkate alınarak, GSI sınıflaması ilgili çizelge yardımı ile belirlenmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır. Kaya kütle sınıflamalarının tünel çevresindeki gerilme dağılımları ve deformasyonları tanımlamadaki yetersizliğinden dolayı ortamdaki gerilmeleri de dikkate alan sayısal yöntemlerin kaya kütle sınıflamaları ile birlikte kullanılmasının önemli olduğu literatürdeki pek çok çalışmada da vurgulandığı üzere bilinmektedir (Dalgıç, 2003; Geniş vd., 2007; Özsan vd., 2009; Gürocak, 2011; Mahmutoglu, 2011). Bu nedenle, meydana gelen jeolojik etkileşimli sorunların

anlaşılabilmesine yönelik değerlendirmelerde kullanılmak üzere, kaya malzemesi ve kaya kütle parametreleri, Hoek-Brown yenilme ölçütünü ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan iki boyutlu sayısal analizlerde dikkate alınmış ve bu amaçla (Rocscience Phase 2D Version 8.005, (2011)) yazılımı kullanılmıştır.

ÖRNEKLERİN TANIMLANMASI VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Çalışma sırasında, ÇTUT Yaklaşım ve T2 Tünellerinin açımı sırasında karşılaşılan kaya birimlerinden en az 40x40x40cm boyutlarında blok örnekler tünel aynasından alınmıştır. Örneklerin ait oldukları birimlere ilişkin tanımlamalar yapılmıştır. Blok örnekler genel olarak, sedimenter kırıntılı kayalar ve bu kayalara sokulum yapan dayklardan alınmıştır. Sedimenter kayalar genelde ince taneli kumtaşı, kuvars arenit ve arkozik kumtaşı-çakıltaşından oluşmaktadır. Dayklar ise sıkı, sert, az-orta derecede ayrışmanın gözlemlendiği, açık yeşil renkli olarak gözlenmiştir.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri için araziden alınan blok örneklerden boyu çapının iki katı olan 54 mm çaplı 37 adet karot örneği hazırlanmıştır. Çekme dayanımı deneyleri için ise boyu çapının yarısına eşit olacak şekilde 54 mm çaplı 24 adet örnek oluşturulmuştur. Tek eksenli sıkışma dayanımı ve Brazilyan çekme deneyi, bilgisayar kontrollü ve servo destekli 3000 kN kapasiteli rijit yükleme aygıtı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında karot örneklerinin bazıları için 2000 kN kapasiteli cihazlar yardımıyla elastisite modülü ve poisson oranı değerleri elde edilmiştir. Fiziksel deneyler kapsamında mekanik deneyler için hazırlanan karot örnekleri üzerinde kuru ve suya doygun birim hacim ağırlıklar ile etkin porozite değerleri tayin edilmiştir. Örnek hazırlama işlemleri ile fiziksel ve mekanik deneyler ISRM (1981 ve 2007) tarafından önerilen yöntemlere göre

tamamlanmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılan örneklerle ait ince kesitler çalışılan kayaların petrografik özelliklerini belirlemek için hazırlanmıştır. İnce kesit görüntüleri Leitz Orthoplan mikroskop ve Leica Suite Imaging yazılımı ile elde edilmiştir.

Laboratuvar çalışmalarının ardından, incelenen tünel kesimlerinde meydana gelen jeo-mühendislik sorunlara yönelik olarak sayısal analizler, Rocscience Phase 2D Version 8.005 (2011) bilgisayar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tünel çalışmalarının bulunduğu kaya ortamı dikkate alınarak, eklemli kaya ortamı için önerilen Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme modeli tercih edilmiştir. Farklı kaya ortamı, kazı ve destek sistemi ve tünel içinde gelişen jeo-mühendislik sorunlar dikkate alınarak iki tünel aynası üzerinde detaylı analizler yapılmıştır.

ÇALIŞMA ALANININ GENEL JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

Tünel güzergâhında İstanbul Paleozoyik istifeye ait sedimenter kırıntılı kaya birimleri olan Kurtköy formasyonu, Aydos formasyonu ve Gözdağ formasyonu yer almaktadır (McCallaen ve Ketin, 1947; Altınlı, 1954; Ketin, 1958; Abdüsselamoğlu, 1963; Önalın, 1982; Özgül, 2011; Lom vd., 2016). Ayrıca bu kaya birimlere sokulum yapan yeşil renkli diyabaz dayklar gözlenmiştir (Şekil 2). Tünel güzergâhında stratigrafik olarak en altta yer alan Alt Ordovisiyen yaşlı Kurtköy formasyonu genel olarak mor renkli, kiltası, silttaşı, kumtaşı ve çakıltaşından oluşan arkoz bileşimli kırıntılı kayalardan oluşmaktadır (Kaya, 1978; Önalın, 1981 ve 1982). Tünel güzergâhında ise birim, sert, az ayrılmış, yer yer yeşilimsi gri ve mor renkli çakıllı kumtaşı seviyeleri ile yumuşak, orta-ileri derecede ayrılmış, mor renkli çakıllı, killi, siltli kumtaşı seviyeleri şeklinde gözlenmiştir (Şekil

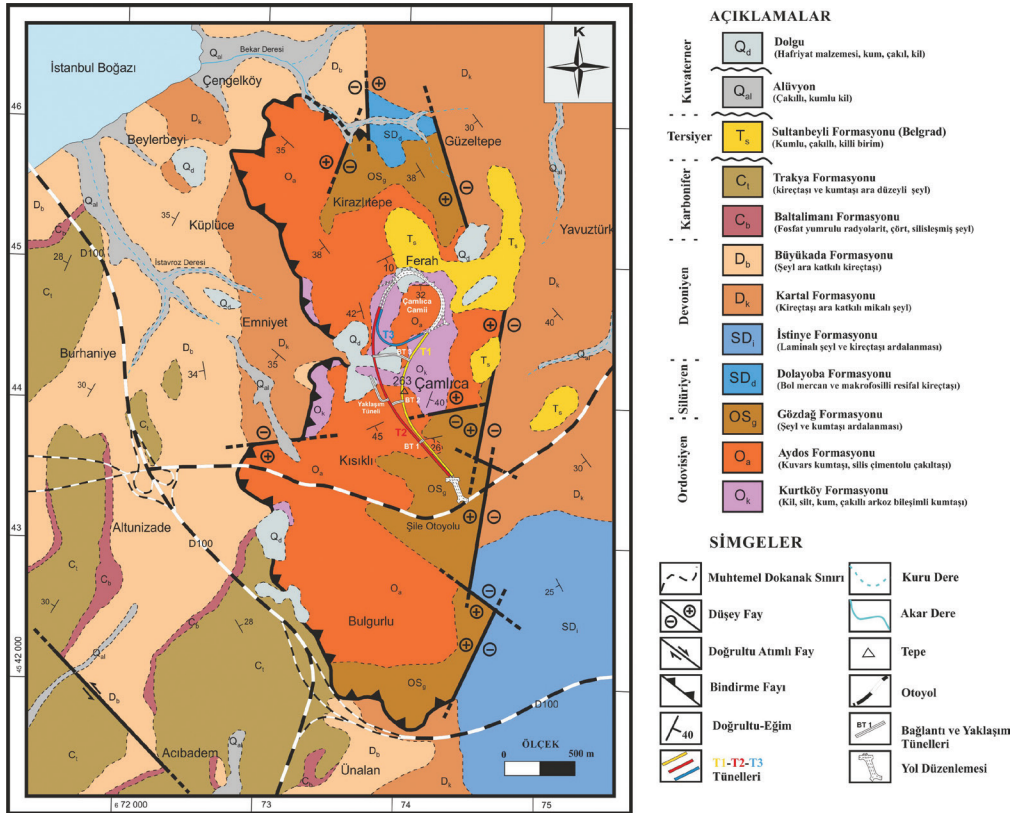
3). Birimin ince kesit görüntülerinde metamorfik kayaç parçaları (fillat, kuvarsit, gnays) belirgin olarak gözlenmektedir. Matriks kısmı daha ince taneli olup serizitleşmeler gözlenmektedir. (Şekil 4a ve 4b). Bu birim üzerinde uyumlu olarak bulunan Üst Ordovisiyen yaşlı Aydos formasyonu genel olarak iri taneli orto-kuvarsit, kuvars arenit, kuvarslı kumtaşından oluşmaktadır (Ketin, 1958; Baykal ve Kaya, 1965; Kaya, 1978; Önalın, 1981 ve 1982). Tünel güzergâhında ise birim, sert, masif, yer yer taze, çoğu bölgede ise az-orta derecede ayrılmış, kızıl kahverengi, açık sarı renkli, kuvarslı kumtaşı, kuvars arenit seviyeleri ile belirgindir (Şekil 3c). Birime ait ince kesit görüntülerinde ise farklı boyutta kuvars minerallerinin birbirine kenetlenmiş durumda olduğu görünmektedir (Şekil 4c ve 4d). Genel olarak yeşilimsi gri, ayrılmaya maruz kalmış kesimleri sarımsı kahverengi renkli, ince tabakalı-laminallı silttaşı-şeyl ve yeşilimsi gri renkli, ince-orta tabakalı kumtaşı ardalanmasından oluşan Gözdağ formasyonu, Aydos formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmektedir (Önalın, 1981 ve 1982; Tüysüz vd., 2004). Gözdağ formasyonu tünel güzergâhında, dayanımı düşük, orta-ileri derecede ayrılmış, yeşilimsi gri ve sarımsı kahverengi renkli, ince taneli kumtaşı seviyeleri ile tespit edilmiştir. Kurtköy formasyonu ile uyumsuz olarak dokanak yaptığı kesimleri de gözlenmiştir (Şekil 3d). Çalışma alanında gerek sondajlarda ve gerekse tünel kazı kesimlerinde gözlenen, Paleozoyik yaşlı istifleri sık sık kesen Üst Kretase yaşlı (58.9 - 72.5 Ma, Aysal vd., 2015) yeşil, koyu yeşil renkli diyabaz bileşimli dayklar mevcuttur. Petrografik incelemelere göre dayklar genel olarak amfiboller ve piroksenlerden oluşmaktadır. Dayklar ofitik-subofitik dokulu, kısmen kaolinitik, yer yer karbonatlaşma, kloritleşme ve opaklaşma türü alterasyonlar gözlenmektedir (Şekil 3e ve Şekil 4e-4f). Bölgedeki Paleozoyik yaşlı birimler, bindirme fayları ile iç içe geçmiş biçimdedir.

Taz, Ündül, Denek

Çalışma bölgesindeki bindirme fayı McCallein ve Ketin (1947) tarafından şariyaj olarak tanımlanmış ve bölgedeki gerilmeleri etkilediği düşünülmüştür. Özgül (2011), Çamlıca Tepesi'ni oluşturan Ordovisiyen yaşlı Aydos ve Kurtköy formasyonlarının yaklaşık 35° doğuya eğimli ters faylanma ile Silüriyen-Devoniyen yaşlı kaya birimlerine bindirdiğine değinmiştir ve Çamlıca Bindirmesi olarak tanımlanmıştır. Çalışmamız sırasında, tünel güzergâhında Kurtköy formasyonuna ait mor renkli çakıllı, killi, kumtaşı seviyeleri ile Gözdağ formasyonunun yeşilimsi, sarımsı kahverengi renkli, ince taneli kumtaşı seviyelerinin dokanak yaptığı kesimin uyumsuz olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3d).

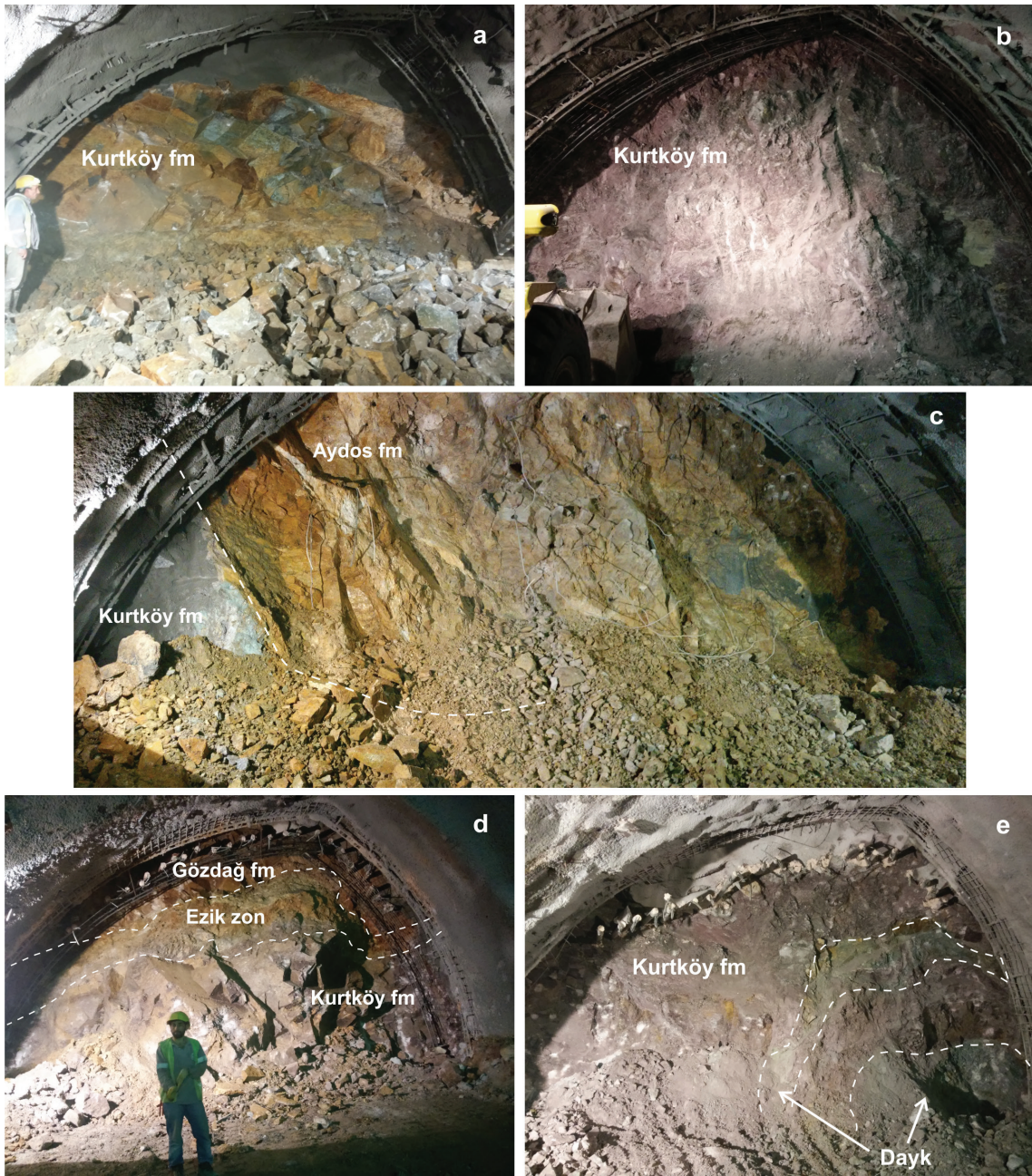
Bu uyumsuzluğun Çamlıca Bindirmesine ait ters fay düzlemlerinden birine ait olabileceği düşünülmektedir (Şekil 5).

Çalışma bölgesinde toplamda 50 adet süreksizlik ölçümü yapılmıştır. Ölçülmüş süreksizlik yönelimleri stereografik projeksiyona dayalı olarak ve Rocscience © Dips v.6.008 (2013) yazılımı kullanılarak ana süreksizlik setleri belirlenmiştir. Ana süreksizliklerin eğim yönü ve açıları 181/27, 105/40 ve 53/22 olarak elde edilmiştir (Şekil 6). Aynı şekil üzerinde incelemesi yapılan tünel kesiminin tünel doğrultusu da (K30B) gösterilmiş olup doğrultu boyunca kesişen süreksizliklerin varlığı belirgindir.



Şekil 2. Çamlıca bölgesinin jeoloji haritası (Özgül, 2011'den değiştirilerek).

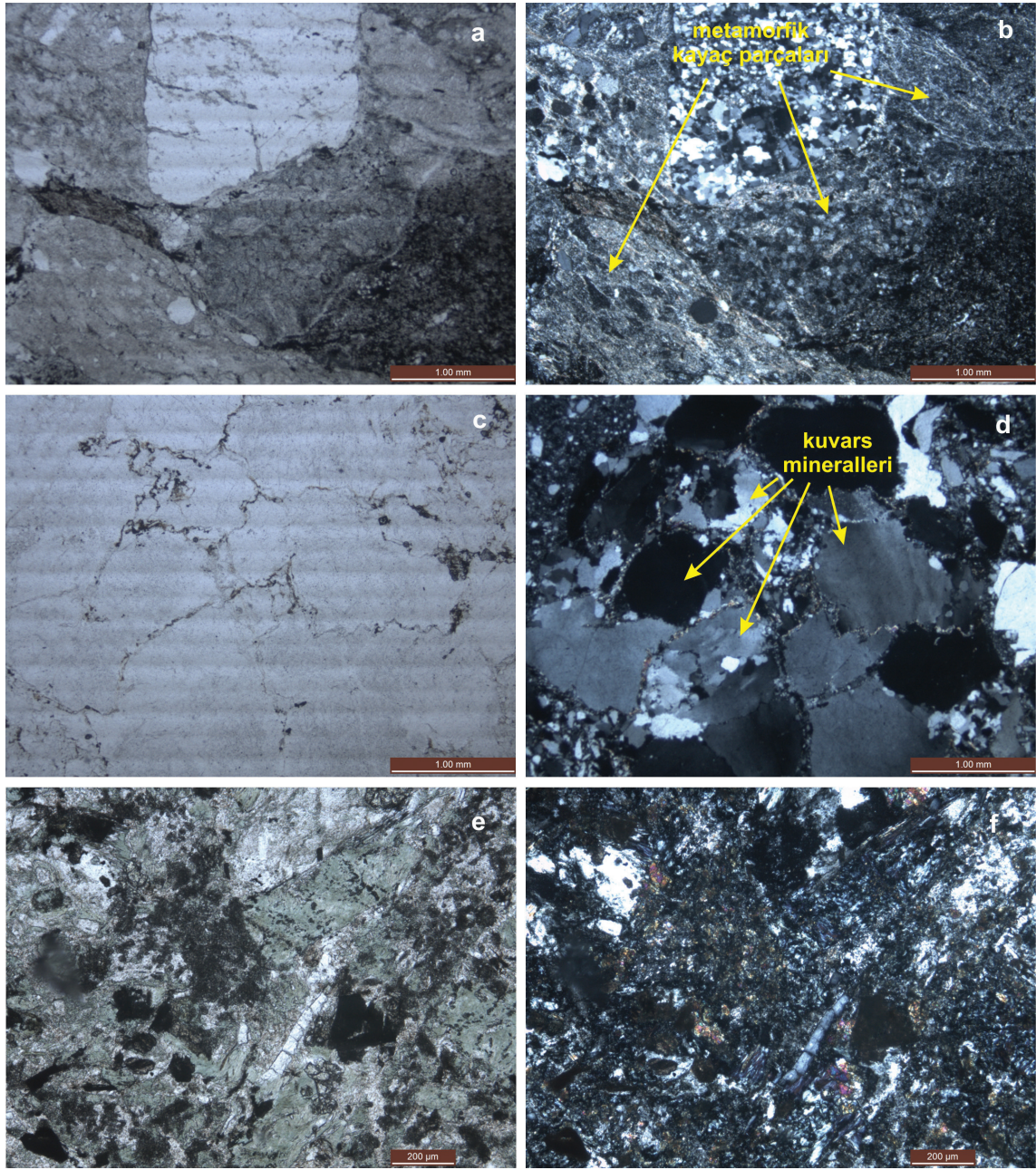
Figure 2. Geological map of the Çamlıca region (modified from Özgül, 2011).



Şekil 3. T2 Tünel güzergâhında karşılaşılan kaya birimlerinin ayna görüntüleri; a) km:0+974, b) km:1+054, c) km:0+882, d) km:0+801, e) km:1+027.

Figure 3. Rock units encountered at tunnel face on the T2 tunnel route; a) km:0+974, b) km:1+054, c) km:0+882, d) km:0+801, e) km:1+027.

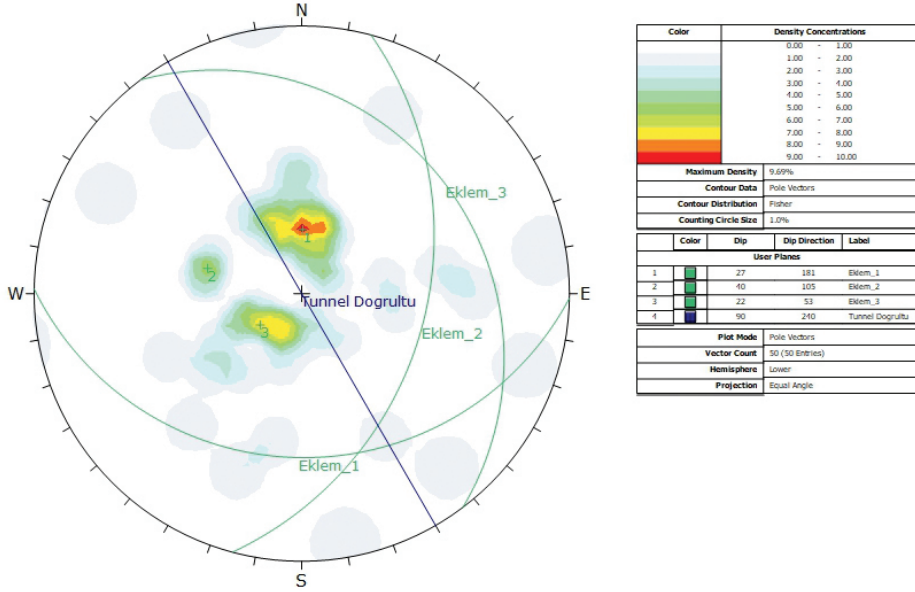
Taz, Ündül, Denek



Şekil 4. T2 Tünel güzergâhında karşılaşılan kaya birimlerine ait ince kesit görüntüleri a) Kurtköy formasyonu tek nikol, b) Kurtköy formasyonu çift nikol, c) Aydos formasyonu tek nikol, d) Aydos formasyonu çift nikol, e) Dayk tek nikol, f) Dayk çift nikol.

Figure 4. Thin section views of the rock units encountered on the T2 tunnel route; a) Kurtköy formation single nicol, b) Kurtköy formation cross nicols, c) Aydos formation single nicol, d) Aydos formation cross nicol, e) Dike single nicol, f) Dike cross nicol.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 6. Ana süreksizlik setlerinin stereografik diyagramı.

Figure 6. Stereographic diagram of the main discontinuity sets.

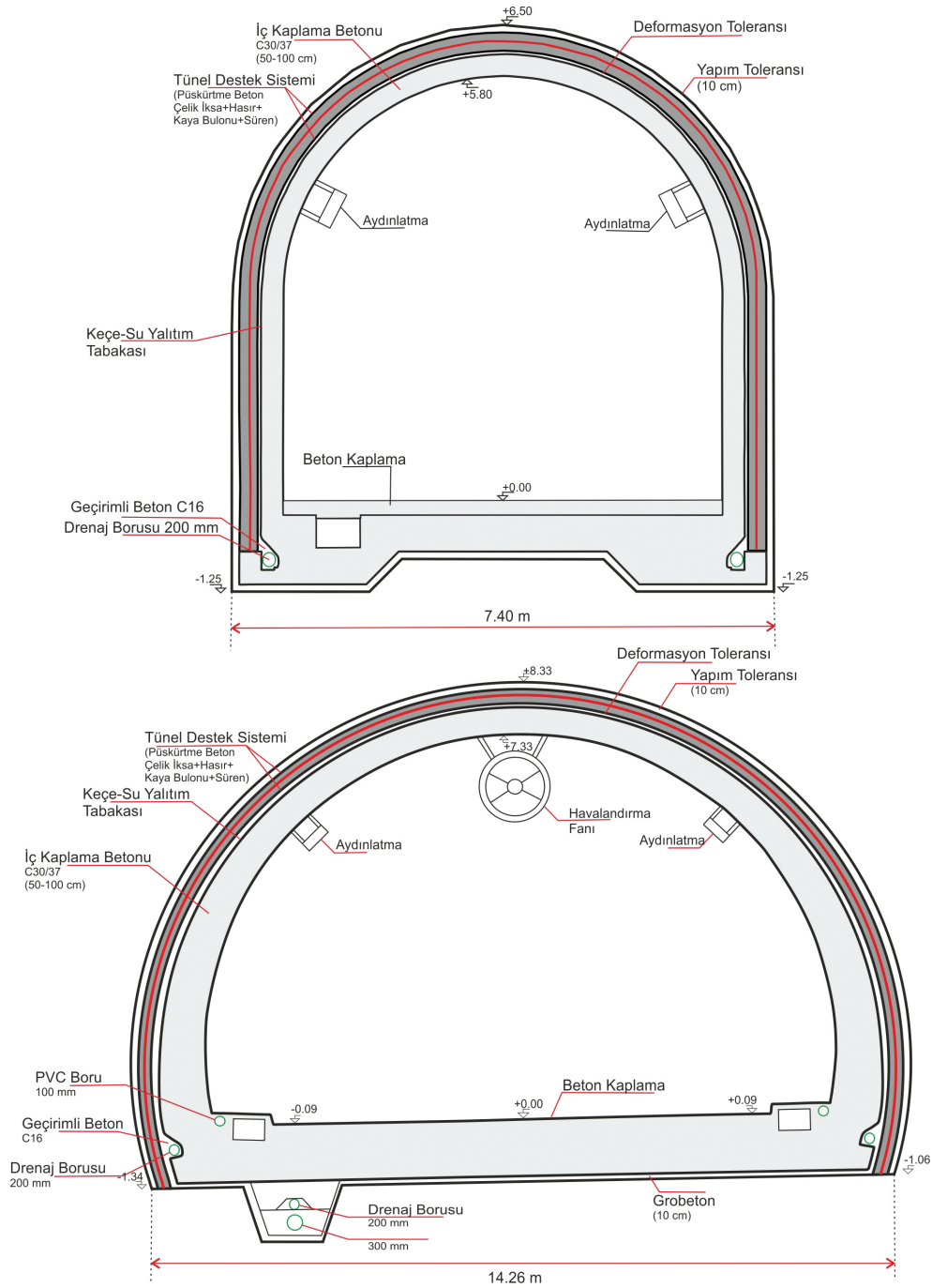
TÜNEL AÇIMINDA UYGULANAN KAZI VE DESTEK SİSTEMLERİ

Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri üç ana tünel (T1, T2, T3), üç bağlantı tüneli (BT1, BT2, BT3) ve bir Yaklaşım Tüneli olarak projelendirilmiştir (Şekil 1). İncelemenin yapıldığı T2 Tüneli at nalı şeklinde olup yüksekliği 9.50 m ve taban genişliği 14.26 m'dir (Şekil 7). Yaklaşım Tüneli ise alt kesimi köşeli, üst kesimi ise kemerli geometriye sahip 7.75 m yüksekliğinde ve 7.4 m genişliğindedir (Şekil 7). Çalışılan tünel kesimlerinin kazı ve destek çalışmalarında NATM yöntemi kullanılmıştır. Tünel açımı öncesinde kazı paterni ve destek türleri, araştırma sondajları ve saha çalışmalarına göre RMR kaya kütle sınıflaması kullanılarak ÖNORM B2203'e göre tanımlanmıştır. Kazı çalışmalarında önerilen kazı ve destek sistemlerinin yetersiz olduğu tünel kesimlerinde ayna profiline ait

kaya kütle sınıflamaları (RMR) ile karşılığı olan ÖNORM B2203 sınıfları yeniden belirlenmiştir. Bu bağlamda incelenen tünel kesimlerinde, Yaklaşım tüneli km:0+275-km:0+289 arasında C2-2 ve km:0+289-km:0+308 arasında C2-1 kazı ve destek yöntemi uygulanmıştır. T2 Tünelinde ise km:0+795-km:0+888 arası ile km:0+897-km:1+066 arası C3-3, km:0+888-km:895 arası B3 ve km:0+985-km:0+987 arası ise C3-1 kazı ve destek yöntemi uygulanmıştır (Çizelge 1).

TÜNEL ÇALIŞMALARI SIRASINDA GELİŞEN SORUNLAR VE İLERLEME HIZINA ETKİLERİ

İncelemesi yapılan tünel kesimlerinde karşılaşılan ve tünel ilerleme hızını etkileyen önemli sorunların başında aşırı sökülme, tünel içine doğru deformasyon gelişimi (konverjans) ve tünel içine su girişi gelmektedir.



Şekil 7. Yaklaşım ve T2 tünellerinin profili (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016).
 Figure 7. Cross-section of the access and T2 tunnel (Geological and Geotechnical Report of Çamlıca Hill Access Tunnels, 2016).

Taz, Ündül, Denek

Çizelge 1. İncelenen tünel kesimlerinde karşılaşılan kaya birimleri için kazı ve destek sistemleri.

Table 1. Excavation and support systems for the rock units along the tunnel sections examined.

Tünel km	0+795-0+888	0+888-0+895	0+895-0+897	0+897-1+066	
Litoloji	üst kesimde orta ayrılmış kumtaşı (Grovak), alt kesimde orta ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	üst kesimde az ayrılmış kuvars arenit, alt kesimde orta ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	az ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı	orta-çok ayrılmış çakıllı arkozik kumtaşı ve çok ayrılmış kumtaşı-kiltaşı seviyeli fay zonu	
RMR*	23-32	30-32	32-36	14-36-32-35	
ÖNORM B 2203*	C3-3	B3	C3-1	C3-3	
Kazı	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	I. aşamada patlatma, diğer üç aşamada hidrolik kırıcı ile	Hidrolik kırıcı ile dört aşamalı	
İksa	Kafes 200	IPN 160	Kafes 200	Kafes 200	
Hasır	Q295/295 çift kat	Q221/221 çift kat	Q295/295 çift kat	Q295/295 çift kat	
Püskürtme	C25/30	C20/25	C25/30	C25/30	
Beton	30 cm	25 cm	35 cm	30 cm	
Destek Sistemleri*	Kaya Bulonu	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.25 m-boyuna 1 m aralıklı, 11-12 şaşırtmalı	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.50 m aralıklı-boyuna 1.50 m aralıklı, 16-17 şaşırtmalı	PG-IBO 32 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.09 m-boyuna 0.75 m aralıklı, 22-23 şaşırtmalı	PG-IBO 28 mm çaplı, 4 ve 6 m boyunda, radyal 1.25 m-boyuna 1 m aralıklı, 11-12 şaşırtmalı
	Süren	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Çift sıra	4" çaplı, 6 m uzunluğu, 3 m bindirme boyu, 30 cm aralıklı, Tek sıra	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Tek sıra	4" çaplı, 8 m uzunluğu, 4 m bindirme boyu, 25 cm aralıklı, Çift sıra
İlerleme	Üst yarı	0.75-1.00 m	1.25-1.50 m	0.75 m	0.75-1.00 m
	Alt yarı	1.50-2.00 m	2.50-3.00 m	1.50 m	1.50-2.00 m

*Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu (2016).

Aşırı sökülme

İncelemesi yapılan tünel kesimlerinde, tünel ilerleme hızını önemli ölçüde etkileyen üçü Yaklaşım Tüneli (km:0+286, km:0+291 ve km:0+308) ve biri T2 Tüneli (km:0+935) aynalarında olmak üzere toplam dört aşırı sökülme olayı meydana gelmiştir.

Yaklaşım Tüneli km:0+286'da tünel aynasında ayrılmış olan diyabaz daykı ve daykın

üzerinde orta ayrılmış, mor renkli arkoz birimi, km:0+291'de tünel aynasında orta ayrılmış, mor renkli arkoz ve ayrılmış kiltaşı, km:0+308'de tünel aynasında ise tabanda orta-çok ayrılmış, mor renkli arkoz ve ayna üst kesimlerinde orta-çok ayrılmış, sarımsı kahverengi renkli kilttaşları aşırı sökülme olayı öncesinde gözlenmiştir. Ayrıca Yaklaşım Tüneli km:0+308 aynasında aşırı sökülme öncesinde tünel aynasında yaklaşık 3 lt/dk debilik su akışı olduğu belirlenmiştir. En

fazla aşırı sökülme olayının geliştiği T2 Tüneli km:0+935 aynasının üst kısmında, muhtemel bir makaslama zonuna ait killi zayıf zon, alt kısmında ileri derecede ayrılmış, yer yer parçalanmış sarımsı açık kahverengi renkli kumtaşı gözlenmiştir (Şekil 8). Aşırı sökülme sonrası ayna üst kısmından dökülen malzeme, blok boyutu ile kil boyutu aralığında değişmektedir. Bu bağlamda, tünel üst kısmında makaslama

zonu üzerinde yer alan kaya biriminden de blok boyutunda malzemenin geldiği anlaşılmaktadır (Şekil 8d). Bu durum aşırı sökülme olayı sonrasında yapılan teknik incelemede makaslama zonunun tünel üst kısmından 2.5-3m yukarısında sonlandığı şeklindeki ön değerlendirme (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tüneli Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016) bilgisiyle uyumaktadır.



Şekil 8. Tünellerde gelişen aşırı sökülme sonrası ayna görüntüleri a) Yaklaşım tüneli km:0+286, b) Yaklaşım tüneli km:0+291, c) Yaklaşım tüneli km:0+308, d) T2 tüneli km:0+935.

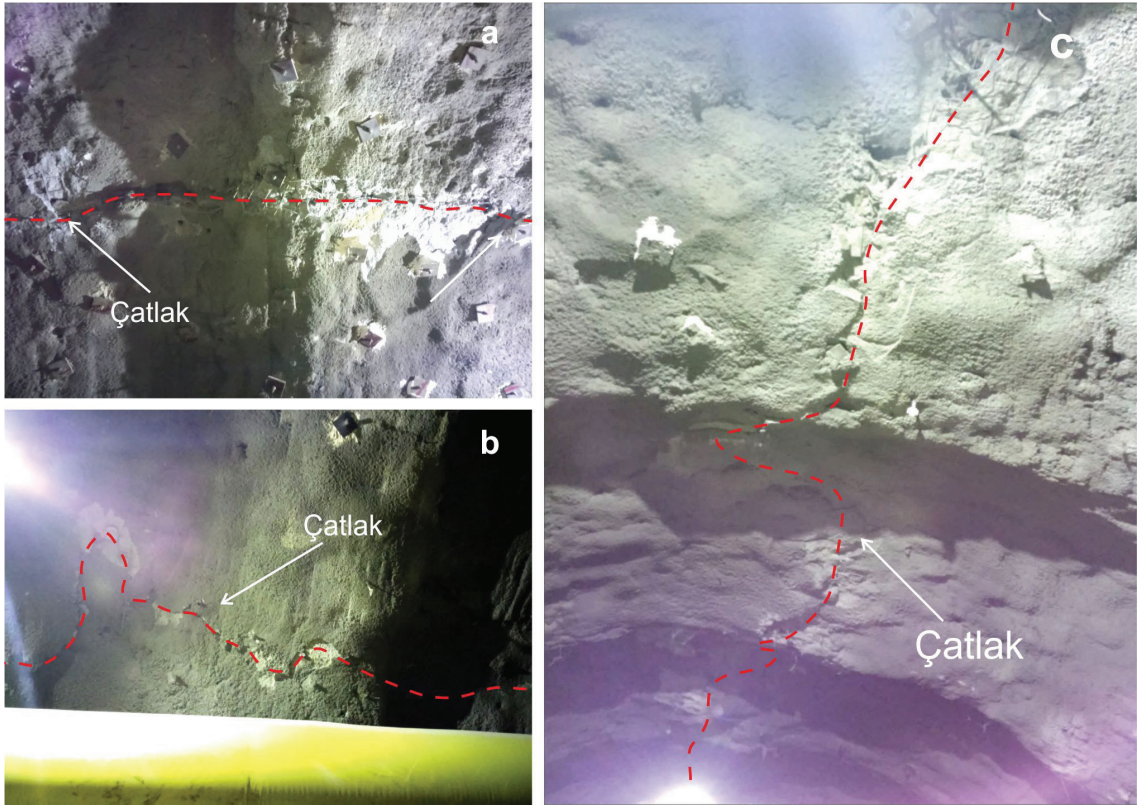
Figure 8. Tunnel face after overbreak in the tunnels a) Access tunnel km:0+286, b) Access tunnel km:0+291, c) Access tunnel km:0+308, d) T2 tunnel km:0+935.

Taz, Ündül, Denek

Tünel içine doğru gelişen deformasyonlar (Konverjans)

Tünel içerisinde karşılaşılan diğer bir sorunu konverjanslar oluşturmaktadır. Konverjans problemi genellikle alt yarı kazı ve destek çalışmalarından sonra gelişmeye başlamıştır.

Deformasyon toleransının 10 cm'den düşük olduğu tünelde, deformasyon okumaları yer yer 10 cm'nin üzerine çıkmıştır. T2 Tüneli içerisinde km:0+800 ile km:0+887 arasında, km:0+922 ile km:0+955 arasında ve km:0+960 ile km:0+977 arasında tünel içine doğru gerilmelerin artması ile tünel tavanında çatlaklar gelişmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Tünel içine doğru gelişen çatlak görüntüleri a) T2 tüneli km:0+800-km:0+887 arası, b) T2 tüneli km:0+922-km:0+955 arası, c) T2 tüneli km:0+960-km:977 arası.

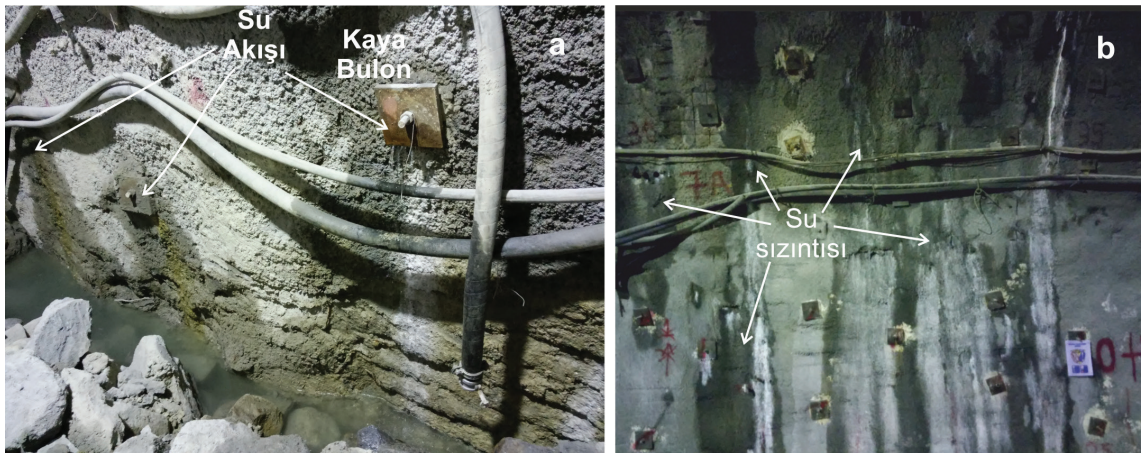
Figure 9. Cracks developed into the tunnel a) T2 tunnel between km:0+800-km and 0+887, b) T2 tunnel between km:0+922-km and 0+955, c) T2 tunnel between km:0+960 and km:977.

Tünel içine su girişleri

Tünel içine su girişleri, yeraltı su seviyesinin altında açılan tünellerde görülen genel sorunlardandır. Bu bağlamda incelenen tünel kesimleri için ön çalışmalarda yapılan 23 adet sondaj verisine göre YAS seviyesi yüzeyden 4.50-23.5 m aralığında bulunmaktadır. Açılan ve incelemesi yapılan tünel, yeraltı suyu seviyesinin altında kalmaktadır ve bu durum hazırlanan jeolojik kesitte gösterilmiştir (Şekil 5a). Ancak incelenen tünel kesimlerinde tünel aynası boyunca tünele su gelimi Yaklaşım Tüneli km:0+308 dışında gerçekleşmemiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Yaklaşım Tüneli km:0+308'de gelişen su girişinin tünel aynasının orta-çok ayrılmış, sarımsı kahverengi renkli, killi kumlu zayıf zonda gerçekleştiği belirlenmiş ve tünel içine su girişinin zayıf zon boyunca ilerleyen yeraltı sularının olduğu düşünülmüştür. İncelemesi yapılan Yaklaşım Tüneli ve T2 Tüneli'nde yersel olarak genellikle desteklemeden sonra uygulanan kaya

bulonlarından su girişlerinin sızıntı (<0.1 litre/dakika) şeklinde geliştiği tespit edilmiştir (Şekil 10).

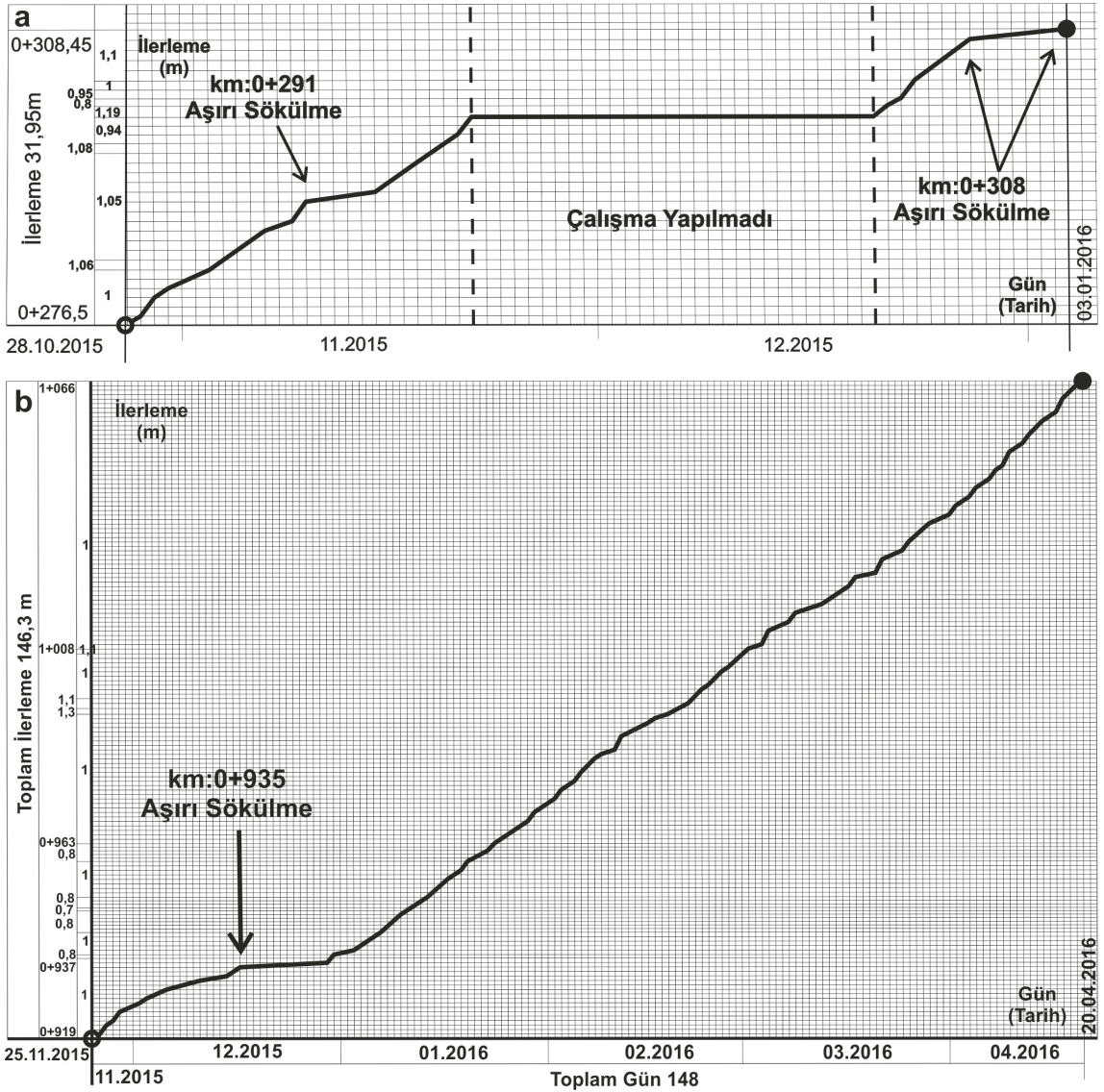
Tünel çalışmaları sırasında karşılaşılan jeoteknik sorunların ilerleme hızına etkileri Şekil 11'de verilmiştir. İlerleme hızını en olumsuz etkileyen I. aşama kazılarında gerçekleşen aşırı sökümlerdir (Şekil 11). Yaklaşım tüneli I. aşama km:0+291 ve km:0+308 de gerçekleşen aşırı sökümler tünel çalışmalarının ilerlemesini önemli düzeyde aksattığı görülmüştür. km:0+291 de gelişen aşırı söküme, ilerleme hızında yaklaşık 5 günlük aksamaya neden olmuştur. km:0+308 de gelişen aşırı söküme olayı sırasında 4-5 günlük iyileştirme çalışması yapılmış ancak ilerleme aşamasında tekrar aşırı söküme olayı meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra Yaklaşım tüneli projesi durdurulmuştur (Şekil 11a). T2 tüneline gelişen en büyük aşırı söküme km:0+935 de gerçekleşmiştir. Hazırlanan T2 tüneli I. aşama ilerleme hızı grafiğinden yaklaşık 18-20 günlük bir aksamanın olduğu görülmektedir (Şekil 11b).



Şekil 10. Tünel sızan sulara ait görüntüler; a) Yaklaşım tüneli kaya bulonundan su sızıntısı, b) T2 tüneli yan duvardan su sızıntısı.

Figure 10. Views of water leakages into the tunnel; a) water leakage from rock bolt at Access tunnel, b) water leakage from sidewall of T2 tunnel.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 11. İncelenen tünel kesimlerinin 1. aşama ilerleme grafikleri; a) Yaklaşım tüneli, b) T2 tüneli.

Figure 11. The first stage advance rate graphs of the tunnel sections examined for; a) Access tunnel, b) T2 tunnel.

SAYISAL ANALİZLERDE KULLANILAN KAYA KÜTLE PARAMETRELERİ

Tünel güzergâhındaki jeolojik birimler kaya davranışı gösterdiğinden dolayı analizlerde Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme yöntemi tercih edilmiştir. Eklemlili kaya ortamları için

geliştirilen bu yöntem yardımıyla sayısal analizlerde kullanılacak Hoek-Brown kriterleri mevcut kaya malzemesi ve kaya kütle parametrelerinden belirlenmektedir (Hoek vd., 2002).

Kaya kütle parametreleri olan Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI), Hoek-Brown katsayıları (m_b , m_i , s , a), kaya kütlelerinin dayanımı ve kaya kütlelerinin deformasyon modülü analizlerde kullanılan önemli parametrelerdir. Çalışılan kaya ortamları için GSI değeri Hoek (1983), Hoek vd. (1998), Marinos ve Hoek (2000) tarafından çalışılan ve geliştirilen nicel GSI Çizelgesinden elde edilmiştir. Tünel içerisinde gözlenen ve incelemesi yapılan arkoz, kuvars arenit ve zayıf zon içerisindeki killi kumtaşı kaya birimleri için ayrı ayrı GSI değeri belirlenmiştir. GSI için belirlenen süreksizlik yapısı/süreksizlik yüzey koşulu arkoz için çok bloklu/orta, kuvars arenit için çok bloklu/zayıf ve killi kumtaşı için bloklu-bozunmuş/çok zayıf aralığında tanımlanmıştır (Şekil 12).

Hoek-Brown katsayıları olan m_b , s , a değerleri Hoek vd. (2002) tarafından geliştirilen kaya kütlelerine ait parametrelerdir. Bu parametrelerin hesaplanmasında Eşitlik 1, 2 ve 3 kullanılmıştır.

$$m_b = m_i \exp \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \quad (1)$$

$$s = \exp \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3)$$

Eşitliklerde yer alan örselenme faktörü (D) değeri patlatma yapılan tünel aynası (km:0+897)

için 0.6, hidrolik kırıcı ile kazılan tünel aynası (km:0+935) için ise sıfır alınmıştır (Hoek, 2012).

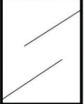





Kaya kütlelerinin dayanımını (Hoek ve Brown, 1980; Ramamurthy, 1986; Kalamaris ve Bieniawski, 1995; Sheorey, 1997; Aydan ve Dalgıç, 1998; Hoek vd., 2002) ve deformasyon modülünü (Bieniawski, 1973; Serrafim ve Pereira, 1983; Mitri vd., 1994; Barton, 1995; Aydan vd., 1997; Palmström ve Singh, 2001; Hoek ve Diederichs, 2006; Sönmez vd., 2006) belirlemek için farklı araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmış ve farklı denklemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada, kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve deformasyon modülünü belirlemek amacıyla Hoek vd. (2002) tarafından kaya ortamında açılan yeraltı kazı çalışmalarına yönelik önerilmiş olan kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı (σ_{cm}) Eşitlik 4, kaya kütlelerinin deformasyon modülü (E_m) ise Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen ve Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{as-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4)$$

$$E_m = E_i \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right] \quad (5)$$

Burada; GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi, D: örselenme faktörü, m_i , m_b , s ve a Hoek-Brown katsayıları, σ_{ci} : kaya biriminin tek eksenli sıkışma dayanımı, E_i : kaya biriminin elastisite modülü şeklindedir.

Taz, Ündül, Denek

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced is water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	N/A	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70	60	Arkoz		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	50	50	Kuvars arenit		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	40	30	Killi Kumtaşı		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	20	20		18	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Şekil 12. Tünel içerisinde incelemesi yapılan kaya birimlerine ait GSI aralığı (Marinos ve Hoek, 2000).

Figure 12. GSI interval of the rock units examined in the tunnel (Marinos and Hoek, 2000).

SAYISAL ANALİZLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Sayısal analizlerde Rocscience Phase 2D Version 8.005, (2011) yazılımı kullanılmıştır. İncelenen aynalardaki litolojik sınırlar Şekil 13’te verilen aynalara göre belirlenmiştir. Bunun yanında sayısal analizlerin gerçekleştirildiği alanlarda yapılan ön çalışmalara göre yeraltı suyu seviyesinin altında tanımlanmaktadır. Ancak incelenen aynalarda yerinde yapılan gözlemlerde herhangi bir su belirtisi gözlenmediği için sayısal analizlerde yeraltı suyu tanımlanmamıştır. Analizlerde, tünel çevresinde oluşan gerilmeler, süreksizlikler, kaya türü, kaya ve kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, ayrışma gibi jeolojik özellikler ile kazı ve destek sistemleri birlikte değerlendirilerek tünel içine doğru artan gerilmeler sonucu gelişen aşırı sökülmenin nedenleri oluşturulan jeolojik model üzerinde tartışılmıştır. Ayrıca tünel aynası ve çevresinde gelişen plastik zon kalınlıkları belirlenmiştir.

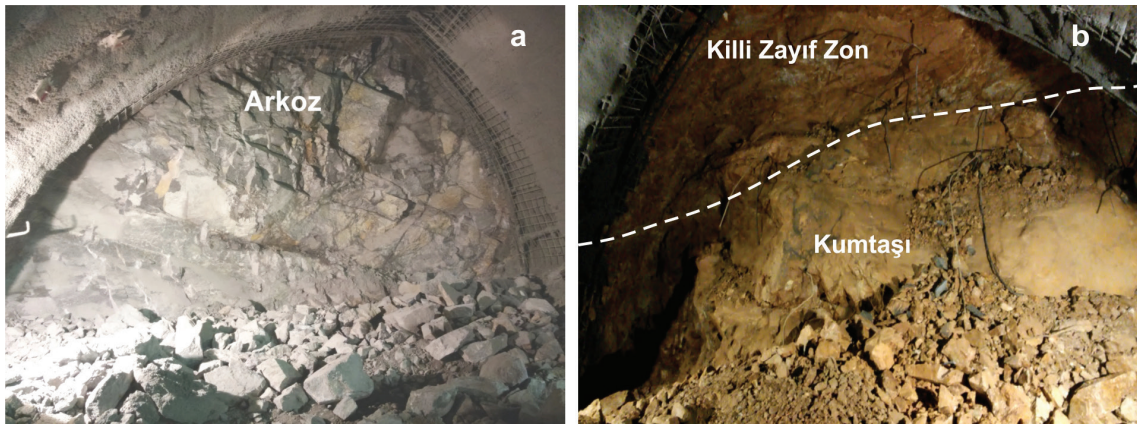
Bu çalışma kapsamında T2 Tüneline ait iki aynanın sayısal analizi yapılmıştır. Analizler, aşırı sökülmenin olmadığı çalışılan tünel güzergahında

en sorunsuz tünel aynalarından olan T2 Tüneli km:0+897 aynası ile aşırı sökülmenin en fazla gözlemlendiği T2 Tüneli km:0+935 aynasında gerçekleştirilmiştir. Böylece sağlam, aşırı sökülmenin olmadığı ve sorun yaratan jeolojik koşullar değerlendirilmiştir. Analizler sırasında Çizelge 2 ve Çizelge 3’te verilen kaya ve kaya kütle özellikleri kullanılmıştır. Örtü kalınlığı ise km:0+897 için 78m ve km:0+935 için 84m olarak belirlenmiştir. İlgili tünel aynaları için uygulamada kullanılan kazı ve destek sistemleri sayısal analizlerde de aynı sistematiğe tanımlanmıştır (Çizelge 1).

Çalışma ortamındaki gerilmelerin hesaplanmasında, kaya kütlelerinin herhangi bir noktasındaki düşey gerilmelerin örtü kalınlığı ağırlığına eşit olduğunu kabul eden ve en yaygın olarak kullanılan Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_v = \gamma.H \quad (6)$$

Eşitlikte yer alan “ γ ” kayanın birim hacim ağırlığı, “H” ise örtü kalınlığını ifade etmektedir.



Şekil 13. T2 tüneline sayısal analizi yapılan ayna görüntüleri; a) km:0+897, b) km:0+935.

Figure 13. Tunnel faces numerically analysed in the T2 tunnel; a) km:0+897, b) km:0+935.

Taz, Ündül, Denek

Çizelge 2. Sayısal analizi yapılan T2 tünel aynalarında karşılaşılan kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Table 2. Physical and mechanical properties of the rocks in T2 tunnel faces numerically analysed.

Özellikler	Kaya birimi ve parametreleri			
	Litoloji	Çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu)	Kumtaşı ve zayıf zon içerisinde kil*	Kuvars arenit Kumtaşı (Aydos formasyonu)
Örnek Adedi		27	3	15
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_{ci} - MPa)		50	15	80
Elastisite Modülü (E_i - MPa)		13750	3750	22000
Poisson Oranı (ν)		0.15	0.25	0.12
Birim Hacim Ağırlık (γ_k - kN/m ³)		25.7	19	25.3

*Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu (2016)

Çizelge 3. Sayısal analizi yapılan T2 tünel aynalarının kaya-kaya kütlesi ve Hoek-Brown parametreleri.

Table 3. Rock-rock mass and Hoek-Brown parameters for T2 tunnel faces numerically analysed.

Özellikler	Kaya ve kaya kütle parametreleri			
	Litoloji	Çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu)	Kumtaşı ve zayıf zon içerisinde kil	Kuvars arenit kumtaşı (Aydos formasyonu)
GSI		50	18	30
Deformasyon Modülü (E_{mass} - MPa)		1727.77	155.608	1777.41
m_i		17	4	17
m_b		1.326	0.214	1.395
s		0.001	0.0001	0.0004
a		0.506	0.550	0.522
Dilatasyon parametresi (ψ)		0.254	0.062	0.652
GSI _{resid}		25	14	20
Deformasyon Modülü _{resid} ($E_{mass\ resid}$ - MPa)		457.4	132.127	1008.25
$m_{b\ resid}$		0.382	0.186	0.978
s_{resid}		$3.25e^{-5}$	$7.2e^{-5}$	0.0001
a_{resid}		0.530	0.565	0.543

GSI: Jeolojik Dayanım İndeksi, E_{mass} =Kaya Kütlesinin Deformasyon Modülü, m_i - m_b - s - a değerleri Hoek-Brown kaya kütle katsayıları.

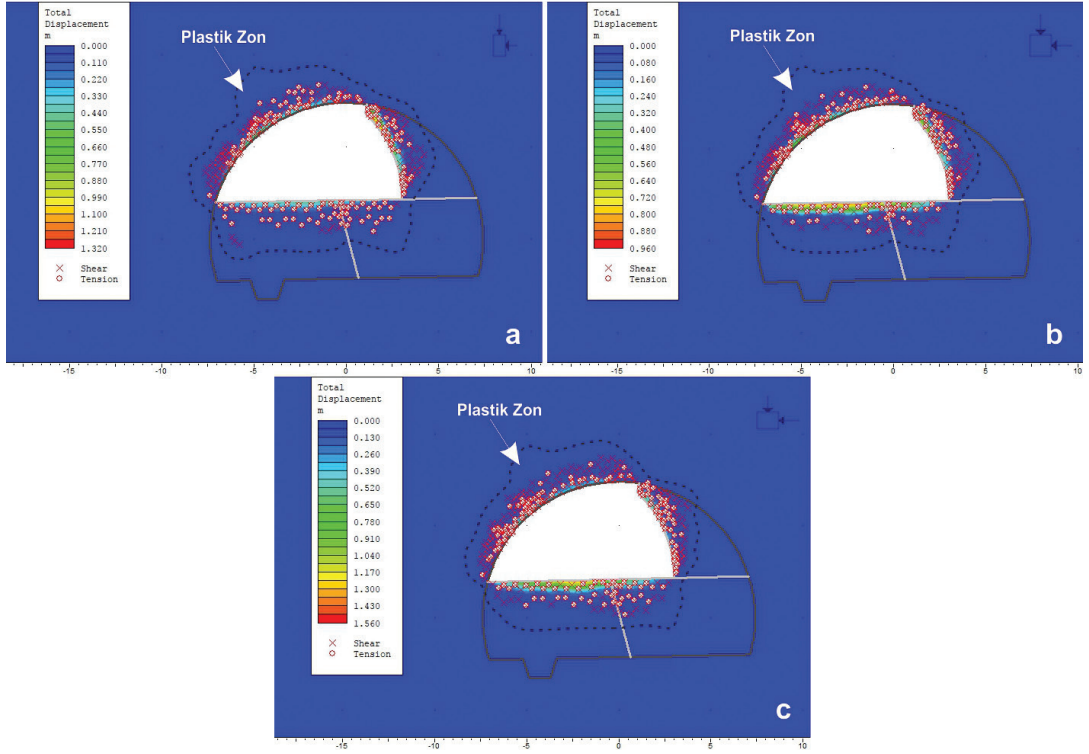
Yatay gerilmeleri (σ_h) belirlemek için ise yerinde ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmemiştir. Bu bağlamda, Aydan (2000) ile Tuncay vd. (2002)'nin İstanbul ve çevresinde gerçekleştirdikleri çalışmalardan yararlanılmıştır. Aydan (2000), geliştirmiş oldukları yöntem yardımıyla faylardan aldıkları ölçümleri kullanarak yer kabuğuna etkiyen gerilmeleri belirleyerek yatay ve düşey gerilmelerin oranını ($k=\sigma_h/\sigma_v$) hesaplamıştır. Bu çalışmada da Aydan (2000)'in belirlemiş olduğu gerilmelerin oranları ($k=1$ ve $k=1.3$) kullanılmıştır. Tuncay vd. (2002) ise Akustik Emisyon (AE) yöntemi ile bölgedeki yatay gerilmeleri hesaplamıştır. Bu çalışmada da Tuncay vd. (2002) belirlemiş olduğu yatay gerilme değerleri dikkate alınarak Eşitlik 6 yardımıyla farklı bir k değeri ($k=0.6$) daha belirlenmiştir. Sayısal analizlerde, yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranı ($k=\sigma_h/\sigma_v$) 0.6, 1 ve 1.3 olmak üzere üç farklı değer tanımlanarak kullanılmış ve farklı gerilmeler altındaki davranışların anlaşılması için ayrı ayrı analizler yapılmıştır.

T2 Tüneli km:0+897 aynasında, az ayrışmış kil, kum seviyeleri içeren çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu) yer almaktadır (Şekil 13a). T2 Tüneli km:0+935 aynası önceki bölümlerde tariflendiği şekilde bir makaslama zonu içermekte olup zayıf zonun alt ve üst kısmında arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu) yer almaktadır. Arkozik kumtaşının üst kesimlerinde ise kuvarslı kumtaşı, kuvars arenit (Aydos formasyonu) bulunmaktadır (Şekil 5b ve 13b).

Analiz görüntülerinde, makaslama (shear) gerilmelerinin etkin olduğu bölgelerde kenetlenmenin ve çekme (tension) gerilmelerinin etkin olduğu bölgelerde ise kaya malzemesinin sökülüp dökülebileceğini göstermektedir. Plastik zon sınırı (kazı yapılan tünelin çevresinde bulunan kaya ortamının etkilendiği bölge, gevşeme bölgesi) ise bu bölgeleri içine alacak şekilde yenilme analizleri yardımı ile belirlenmiştir.

Analizlerde, T2 Tüneli km:0+897 I. aşama kazı sonrasında "k" değeri için alınan farklı değerlere rağmen tünel kemer kısmında plastik zon kalınlığı en fazla 3-3.5 m civarında kalmaktadır (Şekil 14, Çizelge 4). Bununla beraber toplam yer değiştirme değerlerinin kısıtlı bir bölgede etkin olması nedeniyle tünel içerisinde aşırı sökülme sorununun gelişmeyebileceği sonucunu vermektedir. Tünel içerisinden alınan ve Şekil 11a'da verilen ayna görüntüsünden de anlaşılacağı gibi tünel içerisinde aşırı sökülme olayı gerçekleşmemiştir. Bu bağlamda gelişen plastik zon kalınlığı ve toplam yer değiştirme değerleri dikkate alındığında kaya kütlelerinin orta çatlaklıdan az, ayrışmanın ise W2-W3 olduğu ve arkozik kumtaşı ortama sahip (Çizelge 2 ve 3) yapısal bir unsurun olmadığı aynalarda herhangi bir aşırı sökülme sorununun gerçekleşmeyeceği düşünülmektedir. Ayrıca incelenen tünellerin farklı metrelerinde, benzer jeolojik ortama sahip tünel aynalarında yapılan analizlerde de yakın sonuçlar elde edilmiştir (Taz, 2016).

Taz, Ündül, Denek



Şekil 14. T2 tüneli km:0+897 için 1. aşama kazı sonrası sayısal analiz görüntüleri; a) $k=0.6$ için durum, b) $k=1$ için durum, c) $k=1.3$ için durum.

Figure 14. Numerical analyses results for the T2 tunnel at km:0+897 after the first stage excavation; a) the case for $k=0.6$, b) the case for $k=1$, c) the case for $k=1.3$.

Çizelge 4. Sayısal analizi yapılan tünel aynalarına ait plastik zon kalınlıkları, toplam yer değiştirme ve jeo-mühendislik özellikler.

Table 4. Plastic zone thicknesses, total displacement and geo-engineering properties of the tunnel faces numerically analysed.

T2 Tünel km	k (σ_h/σ_v)	1. Aşama Plastik Zon Kalınlığı (m)		Toplam en yüksek yer değiştirme (m)	Ayrışma derecesi (W)
		en düşük	en yüksek		
0+897	k=0.6			1.32	
	k=1	3	3.5	0.96	II-III
	k=1.3			1.56	
0+935	k=0.6	2	4	0.6	
	k=1	3	5	1.2	V-VI
	k=1.3	4	5.5	1.2	

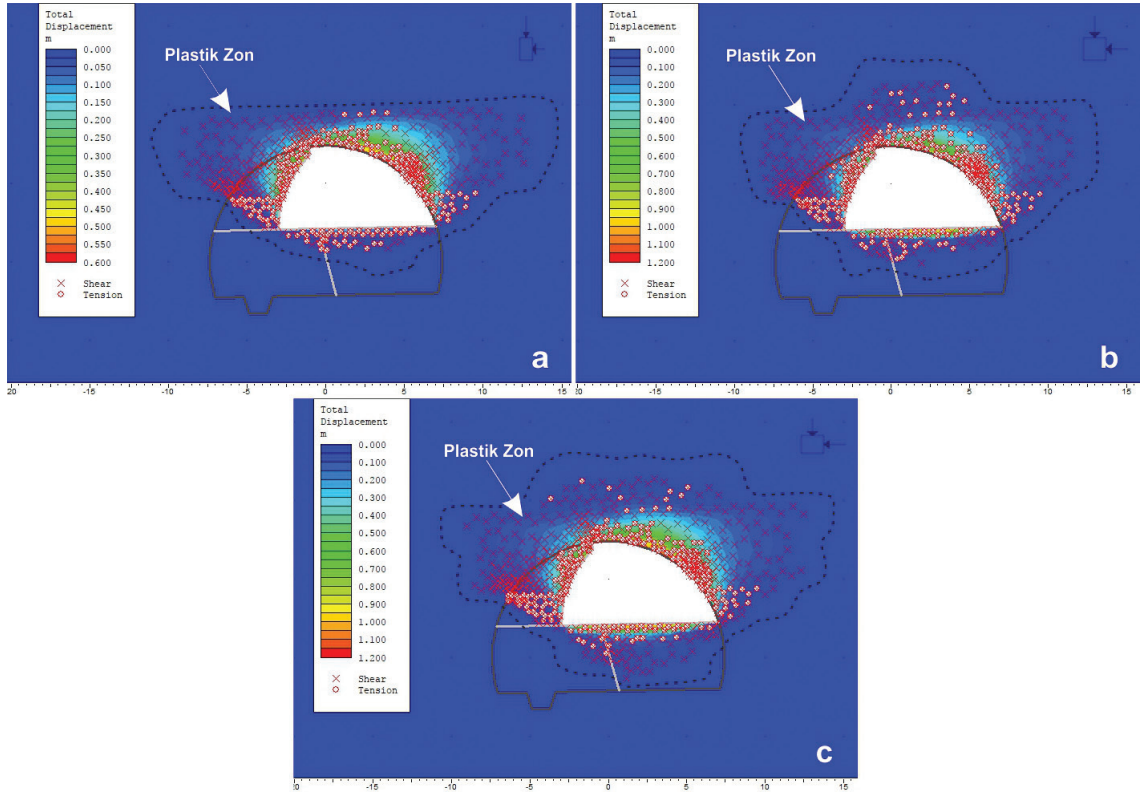
σ_h =yatay gerilme, σ_v =düşey gerilme.

T2 Tüneli km:0+935 I. aşama sonrasında elde edilen analizler, $k=0.6$ için tünel tavan kısmında plastik zon kalınlığı en fazla 2-4 m civarında kalmakta iken, toplam yer değiştirme değerleri en fazla 0.6 m, $k=1$ için tünel tavanında plastik zon kalınlığı en fazla 3-5 m civarında, toplam yer değiştirme değerleri ise en fazla 1.2 m'dir. $k=1.3$ için tünel tavanında plastik zon kalınlığı 4-5.5 m civarında ve toplam yer değiştirme değerleri en fazla 1.2 m olmaktadır (Şekil 15; Çizelge 4). Tünel içerisindeki yapılan gözlemlerde, km:0+935 ayna kazı sırasında aşırı sökülme sorunu gerçekleştiği bilinmektedir. Aşırı sökülme öncesi ayna görüntüsü Şekil 13b ve aşırı sökülme sonrası ayna görüntüsü Şekil 8d'de verilmiştir. Gerçekleşen aşırı sökülmenin boyutları dikkate alındığında, $k=0.6$ için elde edilen analiz değerleri gerçekleşen aşırı sökülmenin boyutlarından daha düşük kalmaktadır (Şekil 15a). Ancak $k=1$ ve $k=1.3$ için analiz sonuçları aşırı sökülme sonrası yapılan gözlem ve incelemelerde belirtilen (Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 2016) aşırı sökülme boyutlarına yakın değerler vermektedir (Şekil 15b ve 15c). Bu bağlamda kurulan jeolojik modelin

gerçeğe yakın olduğu ve benzer ortamlarda aşırı sökülmenin gelişebileceği sonucuna varılabilir. Bazı noktalarda yapılan kaya bulunu gibi iyileştirmeler plastik zon içerisinde kalma ihtimali olacağından uzun dönem tünel performansında mutlaka göz önüne alınmalıdır. Bu bağlamda, gelişen aşırı sökülmenin nedenleri olarak kazı yöntemi, ayrışmanın (V-VI) ve zayıf zonun etkisi ile kaya ve kaya kütle koşullarının (örneğin süreksizlik aralığının az olması) zayıf olması şeklinde sıralanabilir (Çizelge 2 ve 3). Analizler sonucunda tünel aynalarına ait plastik zon kalınlıkları ve kaya kütlelerinin jeo-mühendislik özellikleri Çizelge 4'de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında T2 Tüneli km:0+935'deki jeolojik koşullara benzer jeolojik koşullarda aşırı sökülme ve benzeri profil fazlası kazıların gelişebileceği çok açıktır. Benzer jeolojik koşullarda açılacak tünellerde, tünel açımı, destekleme çalışmaları ve tünel sonrasında gerekli bölgelerde iyileştirme çalışmaları (enjeksiyon, kaya bulunu, püskürtme beton, kazı kesit alanı küçültme, kazı adım sayısı arttırma vb.) mutlaka jeo-mühendislik özelliklerin detaylıca araştırılması ile tamamlanmalıdır.

Taz, Ündül, Denek



Şekil 15. T2 Tüneli km:0+935 için 1. aşama kazı sonrası sayısal analiz görüntüleri; a) $k=0.6$ için durum, b) $k=1$ için durum, c) $k=1.3$ için durum.

Figure 15. Numerical analyses results for the T2 tunnel at km:0+935 after the first stage excavation; a) the case for $k=0.6$, b) the case for $k=1$, c) the case for $k=1.3$.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, incelenen tünel kesimleri boyunca tünel güzergâhının jeolojisi, kazı-destek çalışmaları, gelişen jeo-mühendislik sorunlar ve iyileştirme çalışmaları takip edilmiştir.

Tünel çalışmaları sırasında güzergâh boyunca genel olarak İstanbul Paleozoyik istifeye ait çakıllı arkozik kumtaşı (Kurtköy formasyonu), kuvars arenit (Aydos formasyonu), ince taneli kumtaşı (Gözdağ formasyonu) ve bu birimlere sokulum yapan diyabaz dayklar ile karşılaşmıştır. Güzergâh boyunca eğimi düşeye yakın zayıf zonlar tespit edilmiştir. Zayıf zon boyunca birim sarımsı kahverengi renkli,

killi-kumlu seviyeler içerdiği gözlenmiştir. Ayrıca Çamlıca Bindirmesine ait olduğunu düşündüğümüz düşük açılı ters fay düzlemi, tünel aynalarında gözlenmiştir.

Tünel çalışmaları sırasında gelişen sorunlardan olan aşırı sökülme, tünel ilerleme hızına önemli boyutlarda etki etmektedir. Diğer bir sorun olan tünel içine su sızıntıları, yersel olarak geliştiğinden genel olarak ilerleme hızına etki etmemesine rağmen Yaklaşım Tüneli km:0+308'de gelişen aşırı sökülme olayı öncesinde yaklaşık 3 lt/dk su girişi gözlenmiştir.

Sayısal analizler sonucu ve tünel içindeki gözlemler ile birlikte değerlendirildiğinde orta-

çok çatlaklı killi kumtaşı ve arkozik kumtaşı kaya ortamında, ileri derecede ve tamamen ayrılmış (V-VI) seviyeler ile özellikle zayıf zonlar (makaslama, fay vb.) boyunca aşırı sökülme gerçeğinin çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, az-orta çatlaklı, az-orta ayrışmanın gözlemlendiği çakıllı arkozik kumtaşı ve kuvars arenit kaya ortamında aşırı sökülme gerçeğinin potansiyeli bakımından düşük kalmaktadır. Tünel içerisinde gerçekleşen aşırı sökülme ile sayısal analiz-model sonuçları genel olarak birbirleri ile uyumludur. Bu durum kurulan sayısal modelin gerçeğe yakın olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, benzer jeolojik koşullarda yapılacak tünel vb. yeraltı çalışmalarında, bu çalışmada belirlenen jeo-mühendislik özelliklerinin sınır koşulları olarak kullanılabilmesi ortaya konmuştur. Ayrıca bu tip sorunları yaratan belirsizliklerin bir kısmı detaylı ön jeolojik ve jeo-mühendislik çalışmalar ile belirli hale getirilebileceği unutulmamalıdır.

Katkı Belirtme

Yazarlar, makalenin inceleme sürecinde titiz, detaylı ve katkı sağlayıcı eleştiri ve önerilerinden dolayı Hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Abdüselamoğlu, Ş., 1963. İstanbul Boğazı doğusunda mostra veren paleozoyik arazide stratigrafik ve paleontolojik yeni müşahedeler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, İstanbul.

Albayrak, Z., 1994. Göçüklerin enjeksiyonla onarımı demiryolu tünellerindeki problemlerin enjeksiyonla onarımı. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 211-228.

Aydan, Ö., Dalgıç, S., 1998. Prediction of deformation behaviour of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anotolian Fault Zone (NAFZ). Reg. Symp. on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 228-233.

Aydan, Ö., Ulusay, R., Kawamoto, T., 1997. Assessment of rock mass strength for underground excavations. Proceedings of the 36th US Rock Mechanics Symposium, 777-786.

Aydan, Ö., 2000. Fay çiziklerinden yerkabuğuna etkiyen gerilmelerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 22, 223-236.

Aysal N., Keskin M., Peytcheva I., Duru O., Akgündüz S., 2015. Geochronology, Geochemistry and Isotope Systematics of a mafic-intermediate dyke complex in the İstanbul zone, Northern Turkey. Goldschmidt 2015. Prag, Çek Cumhuriyeti., 16-21, 155-155.

Altınlı, E., 1954. Çamlıcalar şarियajlı mıdır?. Fen Fakültesi Mecmuası Seri B, 19 (3), 213-222.

Barton, N., 1995. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Keynote Lecture, 8th ISRM Congress. Vol 3. Balkema, Rotterdam, Tokyo, 1023-1032.

Baykal, F., Kaya, O., 1965. İstanbul Silüriyeni hakkında. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Türkiye Bülteni, 64, 1-8.

Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15 (12), 335-344.

Bilgin, N., Çopur, H., Balci, C., Tumac, D. 2008. "The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in İstanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels". World Tunnel Congress 2008 Proceedings Book, 1509-1516.

Bilgin, N., 2016. An appraisal of TBM performances in Turkey in difficult ground conditions and some recommendations. Tunnelling and Underground Space Technology, 57, 265-276.

Dalgıç, S., 2000. The influence of weak rocks on excavation and support of the Beykoz Tunnel. Turkey. Engineering Geology 58, 137-148.

Dalgıç, S., 2002. A comparison of predicted and actual tunnel behavior in the İstanbul Metro, Turkey. Engineering Geology, 63, 69-82.

Dalgıç, S., 2003. Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey. Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 453-465.

Taz, Ündül, Denek

- Eriş, İ., Vardar, M., 1994. İstanbul metrosu Taksim-4. Levent güzergâhı temel kayaçlarının jeomekanik özellikleri ve duraylılık sorunu. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, İstanbul: TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 163-178.
- Geniş, M., Başarır, H., Özarıslan, A., Bilir, E., Balaban, E., 2007. Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey, Engineering Geology, 92, 14-26.
- Gürocak, Z., 2011. Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at The Kapıkaya Dam Site, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 41-52.
- Hoek, E., 1983. Strength of jointed rock masses, 23rd Rankine Lecture. Géotechnique, 33(3), 187-223.
- Hoek, E., 2012. Blast damage factor D, Technical Note for RocNews.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. Inst. Min. Metall., London, 527.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition.
- Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2), 151-160.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 203-215.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1981, In: Brown, E.T. (Ed.), Rock characterization testing and monitoring-ISRM suggested methods, New York, Pergamon.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 2007. The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, Testing and Monitoring Kozan, Ankara.
- Kalamaris, G.S., Bieniawski, Z.T., 1995. A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. Proc. of 8th Int. Cong. Rock Mechanics. ISRM, 1. Balkema, Rotterdam, 295-302.
- Kaya, O., 1978. İstanbul ordovisyeni ve silüriyeni. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Enstitüsü, 4, 1-22.
- Ketin, İ., 1958. Çamlıca bölgesinin tektoniği hakkında. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 7, 10-18.
- Lom, N., Ülgen, S.C., Sakinç, M., Şengör, A.M.C., 2016. Geology and stratigraphy of Istanbul region. Geodiversitas, 38 (2), 175-195.
- Mahmutoğlu, Y., 2011. Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in İstanbul. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70, 115-131.
- Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings of the GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Technomic Publishers, Lancaster, 1422-1446.
- McCallien, W.J., Ketin, İ., 1947. The structure of Çamlıca, Western Asia Minor, near İstanbul. Annales de l'Université d'Ankara, 1, 209-226.
- Melemoğlu İnşaat, 2016. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünelleri Jeolojik ve Jeoteknik Raporu, 134 s.
- Önalın, M., 1981. İstanbul Ordovisyen ve Silüriyen istifinin çökme ortamları. Yerbilimleri Dergisi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 161-177.
- Önalın, M., 1982. Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimenter özellikleri. İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi, Doçentlik Tezi, 156s.
- ÖNORM B 2203, 1994. Untertagebauarbeiten Werkvertragsnorm, Avusturya.
- Özgül, N., 2011. Stratigraphy and some structural features of the İstanbul palaeozoic, Turkish Journal of Earth Sciences, 21, 817-866.
- Özsan, A., Başarır, H., Yücel, S., Cücen, Ö., 2009. Engineering geological evaluation and preliminary support design for the metro extension tunnel, Ankara. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68, 397-408.
- Palmström, A., Singh, R., 2001. The deformation modulus of rock masses-comparisons between in

- situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, 115–131.
- Ramamurthy, T., 1986. Stability of rock mass. 8th Annual Lecture. *Indian Geotechnical Journal*, 1–74.
- Rocscience, 2011. Phase 2D Version 8.005, User's Guide. Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Rocscience, 2013. Dips v.6.008, User's Guide. Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Sheorey, P.R., 1997. Empirical rock failure criteria. Balkema, Rotterdam, 176.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 224–235.
- Taz, F., 2016. Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin yapım aşamalarında karşılaşılan sorunların jeomühendislik açıdan değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö., Yüzer, E., 2002. Akustik emisyon (AE) tekniği: 2-AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni, 25, 83-98.
- Tüysüz, O., Aksay, A., ve Yiğitbaş, E., 2004. Batı Karadeniz bölgesi litostratigrafi birimleri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Varol, A., Dalgıç, S., 2006. Grouting applications in the Istanbul Metro, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 602-612.
- Volkman, G., Schubert, W., 2005. The use of horizontal inclinometers for the optimization of the rock mass - support interaction, *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, İstanbul.
- Yılmaz, Ö., Çınar, M., Özdemir, T., Varol, A., 1994. İstanbul metrosu tünel kazı çalışmalarında yaşanan problemler ve çözümleri. Ulaşımında Yeraltı Kazıları I. Sempozyumu, 93-112.



Derleme / Review Paper

Yeraltısuyu Çekimi Sonucu Oluşan Yüzey Çökmesi Problemi; Bilimsel Araştırmaların Tarihsel Gelişimi

Surface Subsidence Problem Due to Groundwater Withdrawal; A Historical Review

Nurkan KARAHANOĞLU 

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş (Received): 12 Şubat (February) 2018, Düzeltme (Revised): 08 Mart (March) 2018, Kabul (Accepted): 20 Mart (March) 2018

ÖZ

Akiferlerden yoğun su çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi konusundaki bilimsel araştırmalar 1890'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Zamanla teknolojik ve endüstriyel gelişmeler su ihtiyacını çok artırmış ve yeraltısuyu havzaları vazgeçilemez kaynak olarak kullanılmıştır. Sanayileşmenin yaygın olduğu bölgelerde gözlenen ve altyapıyı olumsuz olarak etkileyen bu gelişmenin yoğun su-petrol-gaz üretimi ile bağlantılı olduğu anlaşılmıştır. Daha sonraki yıllarda konunun bilimsel olarak araştırıldığı ve su/akışkan çekimi ile yüzeydeki deformasyonun ilişkilerinin matematiksel olarak ifade edildiği izlenmektedir. Yapılan araştırmalarda yeraltısuyu akımı ve deformasyon ilişkisi birlikte ele alınmış ve mekanizmaların fiziksel ve mekanik yanları incelenmiştir. Terzaghi'nin konsolidasyon modeli ve Biot'nun yeraltısuyu akımı ve yüzey deformasyonunu matematiksel olarak formüle etmesi araştırmalara çok önemli katkılar sağlamıştır. Bu gelişmeleri takip eden yıllarda ilgili mekanizmaları açıklayan matematiksel denklemlerin analitik yöntemlerle çözümleri önemli bir aşama olarak değerlendirilmiş, ancak karmaşık ve çok boyutlu ortamlarda analitik yöntemler yetersiz kalmıştır. Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar sayısal yöntemlerinin kullanılması ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler karmaşık problemlerin çözümünü sağlamış ve yapılan bilimsel araştırmalara ivme kazandırmıştır.

Bu makalede yüzey çökmesi konusundaki araştırmalar tarihsel boyutta özetlenerek konunun bilimsel gelişimi aktarılmaktadır. Temel denklemler yardımı ile su hareketi ve yüzey çökmesi mekanizması anlatılmakta ve dünya genelinde yüzey çökmesi yaşanan bölgeler tanıtılarak konu ile ilgili güncel araştırmalar irdelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey çökmesi, yeraltısuyu akımı-deformasyon ilişkisi, poroelastisite

ABSTRACT

Scientific investigations for surface subsidence caused by groundwater date go back to 1890's. Technological and industrial developments have rapidly increased the demand for groundwater and this resulted heavily use of groundwater resources. This phenomenon, observed in industrial areas and causing damage to infrastructures, has been related to heavy production of water-oil-and gas. In the following years, research studies have been focused on mathematical formulation of the interrelated mechanism of fluid withdrawal and subsidence. In the formulation, mechanical and physical behaviour of the flow and subsidence mechanisms are used together to analyze their interrelationships. Research studies have been accelerated by Terzaghi's consolidation model and Biot's mathematical formulation of the phenomenon. In the following years, solution of the equations were tried by analytical methods, however, they were not applicable to complex problems. Use of the numerical methods (Finite

Elements and Finite Differences) and high capacity computers have been applied to solve the problems and this has speeded up the research studies.

This paper summarizes the research studies related to subsidence due to fluid withdrawal and the scientific development has been reviewed. The mechanisms of subsidence and fluid flow have been explained and case examples are given from countries which seriously suffer from surface subsidence.

Keywords: *Surface subsidence, deformation and fluid flow interrelation, poroelasticity*

GİRİŞ

Yeraltısuyu çekimi, jeotermal akışkan ve petrol-gaz üretimi akifer-rezervuar sistemlerinde deformasyonlara neden olmakta ve bu durum bölgesel boyutta yüzey çökmesi, kırılmalar, çatlamlar şeklinde gözlenmektedir. Dünya geneline bakıldığında, 1900'lü yılların başından itibaren gözlenen yüzey çökmesi problemi, endüstriyel gelişmelere paralel olarak hızla artan yeraltısuyu kullanımı sonucu, çok ciddi boyutlarda hasar oluşturmaya başlamıştır. Bu durum, yüzey çökmesi yaşayan ülkelerin konuya gereken önemi vermesini sağlamış ve problemin tanımına, mekanizmasının anlaşılmasına ve çökmenin ve dolayısı ile dolaylı hasarların en az düzeye indirilmesini sağlamak için araştırma ve gözlemlerin yapılmasına vesile olmuştur. Bu konuda yapılan bilimsel araştırmaların odağını, problemin hidromekaniğini tanımlayan matematiksel modeller ve ilgili denklemlerin sayısal yöntemlerle çözülmesi ve oluşan hasarların minimize edilmesini hedefleyen çalışmalar oluşturmaktadır. Bu bağlamda çok sayıda bilimsel araştırma yapılmış ve geliştirilen sayısal modellerin uygulanmasıyla birçok bölgede yüzey çökmesi problemi kontrol altına alınmış ve hasarların minimize edilmesi yönünde sürdürülebilir mekanizmalar geliştirilmiştir.

Bu makalede yeraltısuyu çekimi ve petrol-gaz-jeotermal üretimi sonucu oluşan yüzey çökmesi probleminin tanıtılması, bilimsel ve mühendislik boyutlarının aktarılması

amaçlanmaktadır. Makalenin akışı içerisinde konu hakkında yapılan araştırmaların tarihsel gelişimi anlatılmakta ve yüzey çökmesi yaşayan ülkelerden örnekler verilerek problemin önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca problemin hidrodinamik ve mekanik boyutlarının sonlu elemanlar sayısal yöntemi ile modellenmesi konusunda temel bilgiler aktarılmaktadır.

TARİHSEL GELİŞİM

Yüksek miktarda yeraltısuyu çekimi sonucu akiferlerde ve yüzeyde oluşan çökme mekanizması ile ilgili olarak yapılan gözlemler ve bilimsel araştırmalar 1890'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Meinzer, 1928 yılında yazdığı makalede basınçlı akiferlerde oluşan sıkışma ve akiferlerin elastik özelliklerinin ve bunların artezyen basıncı ile ilişkilerinin 1890 yıllardan itibaren araştırıldığını bildirmektedir (Meinzer, 1928). Meinzer, Hay'ın 1890 yılında yaptığı sunumda artezyen kuyulardaki su akımının "kaya basıncı" sonucu oluştuğunu ve plastik artezyen akiferi örten kayaların su üzerindeki basıncın su akımını sağladığını ifade ettiğini aktarmaktadır (Hay, R., 1890; Meinzer, 1928). Diğer taraftan, Avustralya'da 1906 yılında Gregory (Meinzer, 1928) Avustralya merkezinde bulunan kuyularda su akımını kısmi olarak kaya basıncına bağladığını anlatmaktadır. Artezyen akiferlerin sıkışabilirlikleri ve elastisiteleleri, Veatch tarafından 1906 yılında değerlendirilmiş ve su

yüklerinin değişmesinin nedenleri açıklanmıştır (Veatch, 1908; Meinzer, 1928). Fuller, 1908 yılında basıncın akiferleri örten malzeme tarafından sağlandığını ve bu durumun su akımı ile ilişkili olduğunu anlatmaktadır (Fuller, 1908). Meinzer, makalesinde akiferlerin sıkışabilirlikleri ve elastisiteleri ile ilgili olarak yapılan değişik testlerden bahsetmektedir. Pratt ve Johnson, 1926 yılında Gulf körfezinde Goose Creek petrol sahasında petrol, su, gaz ve kum üretimi sonucu oluşan yüzey çökmesini sunmaktadır (Pratt ve Johnson, 1926; Pratt, 1927). Riley (1998), 1920'lerin ortalarında Meinzer ve Terzaghi'nin boşluk suyu basıncındaki değişimi ile doymuş sedimanlarda meydana gelen deformasyon mekanizmasının temel kavramlarını formüle ettiklerini ifade etmektedir. Diğer taraftan, Terzaghi'nin 1923'de ileri sürdüğü etkin gerilim teorisi zemin oturma problemlerinin çözümüne önemli bir ivme kazandırmış ve zemin oturması problemi de zemin çökmesinin önemli nedeni olarak değerlendirilmiştir. Rappleye (1933), (Gambolati ve Teatini, 2015) ilk kez yeraltı suyu pompalaması nedeniyle oluşan yüzey çökmesinin kaydını Santa Clara (Kaliforniya) vadisinde yapmıştır ve Ingerson (1941), Delano-Tulare-Wasco (Kaliforniya) bölgesinde 1902, 1930 ve 1940 yıllarında yapılan ölçüm haritalarını karşılaştırılarak bölgedeki yüzey çökmesini çalışmıştır. Jacob (1940) yaptığı çalışmada, elastik artezyen akiferden su çekildiği zaman boşluk basıncının düştüğünü, bunun çekilen suyun genleşmesinden, akiferin sıkışmasından ve akiferin etrafında bulunan kil tabakalarının sıkışmasından olduğunu açıklamıştır. Tolman ve Poland (1940) ve (Riley, 1998) Amerika Santa Clara Vadisi'nde meydana gelen çökme mekanizmasını, basınçlı akiferde su yükünün azalması sonucu killerde bulunan suların kaçtığını ve killerin üstten gelen yük ile çöktüğü şeklinde açıklamıştır. Kaliforniya'da iki vadide

gözlenen çökme hareketleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kuyu ekstensometre ve su seviye ölçüm değerleri kullanılmış ve akitard deşarjı çökme teorisi için temel oluşturacak gerilim-birim deformasyon diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlar, yaklaşık düşey permeabilite ve akitardların elastik ve elastik olmayan sıkıştırılma katsayılarının tahmin edilmesinde kullanılmıştır.

1940'lı yıllara kadar yeraltı suyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi probleminin neden sonuç ilişkileri üzerinde çalışmalar yapılmış ve ilgili mekanizmanın fiziksel ve mekanik boyutları araştırılmıştır. İlk kez, 1941 yılında Maurice Biot yeraltı suyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi mekanizmasını üç boyutlu matematiksel denklemler kullanarak modellemiş ve böylelikle yüzey çökmesi problemi matematiksel olarak ifade edilmiştir (Biot, 1941). Günümüz araştırmacılarının çoğu tarafından yüzey çökmesi probleminin araştırılması alanında temel araştırma olarak kabul edilen bu çalışmada, genel gerilim ve birim deformasyon ilişkileri üç boyutlu denklemler kullanılarak yazılmakta ve bu denklemlere su basıncı değişkeni eklenerek çökme mekanizması ile su akımı birbirleri ile tam etkileşimli olarak ifade edilmektedir.

1950'li ve 1960'lı yıllarda bazı araştırmacıların (Poland, 1958, 1960, 1961; Poland ve Davis, 1956; Poland vd., 1959) yeraltı suyu çekimi ve yüzey çökmesi arasındaki bağlantı ile ilgili yaptıkları gözlemler ve araştırmalar konunun dünya genelinde kabul görmesini sağlamıştır. Bu yıllarda kaya mekaniği dalında etkin gerilim (efektif stres) kavramının yaygın kullanılmaya başlanması, yüzey çökmesi probleminin mekanizmasının tanımlanmasına çok önemli katkı getirmiştir. Taylor (1948); Terzaghi ve Peck (1948) ve Mitchell (1962) etkin gerilim prensibi ve su basıncından elde edilen bilgilerin ince taneli toprak malzemenin

davranışı ile çok ilişkili olduğunu söylemişlerdir. Bunlara ek olarak, Londra'da ve Meksiko şehrinde meydana gelen çökmelerden Domenico ve Miffin (1965)'de yapılan çalışmasında bahsedilmekte ve efektif gerilmenin yeraltısuyu pompalanması sonucu yükselmesinin yüzeyde ölçülebilir seviyede deformasyonun (çökmenin) oluşmasına neden olduğu anlatılmaktadır.

1970'li yıllarda yeraltısuyu çekimi ile oluşan çökme mekanizmasının matematiksel modellenmesi ve ilgili denklemlerin çözülmesi yönünde yapılan araştırmalar yoğunluk kazanmıştır. Yokoo vd., (1971a, 1971b) makalelerinde stres analizinde uygulanan sonlu elemanlar yöntemini Biot'nun konsolidasyon teorisine uygulamışlar ve homojen olmayan, anizotropik ve elastik malzeme (bir, iki ve üç boyutlu) için sayısal çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Gambolati ve Freeze (1973) ve Gambolati vd. (1974) yayınladıkları makalelerde Venedik şehrinin çökmesi ile ilgili olarak matematiksel bir benzeşim çalışması sunmuşlardır. Bu araştırmalarda yeraltısuyu çekimi ile yüzey çökmesinin hesaplanabilmesi için yeraltısuyu hareketini kontrol eden akım denklemi ile konsolidasyon denkleminin birbirleri ile etkileşimli duruma getirilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Çorapçioğlu ve Brutsaert (1977), basınçlı akiferlerde yeraltısuyu çekilmesi sonucu boşluk basıncının azaldığı ve bunun sonucu olarak etkin gerilimin artmasıyla akiferde ve dolayısı ile yüzeyde deformasyon oluştuğunu ve çökme meydana geldiğini söylemişlerdir. Ayrıca deformasyonun elastik olmayıp visko-elastik davranış gösterdiğini ve dolayısı ile önerilen bu yaklaşımın birincil ve ikincil konsolidasyonu daha başarılı olarak modellediğini ifade etmişlerdir. Lewis ve Schrefler (1978) yeraltısuyu çekimi sonucu Venedik'te meydana gelen yüzey çökmesi problemini modellemek için tam etkileşimli bir

sonlu elemanlar yöntemi geliştirmiş ve model sonuçlarının bölgedeki çökmeyi çok başarılı şekilde modellediklerini belirtmişlerdir. Lewis ve Karahanoğlu (1981) jeotermal sahalarda üretim sonucu oluşacak yüzey çökmesini modelleyen matematiksel denklemleri formüle etmişler ve bu denklemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Bear ve Çorapçioğlu (1981a, 1981b) yaptıkları çalışmalarda yeraltısuyu çekimi sonucu oluşacak yüzey çökmesini düşey ve hem düşey hem yatay bileşenini dikkate alan formüller geliştirmişlerdir. Bear ve Çorapçioğlu (1981c) sıcak su basımı ve çekimi sonucu termo-elastik akiferde oluşacak yüzey çökmesini matematiksel olarak modellemişlerdir. Çorapçioğlu (1984) hazırladığı makalede, yeraltısuyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi konusunda yapılan araştırmaları özetlemiştir. Karahanoğlu vd. (1984) sıcak su tipi jeotermal rezervuarlarda üretim sonucu oluşacak yüzey çökmesini matematiksel olarak ifade etmişler, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak geliştirdikleri sayısal modeli Kızıldere sahasına uygulayarak ileriye yönelik sıcaklık, basınç ve deplasmanlar için tahminler yapmışlardır. Aboutit vd. (1985) varyasyonel prensibi ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak termo-elastik ortamdaki konsolidasyonu modellemişlerdir. Lewis vd. (1989) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, deforme olan gözenekli ortamda iki boyutlu ısı ve iki fazlı akışkan akımını modellemişler ve zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemleri deplasman, boşluk suyu basıncı ve sıcaklık değişkenleri için birbirleri ile tam etkileşimli olarak yazmışlardır. Gambolati vd. (1991) İtalya'nın Ravenna bölgesindeki yüzey çökmesinin (1950-1986 yılları arasında toplam 1.30 m) yeraltısuyu çekimi sonucu akıtarıda ve rezervuarda oluşan kompaksiyon nedeniyle ve bölgedeki gaz kuyularından yapılan üretim sonucu olduğunu vurgulamaktadır.

1990'lı yıllardan sonra yüzey çökmesi konusunda yapılan çalışmaların ve araştırmaların sayısında çok artış olmuştur. Araştırmaların büyük çoğunluğunu dünyanın değişik bölgelerinde meydana gelen yüzey çökmesi ve bu olayın yarattığı olumsuz etkileri çözmeye yönelik bilimsel çalışmalar oluşturmaktadır. Bunların yanında çökme probleminin hidrodinamik ve mekanik özelliklerinin de ayrıntılı olarak araştırıldığı çalışmalar ve bu çerçevede kurulan sayısal modelleri bilimsel olarak geliştiren araştırmalar da bulunmaktadır. 2000'li yıllardan itibaren 3 boyutlu modeller geliştirilmiştir ve araştırmaların büyük bir kısmında yüzey çökmesinin hem yatay hem de düşey boyutta olacağı varsayımı dikkate alınmıştır.

Cheo vd. (1992) tabakalı zeminde yapılan yoğun yeraltısuyu çekiminin etkisini araştırmışlar ve boşluk suyu basıncının zemin çökmesi ile doğrusal olmayan şekilde bağlandığını ve toplam gerilimin derinlik boyutundaki değişiminin uniform (tek düze) olmadığını açıklamışlardır. Yeh vd. (1996) akiferde basınç düşümü sonucu gelişen çökme mekanizmasını araştırmışlar, denge denklemlerini ve çok boyutlu akım denklemlerini tam etkileşimli olarak kullanmışlar ve Galerkin sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde ettikleri çözümleri analitik çözümlerle karşılaştırmışlardır.

Bunlara ek olarak Riley (1998), Dr. Poland'ın araştırmalarına atıf yaparak konunun gelişimi hakkında bilgiler vermiş ve ekstensometre/piyezometre ölçümleri üzerinde yaptıkları sayısal modelleme sonuçlarının değerlendirmelerinde elastik ve elastik olmayan sıkıştırma katsayılarının çok etkili olduğunu ve elastik olmayan depolamanın elastik depolamaya göre 20 – 100 kata kadar fazla olabileceği yorumunu yapmışlardır. Elastik olmayan depolama boşaltılmasının yenilenemeyen rezerv

olarak değerlendirilmesi gerektiği ve kaçınılmaz olarak yüzey çökmesinin oluşacağı belirtilmiştir.

Shearer (1998) MODFLOW programında yapılan değişiklik ile (Tabakalar Arası Drenaj Paketi) Çin'in Tianjin bölgesinde yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesi problemi çalışmıştır. Bölgede konsolide olmamış Kuvaterner ve Neojen yaşlı denizel kum ve kil seviyelerinden oluşan 10 farklı akiferin bulunduğu, 1950 yılından beri yüzey çökmesi tespit edildiği ve bu çökmenin artan sanayi gelişmesi nedeniyle bölgede yapılan yoğun yeraltısuyu çekimi sonucu 88 mm/yıl seviyesine kadar yükseldiği belirtilmektedir. Hazırlanan model uygun sınır koşulları ile uygulanmış, 1957-1993 yıllarına ait çökme verileri kullanılarak kalibre edilmiş ve farklı üretim senaryoları kullanılarak 2020 yılı için yüzey çökmesi tahminleri yapılmıştır.

Kim ve Parizek (1999) geliştirdikleri sayısal modelde poroelastik davranış varsayımı ile doymun olmayan gözenekli ortamdan su çekilmesi ile oluşan üç boyutlu konsolidasyon problemini Galerkin Sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır.

Burbey ve Helm (1999) geliştirdikleri 3 boyutlu akım ve deformasyon modelinde MODFLOW programına GDM (taneli deformasyon modülü) eklemiştirler. Yeraltısuyu çekimi ile oluşan çökmenin, killerin ve örtü tabakaların elastik olmayan birimleri içinde olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yatay yönde olan deformasyonun ise taneli malzemelerde oluştuğunu söylemişlerdir.

Pei vd. (2000) tarafından üç boyutlu sayısal model geliştirilerek Çin'in Suzhou şehrinde meydana gelen yeraltısuyu çekimine bağlı yüzey çökmesi problemi modellenmiş ve yeraltısuyu akımı ve doğrusal olmayan konsolidasyon öngörülü model denklemleri sonlu farklar yöntemi ile çözülmüştür.

Gambolati vd. (2000), Po ovasındaki yüzey çökmesi problemini yeraltısuyu akım denklemi ile poroz ortam deformasyonu ilişkilerinin etkileşimli ve bağımsız olarak çözülmesini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve her iki durumda boşluk basıncı değişkeninin üretim formasyonunda etkilenmediği, üretim zonunun yanındaki akitard birimlerde ise etkileşimli çözümün yüksek basınç değerleri verdiği ve basıncın kısa bir zaman içinde ortam deformasyonu ile yüzey çökmesi sonucu düştüğü belirtilmiştir. Genel değerlendirme olarak bağımsız çözüm yönteminin normal konsolidasyon ve basınçlı ortamlarda güvenilir sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Gambolati vd. (2001), petrol ve gaz sahalarında oluşan yüzey çökmesinin tahmin edilmesi için poroelastik denklemlerin çözümünde "sanal iş" (virtual work) prensibini kullanarak ya taneler arası etkin gerilim ile boşluk basıncı gradyanı dağıtılmış kütle yükü olarak ya da, toplam gerilim boşluk basıncı ile birlikte değerlendirmişler ve oluşturulan denklemleri özetlemişler ve tartışmışlardır.

Li (2002), yeraltısuyu çekimi ve enjeksiyonu ile oluşan yüzey değişimini modellemiş ve parametrelerin duyarlılığını araştırmıştır. Li (2003), tek boyutlu yüzey çökmesi problemini analitik olarak incelemiş ve suya doygun akifer biriminin doğrusal olmayan yarı-poroz bir ortam olarak değerlendirildiğini ve Las Vegas'taki akiferde yapılan depolama ile su çekimi uygulamalarının yaratabileceği olası çökme problemlerinin araştırıldığını anlatmaktadır.

Kim (2004; 2005) doygun olmayan ve anizotropik ortamda yeraltısuyu çekimi ile oluşan üç boyutlu yeraltısuyu akımı ve yüzey deformasyonunu modellemek amacıyla hidrojeomekanik sayısal model geliştirmiştir. Doygun ve doygun olmayan ortamda ve deformasyona uğrayan anizotropik jeolojik ortamda yeraltısuyu

akımını modellemek amacı ile tam etkileşimli poroelastik denklemler kullanılmış ve Galerkin sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Sayısal benzeşim çalışmaları ile anizotropinin, hidrolik yük ve deplasman vektörlerinin zaman ve mekan boyutundaki dağılımlarına etkileri araştırılmıştır.

Shen vd. (2006), 3 boyutlu akım ve tek boyutlu (düşey) deformasyonu modellemişler ve Japonya'da gaz üretim sahasına uygulamışlardır.

Teatini vd. (2006), İtalya'da Po ovasındaki Emilia Romagna bölgesinde ekonomik ve turizm nedenleriyle yapılan yoğun yeraltısuyu çekimlerinin yüzey çökmelerine etkilerini araştırmışlar, sonlu elemanlar akım ve poromekanik deformasyon modeli kullanmışlar ve çalışmalarını ayrıntılı jeolojik çalışmalarla desteklemişlerdir. Geliştirilen model ile 1946 yılından itibaren olan gelişmeler değerlendirilmiş, son model 50 yıldır yapılan piezometre ve extensometre ölçümleri ile kalibre edilmiş ve 2016 yılı için yüzey çökmesi tahminleri yapılmıştır.

Kihm vd. (2007), 3 boyutlu model ile doygun olmayan nehir sedimanlarından oluşan akiferde su akımı ve çökme mekanizmasını tam etkileşimli olarak modellemişlerdir. Yapılan çalışmada önce durgun ortamda basınç yükleri, hidrolik yükler ve akım hızlarının dağılımı bulunmuş ve ikinci aşamada doygun olmayan zamana bağlı durumda basınç yükleri, hidrolik yükler ve akım hızlarının hesaplandığı ve sonuçların sahada ölçülen hidrolik yükler ve düşey deplasman ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Settari vd. (2008), Kuzey Adriyatik'te bulunan rezervuarda gaz üretiminin neden olduğu yüzey çökmesini çalışmışlardır. Araştırmada rezervuarın tanımlanmasının ve çökme mekanizmasının karmaşık olması rezervuar ve jeomekanik simülasyonların etkileşimli olarak uygulanması gereğini ortaya çıkartmıştır. Tam

etkileşim durumunda sonuçların sadece akifer alanı ile sınırlı olduğu bu nedenle doğrudan yapılan etkileşimle daha sağlıklı sonuçların alınabileceği vurgulanmıştır.

Kumarcı vd. (2008), WTAQ programı kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile basınç düşümü sonunda oluşan çökmeyi hesaplamışlar ve modellerinde zamana bağlı elastik davranış kullanmışlardır.

Castelletto vd. (2008), araştırmalarında Venedik şehrinin kurtarılmasına yönelik olası projeleri tartışmışlardır. Enjeksiyon yapılarak şehrin yükseltilmesi projesi değerlendirilmekte ve bu konu ile ilgili olarak yapılması gerekli araştırmalar irdelenmektedir.

Wu vd. (2009), Çin'in Su-Xi-Chang bölgesinde meydana gelen yüzey çökmesi problemini çalışmışlardır. 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirmişler ve konsolidasyon modellerinde hidrolik iletkenlik ve özgül depolama katsayılarının porozite ile değiştiği varsayımını kullanmışlardır. Oluşturulan model bölgeye uygulanmış ve 1996-2004 arası dönem için elde edilen sonuçların gözlenen değerlerle iyi bir uyum sağladığı ifade edilmiştir.

Shen ve Xu (2011), Shangay şehrinde meydana gelen yüzey çökmesi problemini üç boyutlu yeraltısuyu akımı ve tek boyutlu deformasyon koşulları altında çalışmışlar ve uygulamalarını Shangay şehrinin çok tabakalı ve yumuşak akifer-akitard sisteminde yapmışlardır. Konsolidasyon ile etkilenen sıkıştırma katsayısı ve hidrolik iletkenlik özelliğini çalışmalarında kullanmışlar ve çekilen su miktarı, su çekilen seviye ve su çekilen bölgenin yüzey çökmesine etkisini irdelenmişlerdir.

Ye vd. (2011), çok ölçekli sonlu elemanlar modeli ile bölgesel ve yerel çökmeleri ve Shangay'da 1986-1988 arasında gözlenen yüzey çökmesini araştırmışlar ve Merchant

modelinin değiştirilerek elastik, viskoelastik ve elastik-plastik parametreler kullanılarak modellenebileceğini anlatmışlardır.

Galloway ve Burbey (2011), yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesi konusunda yapılan araştırmaları özetlemişlerdir. Söz konusu mekanizma ile oluşan yüzey hareketleri konusunda değişik bölgelerde yapılan gözlemler ve ilgili ölçme teknikleri anlatılmakta ve çökme hareketinin önlenmesi konusunda yapılan öneriler değerlendirilmektedir. Çökme hareketinin gözlenmesi için kullanılan ve uygulanan yöntemler (GPS, Extensometre, InSAR, LİDAR) hakkında bilgiler verilmektedir. Diğer taraftan bölgesel olarak gelişen yüzey çökmesinde akiferde gelişen düşey çökme hareketinin yanında, akitard içinde oluşan çökme hareketlerinin de etkili olduğu ve bu konuda yapılan modelleme çalışmaları hakkında bilgiler verilmekte ve olayın mekanizması detaylı bir şekilde aktarılmaktadır. Ayrıca MODFLOW programı ile bağlantılı yüzey çökmesi sayısal modelleri SUB, SUB-WT ve COMPAC ile ilgili simülasyon özellikleri karşılaştırmalı olarak özetlenmektedir.

Xu vd. (2012), üç boyutlu akımı ve buna bağlı tek boyutlu konsolidasyon sayısal modeli çalışmalarında Shangay'da bulunan çok tabakalı akifer ve akitard sisteminde meydana gelen sızma ve yüzey çökmesi olgularını çalışmışlardır. İki senaryo şeklinde yapılan çalışmada, ilk olarak yeraltı yapılarının dağınık durumda olması ve ikinci senaryoda ise yeraltı yapılarının kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde bulunması değerlendirilmiş, değişik koşullar için yüzey çökmelerinde oluşacak artışlar tahmin edilmiştir.

Galloway ve Sneed (2013), ABD Jeoloji grubu tarafından yapılan üretime bağlı akifer kompaksiyonu ve çökmesi probleminin çözümüne yönelik araştırmaları özetlemektedirler. Bunu

yaparken etkilenen akifer sistemini tanımlamayı, bölgesel değerlendirmeleri, mekanizmayı kontrol eden etkileşimli prosesleri analiz etmeyi geçmiş ve gelecekteki akım ve çökme mekanizmalarının davranışlarını göz önüne almayı hedeflemişlerdir.

Li vd. (2014), çalışmalarında, poroelastik iki boyutlu dikkörtgen ortamda zamana bağlı akım ve deformasyon denklemleri için analitik çözüm geliştirmişlerdir. İzotropik, homojen ve sıkışabilen poroz ortamda akışkan ve katı ilişkisi Biot'nun konsolidasyon modeli ile tanımlanmıştır. Analitik çözüm sonuçları tam çözümle ve sayısal çözümlerle karşılaştırılarak desteklenmiştir. Ayrıca basınçlı akiferden yapılan su çekimi örneği kullanılarak analitik çözüm değerleri ile sayısal çözümler arasındaki uyum geliştirilen analitik modelin hassasiyeti ve güvenilirliği için başarı ölçütü olarak ileri sürülmüştür.

Chang vd. (2014), tarafından basit bir analitik model önerilmiş ve zamana bağlı yüzey çökmesi ile rezervuarın terk edilmesinden sonra şeyl içeren birimlerde oluşan çökme mekanizması poroelastik ve viskoelastik ilişki ile modellenmiştir.

Schmid vd. (2014), geliştirdikleri modelde, yüzey deformasyonunun akifer transmisivitesi ve depolaması ile etkileşimli olduğunu ve yüzey çökmesi ve yükselmesinin deformasyon bağımlı akımlarla ilişkilendirildiğini ve ayrıca akifer yüklerine ve diğer akım terimlerine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Zhang vd. (2015), Shanghai'da yeraltısuyu çekimi ve suyun geri basımı sonucu gelişen yüzey çökmesi ve yüzey yükselmesi mekanizmalarını arazi ve laboratuvar değerlerini kullanarak çalışmışlardır. Uzun dönemli yeraltısuyu çekilmesi sonucu akifer ve akitard seviyelerde oluşan deformasyonun elastik, plastik, visko elastik ve viskoplastik bileşenlerinin olduğu,

geri kazanılabilen elastik ve viskoelastik deformasyonların toplam deformasyonun çok küçük bir parçası olduğu belirtilmektedir. Ayrıca yüzey çökmesinde ve yükselmedeki gecikmenin (yeraltısuyu seviyesindeki yükselmeye göre) tüm birimlerdeki visko-plastik deformasyona ve akitard seviyelerdeki konsolidasyona bağlı olduğu belirtilmektedir.

Gambolati ve Teatini (2015), yeraltısuyu çekimi/enjeksiyonu sonucu oluşan yüzey çökmesi/yüzey yükselimi, yüzeyde oluşan kırıklar, dolaylı olarak gelişen sismik aktiviteler konularını değerlendirmekte ve konu ile ilgili tarihsel gelişimi dünyanın değişik bölgelerinden örneklerle aktarmaktadır. Ayrıca yüzey çökmesi ve yüzey yükselmesi konularındaki mekanik prosesler ayrıntılı olarak anlatılmakta ve bu konulardaki etkileşimli diferansiyel denklemler verilmektedir. Yeraltısuyu çekimi ve enjeksiyonu ile oluşan yüzey deformasyonlarının mekanik özellikleri ve ilgili denklemler bu çalışmada ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Ayrıca yüzey deformasyonlarının gözlenmesi ve ölçülmesi konusundaki uygulamalar hakkında bilgiler verilmektedir.

Lin vd. (2015), Pekin'in kuzey bölgesinde 2003-2010 yılları arasında meydana gelen yüzey çökmesinin nedenlerini araştırmayı, bu olayın gelişmesini tanımlamayı ve tetikleyici faktörleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla kuyu ekstensometre verileri, interferometri'den elde edilen yüzey çökmeleri, yeraltı su seviyeleri, hidrojeolojik bilgiler ve Landsat TM görüntülerini kullanılarak yüzey çökmesinin mekansal ve zaman boyutundaki yapıları araştırılmış, yüzey çökmesinin yeraltısuyu seviye değişimleriyle, sıkıştırılabilen tabaka kalınlığı ve şehirleşme ile olan ilişkileri incelenmiş ve yüzey çökmesinin derinlik boyutundaki dağılımı için siltli kil seviyelerinin yüzey çökmesinde etkili olduğu vurgulanmıştır.

Lin vd. (2015), çok tabakalı akifer sisteminde yeraltısuyu akımını ve deformasyonu modellemek için 3 boyutlu analitik benzeri yeraltısuyu akım modeli ve tek boyutlu deformasyon modeli önermişlerdir. Önerilen model yardımı ile analitik çözüm ile su seviyelerinin bir kuyu etrafındaki değişimi modellenilebilmekte ve tabakalardaki kompaksiyon hesaplanabilmekte ve kurulan modelin çoklu kuyu ve çok tabakalı sistemlerde kullanılabilmesi belirtilmektedir.

Lei vd. (2015), hazırladıkları makalede, TOUGH 2 simülörünü geliştirerek 3 boyutlu konsolidasyonu entegre etmişlerdir. Biot'nun 3 boyutlu konsolidasyon modeli TOUGH 2 deki çözüm sistemine bağlanmakta ve bu modelden elde edilen basınç ve sıcaklık değerleri ile permeabilite ve porozite meydana gelen değişiklikler TOUGH2 sisteminde tekrar çözümde kullanılmaktadır. Geliştirilen modelleme yöntemi tek boyutlu Terzaghi problemine, Çin'de bulunan bir CO2 projesine ve Kaliforniya'daki Gayzer sahasına uygulanmıştır.

Tsai (2015), tek boyutlu viskoelastik-plastik konsolidasyon davranışını kullanarak komşu akiferlerdeki su yükü değişimine göre akitard konsolidasyonunu modellemektedir. Model değişken toplam gerilim yaklaşımını kullanmakta ve hidrolik yük ve düşey boyutta oluşacak deplasmanı tam etkileşimli şekilde çözmektedir. Çalışmada Voigt modeli kullanarak viskoelastik-plastik davranış şekli değişken yay elastik modülleri yardımı ile tanımlanmıştır. Ayrıca modelde yapılan hesaplamalar değişken hidrolik kondüktivite, elastik modül ve değişik kütle kuvveti kullanılarak yapılmıştır.

Kang ve Li (2015), çalışmalarında, MODFLOW-NDIS paketini geliştirmişler ve 3 boyutlu doğrusal olmayan deformasyon ve 3 boyutlu su akımı denklemlerini kullanmışlardır. Geliştirdikleri paketin MODFLOW-SUB

paketine göre (tek boyutlu deformasyon) daha yeni ve gerçekçi olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Yang vd. (2015), doğrusal olmayan hidrolik parametrelerin yeraltısuyu çekimi sonucu oluşan çökme hareketine etkilerini geliştirdikleri Galerkin Sonlu Elemanlar Modeli ile çalışmışlardır. Pompalama sonucu su seviyesinde oluşan düşümün basınç azalmasına neden olduğu ve bunun porozite ve permeabiliteyi azalttığı ve azalan permeabilitenin kuyuya yakın yerlerde hidrolik gradyanı ve sızma kuvvetlerini artırarak çökmeyi hızlandığı anlatılmaktadır.

Jafari vd. (2016), Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisi ile 3 boyutlu yeraltısuyu akım modelini MOD-FLOW programına entegre etmişler ve İran'da Saveh sahasına uygulamışlardır. Model çalışmaları sonunda InSAR, extensometre ve sayısal model sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduklarını ifade etmişlerdir.

Ye vd. (2016a), Çin Shanghai bölgesinde oluşan yüzey çökmesini modellemek için birbirleri ile etkileşimli 3 boyutlu yeraltısuyu akımı ve 3 boyutlu akifer-sistem deplasmanı yaklaşımını kullanmışlar ve 1979-1995 yılları arasındaki durumu simüle etmişlerdir. Model kalibrasyonunda piyezometrik, jeodetik ölçümler ve kuyu extensometre değerleri 16 yıllık süre için kullanılmış ve 3 boyutlu model ile ölçülen piyezometrik ve deformasyon değerlerini başarılı olarak modellemiştir. Yatay deformasyonlar için ilk kez tahminler yapılmış ve bunların toplam yüzey çökmesinin % 10' unu geçmeyeceği ve dolayısı ile yapılara (metro) zarar vermeyeceği ifade edilmiştir.

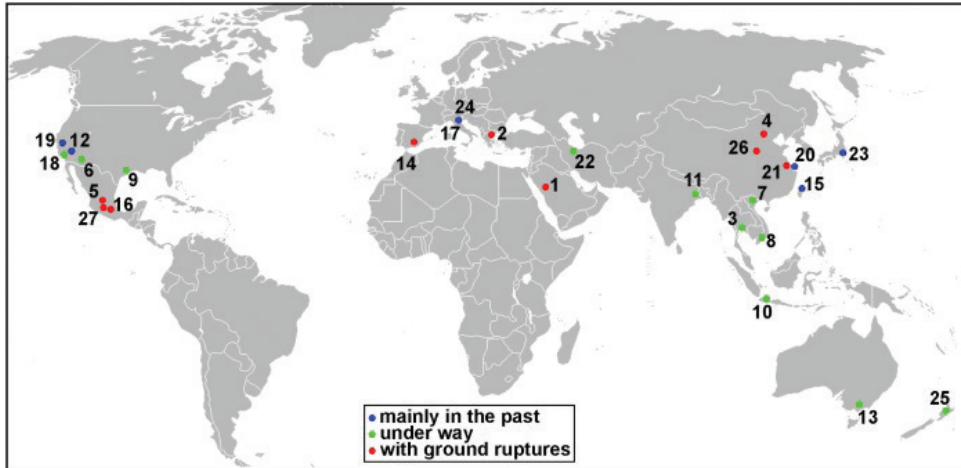
Zang vd. (2017), zemin iskelet yapısının dengesi ve yeraltısuyu akımının devamlılığı ilkelerini kullanarak tamamen etkileşimli üç boyutlu bir matematiksel model geliştirmiş ve modelde kullanılan mekanik ve hidrolik

parametreleri doğrusal olmayan ilişki ile tanımlamıştır.

ÜLKELERDEN ÖRNEKLER

Önceki kısımda yeraltısuyu çekimi sonrası oluşan yüzey çökmesi probleminin mekanizması ve modellenmesi konusunda yapılan çok sayıda makale özetlenmiş ve konu hakkında tarihsel gelişmeler bilimsel çerçevede sunulmuştur. Bu kısımda dünya genelinde ciddi boyutlara ulaşan ve şehirlerin altyapısını olumsuz olarak etkileyen ve ciddi çevre problemlerine neden olan yüzey çökmesinin ülkeler bazında değerlendirilmesi yapılmaktadır. Gambolati ve Teatini (2015) yaptıkları araştırmada, dünya genelindeki çökme probleminin dağılımını harita üzerinde göstermektedir (Şekil 1). İlgili ülkelerde

gözlenen ve ayrıntılı olarak araştırılan problemin sayısal değerleri Çizelge 1’de verilmektedir. Çizelge dikkatli incelendiğinde 2015 yılına kadar yapılan jeotermal akışkan üretimi sonunda Yeni Zelanda’nın Wairakei sahasında 14.5 m yüzey çökmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca benzer bir şekilde Meksiko şehrinde yapılan yoğun su çekimi sonucu 13 m yüzey çökmesi meydana gelmiştir. Bu değerlerin yanında yüzey çökmesi probleminin görüldüğü alanın boyutları daha ürkütücüdür. ABD San Joaquin vadisinde etkilenen alanın 13 500 km² ve Houston’da ise 12 000 km² olduğu görülmektedir. Benzer örneklerin verildiği Çizelge 2’de Çin’de meydana gelen yüzey çökmeleri listelenmekte ve Çin’in Hebei bölgesinde 10 şehrin yüzey çökmesinden etkilendiği ve etkilenen alan toplamının 36 000 km² olduğu belirtilmektedir.



1: Wadi Al-Yutamah, Suudi Arabistan; 2: Anthemountas Baseni, Yunanistan; 3: Bangkok, Tayland; 4: Pekin, Çin Halk Cumhuriyeti; 5: Celaya, Mexico; 6: Eloy Baseni, Arizona; 7: Hanoi, Vietnam; 8: Ho Chi Minh, Vietnam; 9: Houston, Texas; 10: Jakarta, Endonezya; 11: Kolkata, Hindistan; 12: Las Vegas, Nevada; 13: Latrobe Vadisi, Avustralya; 14: Lorca, İspanya; 15: Taipei, Tayvan; 16: Mexico City, Mexico; 17: Ravenna, İtalya; 18: San Joaquin Vadisi, Kaliforniya; 19: Santa Clara Vadisi, Kaliforniya; 20: Shanghai, Çin Halk Cumhuriyeti; 21: Su-Xi-Chang alanı, Çin Halk Cumhuriyeti; 22: Tehran, İran; 23: Tokyo, Japonya; 24: Venedik, İtalya; 25: Wairakei, Yeni Zelanda; 26: Xian, Çin Halk Cumhuriyeti; 27: Zamora de Hidalgo, Mexico Şehri.

Şekil 1. Dünya genelinde yeraltısuyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesinin dağılımı (Gambolati ve Teatini, 2015). Haritada üç değişik tanım kullanılmıştır; i- geçmişte oluşanlar (mavi renkli noktalar), ii- halen devam edenler (yeşil renkli noktalar), iii- yüzeydeki çatlak oluşumları (kırmızı renkli noktalar).

Figure 1. Distribution of surface subsidence problems throughout the World (Gambolati and Teatini, 2015). Three different symbols are used in the map; i- mainly in the past; ii- under way; iii- with ground ruptures.

Çizelge 1. Dünya'nın değişik bölgelerinde saptanan yüzey çökmesi (Gambolati ve Teatini, 2015).

Table 1. Surface subsidence detected in the World (Gambolati and Teatini, 2015).

No	Bölge	Maksimum Çökme (m)	Derinlik (m)	Alan (km ²)
1	Wadi Al-Yutamah	0.3 (1993-1996)	0-150	150
2	Anthemountas Baseni		0-150	40
3	Bangkok	2.1(1933-2002)	30-300	700
4	Pekin	1.1(1955-2007)	20-400	4200
5	Celaya	3.1 (1985-2008)	50-200	50
6	Eloy Baseni	3 (1948-1977)	100-760	1000
7	Hanoi	0.5 (1988-2003)	0-80	35
8	Ho Chi Minh	0.4 (1996-2005)	50-240	250
9	Houston	3 (1915-2000)	60-900	12000
10	Jakarta	4.1 (1974-2010)	40-240	660
11	Kolkata	1.1 (1956-2000)	50-160	150
12	Las Vegas	2 (1935-2000)	200-300	250
13	Latrobe Vadisi	1.3 (1960-1977)	0-150	400
14	Lorca	2.2 (1992-2012)	50-300	140
15	Taipei	2 (1955-1991)	50-250	200
16	Meksiko Şehri	13 (1960-2015)	0-350	250
17	Ravenna	1.4 (1897-2002)	80-450	400
18	San joaquin Vadisi	10 (1930-2015)	60-600	13500
19	Santa Clara Vadisi	4.3 (1910-1995)	50-280	500
20	Sanghai	2.6 (1958-2002)	10-330	5000
21	Su-Xi-Chang alanı	1.1 (1960-1995)	20-200	4000
22	Tahran	3 (1989-2004)	20-100	500
23	Tokyo	4.3 (1900-1976)	0-400	3400
24	Venedik	0.12 (1952-1973)	70-350	150
25	Wairakei	14.5 (1950-2015)	250-800	25
26	Xian	2.3 (1959-1995)	50-370	240
27	Zamora de Hidalgo		0-300	15

Şekil 2, 3 ve 4 yüzey çökmesi probleminin evrensel boyutlarını ve çevresel etkilerini vurgulaması yönünden çarpıcı örnekler göstermektedir. Bu şekillerde sunulan görseller,

yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesinin ciddi hasarlar oluşturabileceğini göstermesi açısından son derece etkileyicidir.

Karahanoğlu

Çizelge 2. Çin'in önemli şehirlerinde gözlenen yüzey çökmesinin özeti (Hu vd. 2004'den Türkçe'ye çevrilmiştir).
 Table 2. Summary of surface subsidence observed in Major cities of China (translated from Hu et al., 2004).

Şehir	Alan (km ²)	Açıklama
Shangay	850	1920 de başlayan çökme hareketi maksimum değere (2.63m) 1964 yılında ulaşmıştır. Çökme hareketi tedrici olarak kontrol altına alınmıştır.
Tianjin	10,000	1959' dan beri ovada çökme hareketi olmakta ve 10 000 km ² alanda etkisini sürdürmektedir. Maksimum çökme 3.06 m dir ve ortalama çökme hızı 8 ile 56 mm/yıl mertebesindedir.
Suzhou, Wuxi, Changzhou	380	Yüzey çökmesi 1960 dan itibaren gözlenmektedir ve kümülatif çökme değerleri yaklaşık 1 m dolayında olup, çökme hızı 15-50 mm/yıl seviyesindedir.
Ningbo, Jiaying	263	1960-1989'a kadar bu şehirlerde kümülatif çökmeler 0.346 ve 0.597 m dolayındadır ve çökme hızları 18 ve 41.9 mm/yıl dır.
Heze, Jining, Dezhou	53	Bu şehirlerde çökme 1978 yılında gözlenmiştir ve kümülatif değerler 0.07, 0.063 ve 0.104 m kadardır. Maksimum hızlar ise 9.68, 31.5 and 20 mm/yıl dır.
Xi'an	250	1950'lerde başlayan çökme maksimum 1.9 m ve maksimum çökme hızı yılda 136 mm dir.
Xuchang, Kaifeng, Luoyang, An'yang	59	Çökme ilgili şehirlerde 1985, 1979 ve 1979 yıllarında başlamıştır ve maksimum çökme değerleri 0.208, 0.21, 0.113 ve 0.337 m olup; An'yang bölgesinde çökme hızı yılda 65 mm dir.
Hebei Bölgesinde 10 şehir	36,000	Bölgede çökme 1950'de başlamıştır. Etkilenen şehirler Cangtzhou, Hengshui, Renqiu, Hejian, Bazhou, Baoding, Dacheng, Nangong, Feixiang, Handan'dır. Maksimum çökme 1.131m olup maksimum hız 96.8 mm/yıl dır.
Fuyang	360	Çökme 1970 yılında başlamıştır. Maksimum çökme 1992 de 1.02 m dir ve hız ise yılda 60–110 mm arasındadır.
Ha'erbing, Daqing, Qiqiha'er, Jiamusi	?	Binalarda ve yüzeyde kırılmalar 1974 de başlamıştır ve nedeni tamamen yoğun yeraltısuyu çekimidir. Ha'erbing ve Daqing bölgelerinde etkilenen alanlar 258 ve 4000 km ² dir ve yeraltısuyu çekilmeleri yılda 26.85 ve 20–30 m dolayındadır.
Taiyuan, Datong, Yu'ci, Jiexiu	200	Çökme Taiyuan'da 1979 yılında ve Datong'de 1988'de başlamıştır. Taiyuan'de maksimum çökme 1.967 m ve hız yılda 0.037–0.114 mm dir. Datong, Yu'ci ve Jiexiu şehirlerinde çökme hızları 31, 10–20 and 5–7.5 mm/yıl dır.
Beijing	314	Çökme 1950 lerde başlamıştır ve maksimum kümülatif çökme 0.597 m dir.
Kunming	?	Bu şehirde çökme doğu tren yolunda gözlenmiştir, ölçüm olmadığı için çökme miktarı bilinmemektedir.
Zhanjiang	0.25	Çökme 1960'larda başlamıştır ve maksimum çökme 0.11 m olarak ölçülmüştür. Çökme, su çekiminin azaltılması ile kontrol altına alınmıştır.
Haikou	?	1990'larda 0.07 m olan çökme, son zamanlarda çok düşük seviyelerdedir.
Fuzhou	9	Çökme 1957 yılında gözlenmiştir; kümülatif çökme 0.68 m dir ve çökme hızı ise yılda 2.9–21.8 mm arasındadır.
ÖZET	48,728	Çin'de 39 şehir yüzey çökmesinden etkilenmiştir. Bu şehirler Yangtze nehri deltası ovasında, Hebei ovasında, Kuzeydoğu Çinde, Huanghe nehri ovasında ve dağlık bölgedeki ovalarda yer almaktadır. Yüzey çökmesi probleminden dolayı toplam ekonomik kayıp 1997 yılı itibarı ile RMB \$100 milyon dur.



Şekil 2. Yüzey çökmesi ile ilgili bazı görseller a) Venedik'te 2013 de gel-git zamanı oluşan su basması, b) Meksiko şehrinde bulunan bir kuyuda yapılan ölçüm 1936-2003 yılları arasındaki yüzey çökmesini göstermektedir, c) Arizona Maricopa'da oluşan 13 m derinlikteki yüzey yarığı, d) Çin'de Xian şehrinde caddede oluşan çatlak ve binadaki hasar (Gambolati ve Teatini, 2015).

Figure 2. Some examples for surface subsidence: a) tidal flood in Venice in 2013, b) subsidence measured during 1936-2003 in a well in Mexico, c) surface rupture, 13 m deep, in Maricopa, Arizona, d) crack formed on the street and deviation in a building in Xian City, China (Gambolati and Teatini, 2015).



Şekil 3. Meksiko şehrinde bulunan Basilica de Santa Maria de Guadalupe'un yüzey çökmesi dolayısıyla eğilmesi (Google taraması, 2018).

Şekil 3. Tilting of Basilica de Santa Maria de Guadalupe in Mexico city (Google search, 2018).

Amerika Birleşik Devletleri

Yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesi problemi ABD de 1900'lü yıllardan beri araştırılmaktadır. Problemin boyutları ve yaptığı hasarlar tespit edildikten sonra konu ciddi olarak araştırılmış, konferanslar düzenlenmiş ve bilimsel çalışmalar yapılmıştır. ABD Kaliforniya'da Santa Clara, Delano-Tulare-Wasco, San Joaquin bölgelerinde ve Las Vegas vadisinde belirlenen ve saptanan problem birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Şekil 5'deki resim Kaliforniya'da Joaquin vadisinde yapılan yeraltısuyu üretimi sonucunda oluşan yüzey çökmesini en çarpıcı şekilde gösteren örnek bir fotoğraftır. Yıllar boyunca yapılan yeraltısuyu çekimi sonucu yüzeyde oluşan çökme, kuyunun muhafaza borusu üzerinde net olarak görülmektedir. Poland öncülüğünde

yapılan araştırmalar ve hazırlanan raporlar sayesinde konunun tanımlanması ve çökmenin durdurulması yönünde önemli aşamalar kaydedilmiştir. ABD Jeolojik Araştırma grubu tarafından konu ayrıntılı olarak araştırılmış ve yüzey çökmesi probleminin çözümüne yönelik olarak yapılan çalışmalar (akifer sisteminin tanımlanması, bölgesel değerlendirmeler, mekanizmayı kontrol eden proseslerin analizi ve geçmiş ve gelecekteki akım ve çökme mekanizmalarının davranışları gibi) Galloway ve Sneed (2013) tarafından özetlenmiştir (Rappleye, 1933; Tolman ve Poland, 1940; Ingerson, 1941; Poland ve Davis, 1956; Poland, 1958; 1960; 1961; Poland vd., 1959; Poland ve Davis, 1969; Çorapçioğlu ve Brutsaert, 1977; Poland, 1984; Li ve Helm, 1997; Riley, 1998; Galloway ve Sneed, 2013; Gambolati ve Teatini, 2015; Lei vd., 2015; Faunt vd., 2016).



Şekil 4. Chanchun (Çin) şehrinde oluşan yüzey çökmesinin yaptığı hasar (Google taraması).

Figure 4. The damage caused by surface subsidence in Chanchun city, China (Google search).

İtalya

İtalya'da yapılan yüzey çökmesi ile ilgili araştırmalar ilk yıllarda turizm potansiyeli nedeniyle Venedik şehri özelinde yoğunlaşmış ve daha sonraları diğer bölgelerdeki yoğun endüstriyel faaliyetlere bağlı artan yüzey deformasyonları konunun ülke geneline yayılmasına neden olmuştur. Venedik şehrinde ve Po ovasında, Emilia-Romagna ve Ravenna bölgesinde ve Kuzey Adriyatik sahalarında meydana gelen yüzey çökmesi problemlerini araştırmak üzere 1970'li yıllardan itibaren çok sayıda araştırma yapılmış ve adı geçen bölgelerdeki çökme problemlerinin mekanik olarak tanımlanması ve sayısal modelleme konuları ayrıntılı olarak incelenmiştir (Gambolati ve Freeze, 1973; Gambolati vd., 1974; Lewis ve Shreffler, 1978; Gambolati vd., 1991, Gambolati

vd., 2000; Gambolati vd., 2001; Teatini vd, 2005, Teatini vd., 2006, Castelletto vd., 2008; Settari vd., 2008; Gambolati ve Teatini, 2015). Bunlar arasında Gambolati ve ekibinin yaptığı çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır ve yüzey çökmesi probleminin mekanik olarak açıklanmasında ve problemin sayısal olarak çözümündeki araştırmalarda bilimsel anlamda önemli katkılar sunmaktadırlar.

Lewis ve Schreffler (1978), yeraltısuyu çekimi sonucu Venedik'te meydana gelen yüzey çökmesi problemini modellemek için tam etkileşimli bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirmiş ve model sonuçlarının bölgedeki çökmeyi çok başarılı şekilde modellediklerini belirtmişlerdir. Gambolati vd. (1991), İtalya'nın Ravenna bölgesindeki yüzey çökmesinin (1950-1986 yılları arasında toplam 1.30 m) yeraltısuyu

çekimi sonucu akıtarıda ve rezervuarda oluşan kompaksiyon nedeniyle ve bölgedeki gaz kuyularından yapılan üretim sonucu oluştuğunu vurgulamaktadır. Gambolati vd. (2000), Po ovasındaki yüzey çökmesi problemini temel almışlar ve yeraltısuyu akım denklemi ile poroz ortam deformasyonu ilişkilerinin etkileşimli olarak ve bağımsız olarak çözülmesini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Gambolati vd. (2001) tarafından petrol ve gaz sahalarında oluşan yüzey çökmesinin tahmin edilmesi için iki farklı mekanik yöntem kullanılmış ve bu iki yaklaşımla oluşturulan denklemler özetlenerek tartışılmıştır. Settari vd. (2005; 2008), kuzey Adriyatik'te bulunan rezervuarda gaz üretimi sonucu oluşan yüzey çökmesini çalışmışlardır. Teatini vd. (2005) tarafından Ravenna bölgesindeki yüzey çökmesi probleminin yaklaşık bir asırdır devam ettiği ve bu hareketle ilgili bilgi birikimi sonunda oluşan 1987-2002 yılları arasındaki verilerin CBS ortamına aktarılarak çökmenin boyutları ve bölgedeki dağılımı yönünde değerlendirildiğini belirtmektedir. Teatini vd. (2006), İtalya'da Po ovasında bulunan Emilia Romagna bölgesinde ekonomik nedenler ve turizm nedeniyle yapılan yoğun miktarda yeraltısuyu çekimlerinin yüzey çökmelerine neden olduğunu vurgulamakta ve yüzey suyu kullanımlarının bu çökmeyi yavaşlattığını ancak yüzey çökmesinin devam ettiğini belirtmektedirler. Castelletto vd. (2008) araştırmalarında, Venedik şehrinin kurtarılmasına yönelik olası projeleri tartışmışlardır. Enjeksiyon yapılarak şehrin yükseltilmesi projesi değerlendirilmekte ve bu konu ile ilgili olarak yapılması gerekli araştırmalar irdelenmektedir.

Gambolati ve Teatini (2015), yeraltısuyu çekimi/enjeksiyonu sonucu oluşan yüzey çökmesi/yükselimi, yüzeyde oluşan kırıklar, dolaylı olarak gelişen sismik aktiviteler konularını değerlendirmekte ve konu ile ilgili

tarihsel gelişimi dünyanın değişik bölgelerinden örneklerle aktarmaktadırlar. Diğer taraftan Gambolati ve ekibinin Venedik Lagünü bölgesinde yaptığı modelleme (sonlu elemanlar) çalışmalarının 1974'den 2015'e kadar olan gelişimi anlatılmaktadır.



Şekil 5. ABD San Joaquin vadisinde değişik yıllarda ölçülen yüzey çökmesinin geçmişte açılan su kuyusunun çelik borusu yardımı ile tespit edilmesi (Poland, 1984).

Figure 5. Surface subsidence detected by the help of a steel pipe in a previously drilled water well in San Joaquin valley in USA in different years (Poland, 1984).

İspanya

Ezquerro vd. (2014), Madrid (İspanya) akiferinde yapılan yeraltısuyu çekimi sonucu yüzeyde oluşan deformasyon araştırmalarında “Düzenli saçılımlı ölçme tekniği (PSI)” nin kullanıldığı iki set Sentetik Aralıklı Radar (SAR) verileri kullanmışlardır. Yapılan gözlemlerde elastik ve elastik olmayan deplasmanlar ayrılmış ve elastik olanların elastik olmayan deplasmanlara göre 4 kat fazla olduğu gözlenmiştir. Değerlendirmeler deplasman davranışının elastik benzeri olduğunu göstermiş ve akiferin deplasmanı geri kazandığı dönemde geçmişte yapılan yeraltısuyu çekimi sırasında oluşan yüzey çökmesinin yükselim ile geri kazanıldığı gözlenmiştir. 1992-2010 yılları arasındaki davranışı modelleme çalışmalarında PSI deplasman ölçümleri ile model sonuçlarının doğrulandığı ve modelleme çalışmaları için %13 lük bir hata tespit edildiği ve bu durumun düşük permeabiliteli ince taneli birimlerde oluşan elastik olmayan deplasmanlar nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir.

Meksika

Meksika yeraltı suyu çekimi sonucu meydana gelen yüzey çökmesi problemini ciddi boyutlarda yaşayan bir ülkedir. Şekil 3, Meksiko şehrinde bulunan tarihi Basilica de Santa Maria de Guadalupe’un yeraltı suyu çekimi ile nasıl etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca çökmenin boyutlarını göstermesi açısından Şekil 3 önemli bir delil olarak sunulabilir.

Meksiko şehrinde meydana gelen yüzey çökmesinden ilk kez Domenico ve Miffilin (1965)’de bahsedilmektedir ve etkin gerilmenin yeraltı suyu çekilmesi sonucu yükseldiği ve bu durumun yüzeyde ölçülebilir düzeyde deformasyonun (çökmenin) oluşmasına neden

olduğu anlatılmaktadır. 1990’lı yıllarda Ortega-Guerrero vd. (1993), Ortega-Guerrero vd. (1999) ve Ortiz-Zamora ve Ortega-Guerrero (2010) yaptıkları çalışmalarda, Meksiko şehrindeki yüzey çökmesini araştırmışlar, Meksiko şehrinde Chalco baseninde bulunan akifer/akitard da meydana gelen çökmeyi çalışmışlar ve bir boyutlu matematiksel model yardımı ile değişik üretim koşulları altında meydana gelebilecek çökmeyi tahmin etmişlerdir. Calderhead vd. (2012) araştırmalarında Meksika Toluca vadisinde yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesini üç boyutlu yeraltısuyu akım modeli ve tek boyutlu kompaksiyon modeli ile çalışmışlardır. Çökmeyi minimize etmek için değişik senaryolar denemişler ve beslenme, diğer havzalara su gönderme, pompa merkezlerinin yerlerini değiştirme ve yerel tüketim gibi parametrelerle uygun çözümleri araştırmışlardır. Pacheco-Martinez vd. (2013) Aguascalientes vadisinde aşırı çekim sonucu oluşan yüzey çökmesini çalışmışlar, yüzey çökmesinin Aguascalientes şehrinde kamu ve özel mülklerde ve altyapılarda ciddi hasarlara neden olduğunu vurgulamışlardır.

İran

Çok fazla örnek olmamakla birlikte; Kumarcı vd. (2008) WTAQ programını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile basınç düşümü sonunda oluşan çökmeyi zamana bağlı elastik davranış kullanarak modellemiş ve İran’da Sirjan ve Shahrekord’da uygulamışlardır. Benzer şekilde Jafari vd. (2016) geliştirdikleri MOD-FLOW programını İran’da Saveh sahasına uygulamışlar ve model çalışmaları sonunda InSAR, extensometre ve sayısal model sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduklarını ifade etmişlerdir.

Çin

Çin, yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesi probleminden yoğun bir şekilde etkilenmektedir. 1920 yılında Shangay'da gözlenen yeraltısuyu çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesi problemi ileri yıllarda diğer şehirlerde de tespit edilmiş ve bu konuda birçok araştırma yapılmıştır (Pei vd., 2000; Hua vd., 2004; Kim, 2005; Shi vd., 2007; Xu vd., 2008; Wu vd., 2009; Shen ve Xu, 2011; Xu vd., 2012; Zhang vd., 2015; Lin vd., 2015; Ye vd., 2016a; Ye vd., 2016b). Ülkenin sanayi atılımı ile hızla artış gösteren yeraltısuyu çekimi birçok bölgede yüzey çökmesi problemi oluşturmuş ve dolaylı olarak şehirlerin altyapı sistemlerinde hasarlar meydana getirmiştir (Şekil 4). Bu durum Çizelge 2' de ayrıntılı olarak verilmekte ve tehlikenin boyutları her bir şehir temelinde özetlenmektedir.

Ülkede meydana gelen yüzey çökmesi problemi konusunda yapılan bilimsel araştırmalar 1990'lı yılların sonuna doğru literatürde yer almaya başlamıştır. Bu anlamda Shearer (1998) tarafından yapılan çalışma, model çalışmaları arasında öncü olarak yer almaktadır. MODFLOW programı kullanılarak yapılan araştırmada, Tianjin bölgesinde 1950 yılından beri gözlenen yüzey çökmesi modellenmiş ve değişik üretim senaryoları kullanılarak 2020 yılı için yüzey çökmesi tahminleri yapılmıştır.

Pei vd. (2000), üç boyutlu sayısal model geliştirerek Çin'in Suzhou şehrinde meydana gelen yeraltısuyu çekimine bağlı yüzey çökmesi problemini modellemişlerdir. Yeraltısuyu akımı ve doğrusal olmayan konsolidasyon yaklaşımı öngörülerek hazırlanan model denklemleri sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Hu vd. (2004), Çin'in değişik bölgelerinde oluşan çökme olaylarını bölgesel ve tarihsel olarak anlatmaktadır. Çökme değerleri, şehirler ve bölgeler için tablolar şeklinde verilmekte

ve çökmenin yoğun olduğu bölgelerde yapılan önleme/durdurma projeleri tanıtılmaktadır.

Wu vd. (2009), Çin'in Su-Xi-Chang bölgesinde meydana gelen yüzey çökmesi problemini araştırmak için geliştirdikleri 3 boyutlu sonlu elemanlar modelini bölgeye uygulamışlar ve 1996-2004 arası dönem için elde edilen sonuçların gözlenen değerlerle iyi bir uyum sağladığını ifade edilmiştir.

2010 yılından sonra Shangay şehrindeki çökme probleminin şehir altyapısını olumsuz etkilemesi nedeniyle konunun araştırılması önem kazanmış ve yapılan çalışmalar makale olarak sunulmuştur. Shen ve Xu (2011) yaptıkları araştırmada çekilen su miktarı, su çekilen seviye ve su çekilen bölgenin yüzey çökmesine etkisini irdelemişlerdir. Ye vd. (2011), çok ölçekli sonlu elemanlar modeli ile 1986-1988 arasında gözlenen yüzey çökmesini araştırmışlardır. Xu vd. (2012), üç boyutlu su akımı ve tek boyutlu konsolidasyon sayısal modeli çalışmalarında bölgedeki çok tabakalı akifer ve akıtar sisteminde meydana gelen sızma ve yüzey çökmesi olgularını çalışmışlardır. Zhang vd. (2015), yeraltısuyu çekimi ve suyun geri basımı sonucu gelişen yüzey çökmesi ve yüzey yükselmesi mekanizmalarını arazi ve laboratuvar değerlerini kullanarak çalışmışlardır. Ye vd. (2016) geliştirdikleri modelde, birbirleri ile etkileşimli 3 boyutlu yeraltısuyu akımı ve 3 boyutlu akifer-sistem deplasmanı yaklaşımını kullanmışlar ve 1979-1995 yılları arasındaki durumu simüle etmişlerdir.

Lin vd. (2015), Pekin'in kuzey bölgesinde 2003-2010 yılları arasında meydana gelen yüzey çökmesinin nedenlerini araştırmayı, bu olayın gelişmesini tanımlamayı ve tetikleyici faktörleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla kuyu ekstensometre verileri, interferometri'den elde edilen yüzey çökmeleri, yeraltı su seviyeleri,

hidrojeolojik bilgiler ve Landsat TM görüntüleri kullanılarak yüzey çökmesinin mekan ve zaman boyutundaki yapıları araştırılmış ve yüzey çökmesinin yeraltısuyu seviye değişimleriyle, sıkıştırılabilen tabaka kalınlığı ve şehirleşme ile olan ilişkileri incelenmiştir.

Tayvan

Lin vd. (2015), hazırladıkları 3 boyutlu akım ve tek boyutlu deformasyon modelleri ile çok tabakalı sistem için sayısal modelleme çalışması yapmışlar, sonuçlarını analitik model ile karşılaştırmışlar ve modellerini Tayvan'da Yuanchang bölgesinde uygulamışlardır. Wang vd. (2015) geliştirdikleri stokastik poroelastik modelle aynı sahayı modellemişlerdir. Liu vd. (2004), Tayvan Choshui alüvyon yelpazesinde aşırı su çekimi ile oluşan deformasyonu çalışmışlar ve bölgede bulunan killerin Terzaghi konsolidasyon teorisine uygun davrandığını ve kumlu seviyelerde gözlenen kalıcı deformasyonların elasto-plastik şekilde davrandığını belirtmişlerdir.

Vietnam

Nguyen ve Helm (1998) tarafından Hanoi'de 1988'den beri gözlenen ve aşırı su çekimi sonucu su seviyelerinde 35 m düşüş meydana geldiği ve evlerde, fabrikalarda ve okullarda 10-15 cm ye yakın yüzey çökmesi olduğu belirtilmektedir.

Yunanistan

Yunanistan yeraltısuyu çekimi sonucu meydana gelen yüzey çökmesi problemi ile 1960'lı yıllardan beri uğraşmaktadır. Selanik havzasının değişik kesimlerinde yapılan yoğun çekimler bu alanlarda yüzey çökmesine neden olmuş ve birçok araştırmacı bu konuda çalışmalar

yapmıştır (Stiros, 2001; Kontogianni vd., 2007; Loupasakis ve Rozos, 2009; Sideri ve Modis, 2014).

Stiros (2001), Yunanistan'da Kalachori-Selanik bölgesinde yüzey çökmesinin oluşumunun 1960'larda başladığını ve konu ile ilgili gelişmeleri aktarmaktadır. Kontogianni vd. (2007), Orta Yunanistan'da Selanik (Thessaly) havzasında meydana gelen yüzey çökmesinin aşırı yeraltısuyu çekimi sonucu gevşek sedimanlarda meydana gelen kompaksiyon ile oluştuğunu ifade etmişlerdir. Psimoulis vd. (2007), son 50 yılda oluşan çökmenin 3.5 m dolaylarında olduğunu ve yoğun çekimlerle çökmenin arttığını vurgulamaktadır.

Loupasakis ve Rozos (2009), Yunanistan'da oluşan yüzey çökmesi problemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Yunanistan'ın önemli endüstri merkezlerinden birisi olan Selânik bölgesinde Kalachori köyü yakınlarında gözlenen yeraltısuyu çekimine bağlı yüzey çökmesi çalışılmıştır.

Paleologos ve Mertikas (2013), Yunanistan genelinde tespit edilen yüzey çökmesi problemlerini ve bu konuda yapılan çalışmaları özetlemekte ve bu konuda ülkenin değişik bölgelerindeki durumu anlatmaktadır. Sideri ve Modis (2014), Batı Selanik bölgesinde oluşan yüzey çökmesini araştırmıştır.

Türkiye

Ülkemizde yeraltısuyu havzalarından çekilen yeraltısuyu içme suyu, sulama suyu ve sanayi suyu ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Böylelikle yeraltısuyu havzalarında su seviyeleri hızlı bir şekilde düşmekte ve akiferlerdeki kuvvet dengeleri olumsuz bir şekilde değişmektedir. Diğer taraftan Büyük Menderes havzasında bulunan jeotermal sahalarından sıcak su ve buhar üretimi yapılarak

santrallerden elektrik üretimi elde edilmekte ve sıcak sular seracılıkta kullanılmaktadır. Ayrıca birçok bölgede jeotermal sahalardan üretilen sıcak sular kent ısıtmacılığında yararlanılmaktadır (İzmir Balçova sahası, Kızılcahamam sahası ve Edremit jeotermal sahası gibi). Böylece akiferler ve jeotermal sahalar yoğun üretim yapılarak işletilmektedir. Birçok bölgede yapılan yoğun yeraltısuyu çekimleri sonucunda su seviyelerinde ciddi boyutlarda düşüş olduğu belirtilmekle birlikte, bir kaç araştırma dışında henüz yüzey çökmesi konusunda yapılan gözlem veya tespit bulunmamaktadır. Elde olan mevcut bilgilerden şu iki çalışma aktarılmaktadır.

Çelik ve Afşin (1998), Niğde Sazlıca'da gölden su çekimi sonucu oluşan yüzey çökmesini araştırmışlar ve gölden yapılan su çekiminin yüzey çökmesi oluşumuna direkt etkisi olduğunu vurgulamışlardır.

Üstün vd. (2015), araştırmalarında, Konya ovasında yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmelerini GPS ve DInSAR yöntemleri ile çalışmışlar ve yüzey çökmesinin yılda 1-4 cm seviyesinde olduğunu tespit etmişlerdir.

SAYISAL MODELLEME

Gözenekli ortamda yeraltısuyu hareketi ve buna bağlı gelişen deformasyon mekanizması, akiferlerde ve rezervuarlarda ortak ve tam etkileşimli olarak süregelen hidrodinamik sistemi ifade etmektedir. Uzun yıllar boyunca doğal süreçlerle dengeye ulaşmış olan bu hidrodinamik sistem, üretim yapılarak bozulmakta ve tüm sistem gelişen değişikliklere bağlı olarak yeni denge koşullarına ulaşmaya zorlanmaktadır. Modelleme çalışmaları ile bu tür değişikliklerin bilimsel yöntemler kullanılarak açıklanması

ve bazı değişkenler ve parametreler yardımı ile ortamdaki gelişmelerin matematiksel ifadeler ile açıklanması gerekli olmaktadır. Bir bütün olarak ele alınan sistemin içindeki hareketlerin (değişikliklerin) diferansiyel denklemler kullanılarak tanımlanmasının yanında, tüm sistemin sınırlarındaki değişikliklerin de benzer şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Böylelikle sistemin doğal denge koşullarından (başlangıç koşulları) başlayarak yeni denge koşullarına ulaşacağı süreçte gelişecek olan değişikliklerin modellenmesi planlanmaktadır. Bu amaçla oluşturulan matematiksel ifadelerde, söz konusu hidrodinamik sistemin değişkenleri olarak gözenekli ortamdaki su basıncı (su yükü) ve gözenekli ortamın birim deformasyonu (deplasman) kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak sistemin fiziksel ve mekanik özelliklerini yansıtan parametreler (hidrolik iletkenlik, gözeneklilik, sıkıştırılabilirlik katsayısı, depolama katsayısı ve deformasyon parametreleri, elastik modüller) bazen sabit bazen değişkenlere bağlı olarak ifade edilerek model denklemleri içinde yer almaktadır.

Yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesinin hidromekanik özelliklerinin araştırılabilmesi için yeraltısuyu hareketi ve akifer/akitard deformasyon ilişkilerinin bilimsel olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu konuda Biot'nun geliştirdiği üç boyutlu matematiksel denklemler (Biot, 1941; 1955) yeraltısuyu akımı ile deformasyon mekanizmalarını birbirlerine bağlı olarak ifade etmektedir. Böylece ilk kez yeraltısuyu çekimi ile oluşan yüzey çökmesinin matematiksel denklemler kullanılarak ifade edilmiş olması bu konuda önemli bir gelişme olarak kaydedilmektedir. Zamana bağlı yeraltısuyu akım denklemi,

$$K \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial h}{\partial t} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + S_{sw} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

K : hidrolik iletkenlik

S_{sw} : Suyun birim depolaması

Biot'nun geliştirdiği üç boyutlu poroelastik denklemleri aşağıda verilen şekli ile gözenekli ortamda yeraltısuyu yükündeki değişim (h) ve ortamda gelişecek deplasmanlar cinsinden izotrop koşul için yazılmıştır.

Yeraltısuyu akım denklemi ve denge denklemleri dört adet denklemden oluşmaktadır ve bu denklemlerde h, yeraltısuyu yükü ve x, y, z yönündeki deplasmanlar (u_x , u_y ve u_z) bilinmeyenler olarak belirlenmiştir.

$$(\lambda+G) \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + G \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] - \rho_w g \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$(\lambda+G) \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + G \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] - \rho_w g \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$(\lambda+G) \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] + G \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] - \rho_w g \frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

Burada

λ : Lame sabiti,

G : Makaslama modülü

Bu denklemler (1 ve 2 nolu denklemler) oluşturulurken kuvvetlerin dengede olması prensibi esas alınmış ve ortamın homojen olduğu, birim deformasyon ve deplasman ilişkilerinin geçerli olduğu ve katı tanelerin sıkıştırılmaz olduğu ve elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir (Galloway ve Burbey, 2011).

Denklemler birbirleri ile tam etkileşimli olarak oluşturulmuştur ve bu denklem sisteminin uygun sınır ve başlangıç koşulları altında eş-zamanlı çözümü, adı geçen değişkenlerin zaman ve uzay boyutundaki değerlerini vermektedir. Bu tür modellerin çalışma sahasına kalibre edilerek uygulanması ve dolayısı ile sahanın

yapılan bilimsel araştırmaların temelinde çökme hareketinin izlenmesi ve deformasyon boyutlarının ölçülmesi yer almaktadır. Birçok araştırmada uzun yıllara dayanan ölçüm değerleri esas alınarak geliştirilen modellerin kalibrasyonu yapılmakta ve geleceğe yönelik tahminler yardımı ile problemin çözümüne yönelik senaryolar üretilmektedir. Bu nedenle çökme mekanizmasının dinamik boyutlarının ölçülmesi ve gelişmiş teknoloji içeren yöntemlerle izlenmesi problemin çözülmesi açısından çok önemlidir. Bu durum yoğun üretim yapılan yeraltısuyu havzalarında ve jeotermal sahalarda yüzey hareketlerinin devamlı olarak ölçülmesini ve gelecekte ciddi sorunlarla karşılaşmamak için olası yüzey deformasyonların izlenmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca deformasyon ilişkilerinin de ele alındığı sayısal modelleme çalışmaları yapılarak halen üretilmekte olan yeraltısuyu havzalarının ve jeotermal sahaların süregelen üretim senaryoları ile gelecekte yüzey çökmesi problemi ile karşılaşp karşılaşmayacakları araştırılabilir. Böylece yüzey çökmesi oluşumunu minimum düzeye indirecek en uygun üretim ve saha geliştirme koşulları elde edilmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aboustit, 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.
- Bear, J., Çorapçioğlu, M.Y., 1981a. Mathematical-model for regional land subsidence due to pumping. 1. Integrated aquifer subsidence equations based on vertical displacement only. *Water Resources Research*, 17(4), 937-946.
- Bear, J., Çorapçioğlu, M.Y., 1981b. Mathematical-model for regional land subsidence due to pumping. 2. Integrated aquifer subsidence equations for vertical and horizontal displacements. *Water Resources Research*, 17, 4, 947-958.
- Bear, J., Çorapçioğlu, M.Y., 1981c. A mathematical-model for consolidation in a thermoelastic aquifer due to hot water injection or pumping. *Water Resources Research*, 17, 3, 723-736.
- Biot, M.A., 1941. General theory of 3 D consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.
- Biot, M.A., 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 26, 2, 182-185.
- Burbey, T.J., Helm, D.C., 1999. Modeling three-dimensional deformation in response to pumping of unconsolidated aquifers. *Environmental & Engineering Geoscience*, 5, 2, 199-212.
- Calderhead, A.I., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2012. Sustainable management for minimizing land subsidence of an over-pumped volcanic aquifer system: tools for policy design. *Water Resources Management*, 26, 7, 1847-1864.
- Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Putti, M., Teatini, P., 2008. Can Venice be raised by pumping water underground? A pilot project to help decide. *Water Resources Research*, 44 (1), WO 1408.
- Chang, C.D., Mallman, E., Zoback, M. 2014. Time-dependent subsidence associated with drainage-induced compaction in Gulf of Mexico shales bounding a severely depleted gas reservoir. *AAPG Bulletin*, 98, 6, 1145-1159.
- Cheo, K. Lee, Sophie N. Fallou, Chiang C. Mei, 1992. Subsidence due to pumping from a soil stratum with a soft aquitard. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 339, 1653, 193-230.
- Çelik, M., Afşin, M., 1998. The role of hydrogeology in solution-subsidence development and its environmental impacts; a case-study for Sazlıca (Niğde, Turkey). *Environmental Geology*, 36 (3-4), 335-342.

- Çorapçioğlu, M. Y., 1984. Land subsidence-a state-of-the-art review. In: Bear J., Corapcioglu M.Y. (eds.) *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences), Vol 82. Springer, Dordrecht.
- Çorapcioglu, M.Y., Brutsaert, W., 1977. Viscoelastic aquifer model applied to subsidence due to pumping. *Water Resources Research*, 13(3), 597-604.
- Domenico, P.A., Mifflin, M.D., 1965. Water from low permeability sediments and land subsidence. *Water Resources Research*, 1(4), 563-576.
- Ezquerro, P., Herrera, G., Marchamalo, M., Tomas, R., Bejar-Pizarro, M., Martinez, R., 2014. A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrology*, 519, 1192-1204.
- Faunt, C.C., Sneed, M., Traum, J., Brandt, J.T., 2016. Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 675-684.
- Fuller, M.L., 1908. Summary of the controlling factors of artesian flows. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 319, 44 pp.
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.
- Galloway, D.L., Sneed, M., 2013. Analysis and simulation of subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. *Boletin De La Sociedad Geologica Mexicana*, 65, 123-136.
- Gambolati, G., Ferronato, M., Teatini, P., Deidda, R., Lecca, G., 2001. Finite element analysis of land subsidence above depleted reservoirs with pore pressure gradient and total stress formulations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(4), 307-327.
- Gambolati, G., Freeze, R.A., 1973. Mathematical simulation of the subsidence of Venice-1, Theory. *Water Resources Research*, 9(3), 721-733.
- Gambolati, G., Gatto, P., Freeze, R.A., 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice-2, *Water Resources Research*, 10(3), 563-577.
- Gambolati, G., Ricceri, G., Bertoni, W., Brighenti, G., Vuillermin, E., 1991. Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna. *Water Resources Research*, 27(11), 2899-2918.
- Gambolati, G., Teatini, P., 2015. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research*, 51(6), 3922-3955.
- Gambolati, G., Teatini, P., Bau, D., Ferronato, M., 2000. Importance of poroelastic coupling in dynamically active aquifers of the Po river basin, Italy. *Water Resources Research*, 36(9), 2443-2459.
- Hu, R.L., Yueb, Z.Q., Wang, L.C., Wang, S.J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76, 65-77.
- Ingerson, I. M., 1941. The hydrology of the of the Southern San Joaquin Valley, California, and its relation to important water supplies. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 22 (1), 20-45.
- Jacob, C.E., 1940. The flow of water in an elastic artesian aquifer. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 21, 574-586.
- Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Karimi, N., Mohammadi, K., 2016. Numerical simulation of groundwaterflow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), Article Number: UNSP 833.
- Kang, D.H., Li, J., 2015. 3-D land subsidence simulation using the NDIS package for MODFLOW. *Proc. IAHS*, 372, 437-442.
- Karahanoğlu, N., Doyuran, V., Akkaş, N., 1984. Finite element simulation of hot-water type geothermal reservoirs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23, 357-382.

- Kıhm, J. H., Kim, J. M., Song, S.H., Lee, G. S., 2007. Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), 1-14.
- Kim, J.M., 2004. Fully coupled poroelastic governing equations for groundwater flow and solid skeleton deformation in variably saturated true anisotropic porous geologic media. *Geosciences Journal*, 8(3), 291-300.
- Kim, J.M., 2005. Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation in unsaturated true anisotropic aquifers due to groundwater pumping. *Water Resources Research*, 41, 1, Article Number: W01003.
- Kim, J.M., Parizek, R.R., 1999. Three-dimensional finite element modelling for consolidation due to groundwater withdrawal in a desaturating anisotropic aquifer system. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23, 6, 549-571.
- Kontogianni, V., Pytharouli, S., Stiros, S., 2007. Ground subsidence, Quaternary faults and vulnerability of utilities and transportation networks in Thessaly, Greece. *Environmental Geology*, 52(6), 1085-1095.
- Kumarcı K., Ziaie, A., Kyioumarsı, A., 2008. Land subsidence modeling due to ground water drainage using "WTAQ" software. *Proceedings of 10th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation*, Istanbul, Turkey, May 27-30, 2008, Ed: Demiralp, M., Mikhael, W.B., Caballero, A.A., Abatzoglou, N., Tabrizi, M.N., Leandre, R., GarciaPlanas, M., Cjoras, R.S., 394-399.
- Lei, H., Xu, T., Jin, G., 2015. TOUGH2 Biot-A simulator for coupled thermal-hydrodynamic-mechanical processes in subsurface flow systems: Application to CO₂ geological storage and geothermal development. *Computers & Geosciences*, 77, 8-19.
- Lewis, R.W., Roberts, P.J., Schrefler, B.A., 1989. Finite element modelling of two phase heat and fluid flow through deforming porous media. *Transport in Porous Media*, 4, 319-334.
- Lewis, R.W., Karahanoğlu, N., 1981. Simulation of subsidence in geothermal reservoirs. *Numerical Methods in Thermal Problems*, 2, 326-335.
- Lewis, R.W., Schrefler, B.A., 1978. A fully coupled consolidation model of the city of Venice. *Water Resources Research*, 14(2), 223-230.
- Li, J., 2002. Modeling and sensitivity analysis of aquifer parameters for subsidence due to pumping-injecting water. *Proc 9th International Conference on Hydraulic Information Management MONTREAL, CANADA Hydraulic Information Management*, Edited By Blain, W.R., Brebbia, C.A., 119-129.
- Li, J., 2003. A nonlinear elastic solution for 1-D subsidence due to aquifer storage and recovery applications. *Hydrogeology Journal*, 11(6), 646-658.
- Li, J., Helm, D.C., 1997. Numerical formulation of dynamic behavior within saturated soil characterized by elasto-viscous behavior with an application to Las Vegas Valley. *Computer Methods And Advances in Geomechanics*, 2, 911-916.
- Li, P., Wang, K., Li, X.G., Lu, D.T., 2014. Analytical solutions of a finite two-dimensional fluid-saturated poroelastic medium with compressible constituents. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 38(11), 1183-1196.
- Lin, P.L., Hsu, K.C., Lin, C.W., Hwung, H.H., 2015. Modeling compaction of multi-layer-aquifer system due to groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 187, 143-155.
- Lin Z., Huili G., Xiaojuan L., Rong W., Beibei C., Zhenxue D., Teatini, P., 2015. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243-255.
- Liu, C.H., Pan, Y.W., Liao, J.J., Huang, C.T., Ouyang, S., 2004. Characterization of land subsidence in the Choshui River alluvial fan, Taiwan. *Environmental Geology*, 45(8), 1154-1166.

- Loupasakis, C., Rozos, D., 2009. Finite-element simulation of land subsidence induced by water pumping in Kalochori village, Greece. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, 369-382.
- Meinzer, O.E., 1928. Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, 23, 263-291.
- Mitchell, J.K., 1962. Components of pore water pressure and their engineering significance. *Clays and Minerals*, Pergamon, N.Y., 162-184.
- Nguyen, T.Q., Helm, D.C., 1998. Land subsidence due to ground-water withdrawal in Hanoi, Vietnam. *Land Subsidence Case Studies and Current Research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence*, Association of Engineering Geologists, Special Publications, 8, 113-117.
- Ortega-Guerrero, A., Cherry, J.A., Rudolph, D.L., 1993. Large-scale aquitard consolidation near Mexico-City, *Ground Water*, 31(5), 708-718.
- Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D.L., Cherry, J.A., 1999. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35(11), 3327-3341.
- Ortiz-Zamora, D., Ortega-Guerrero, A., 2010. Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46, Article Number: W01513.
- Pacheco-Martinez, J., Hernandez-Marin, M., Burbey, T.J., Gonzalez-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J.A., Zermeno-De-Leon, M.E., Solis-Pinto, A., 2013. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Engineering Geology*, 164, 172-186.
- Paleologos, E.K., Mertikas, S.P., 2013. Evidence and implications of extensive groundwater overdraft-induced land subsidence in Greece. *European Water*, 43, 3-11.
- Pei, S.P., Chen, C.G., Jiao, J.J., 2000. Geological hazards related to groundwater exploitation - Land subsidence in Suzhou City, China. *Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment*, 546-552.
- Poland, J.F., 1958. Land subsidence due to groundwater development. *Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineering*. 84(IR3), 11pp.
- Poland J.F., 1960. Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, and its effect on estimates of ground water resources. *Comm. Sub Terranean Waters Publ.* 52, 324-335.
- Poland J.F., 1961. The coefficient of storage in a region of major subsidence caused by compaction of an aquifer system. *US Geological Survey Professional paper* 424-B, B52-B54.
- Poland, J.F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. *USGS Report, Studies and Reports in hydrology* 40, UNESCO, Paris, 305 p.
- Poland J.F., Davis, G.H., 1956. Subsidence of the land surface in Tulare-Wasco (Delano) and Los Banos-Kettleman City areas, San Joaquin Valley, California. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 37(3), 287-296.
- Poland, J.F., Garret, A.A., Sinnott, A., 1959. Geology, hydrology and chemical character of ground waters in the Torrance-Santa Monica area, California. *US Geological Survey, Water Supply Paper*, 1461, 142-146.
- Poland J.F., Davis G.H., 1969. Land subsidence due to withdrawal of fluids, *Reviews in Engineering Geology*, Vol 2, edited by D.J. Varnes ve G. Kirsch, Geological Society America, Boulder Col. 187-269.
- Pratt, W. E., 1927. Some questions on the cause of the subsidence of the surface in the Goose Creek field, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 11(8), 887-889.
- Psimoulis, P., Ghilardi, M., Fouache, S., Stiros, S., 2007. Subsidence and evolution of the Thessaloniki plain, Greece, based on historical leveling and GPS data. *Engineering Geology*, 90, 1-2, 55-70.

- Riley, F.S., 1998. Mechanics of aquifer systems - The scientific legacy of Joseph F. Poland, Land Subsidence Case Studies and Current Research: Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium On Land Subsidence. Edited by Borchers, J.W., Association of Engineering Geologists, Special Publication, 8, 13-27.
- Schmid, W., Hanson, R.T., Leake, S.A., Hughes, J.D., Niswonger, R.G., 2014. Feedback of land subsidence on the movement and conjunctive use of water resources. *Environmental Modelling & Software*, 62, 253-270.
- Settari, A., Walters, D.A., Stright, D.H. Jr., Aziz, K., 2008. Numerical techniques used for predicting subsidence due to gas extraction in the North Adriatic Sea. *Petroleum Science and Technology*, 26, 10-11, 1205-1223.
- Shearer, T.R., 1998. A numerical model to calculate land subsidence, applied at Hangu in China. *Engineering Geology*, 49(2), 85-93.
- Shen, S.L., Xu, Y.S., 2011. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1378-1392.
- Shen, S.L., Xu, Y.S., Hong, Z.S., 2006. Estimation of land subsidence based on groundwater flow model. *Marine Georesources & Geotechnology*, 24(2), 149-167.
- Shi, X.Q., Xue, Y.Q., Ye, S.J., Wu, J.C., Zhang, Y., Yu, J., 2007. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environmental Geology*, 52(1), 27-40.
- Sideri, D., Modis, K., 2014. Spatiotemporal estimation of land subsidence and ground water level decline in West Thessaly basin, Greece. *Natural Hazards*, 76(2), 939-954.
- Stiros, S.C., 2001. Subsidence of the Thessaloniki (northern Greece) coastal plain, 1960-1999. *Engineering Geology*, 61(4), 243-256.
- Taylor, D.W., 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley NY, 700 p.
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W., Gonella, M., 2005. A century of land subsidence in Ravenna, Italy, *Environmental Geology*, 47(6), 831-846.
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Gonella, M., 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, 42(1), Article Number: W01406.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1948. *Soil mechanics in Engineering Practice*. John Wiley NY, 566 p.
- Tsai, T.L., 2015. A coupled one-dimensional viscoelastic-plastic model for aquitard consolidation caused by hydraulic head variations in aquifers. *Hydrological Processes*, 29, 4779-4793.
- Üstün, A., Tuşat, E., Yalvaç, S., Özkan, I., Eren, Y., Özdemir, A., Bildirici, I.O., Üstüntaş, T., Kırtıloğlu, O.S., Mesutoğlu, M., Doğanalp, S., Canaslan, F., Abbak, R.A., Avşar, N.B., Şimşek, F.F., 2015. Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR. *Environmental Earth Sciences*, 73, 10, 6691-6703.
- Wang, J., Wu, Y., Liu, X., Yang, T., Wang, H., Zhu, Y., 2016. Areal subsidence under pumping well-curtain interaction in subway foundation pit dewatering: conceptual model and numerical simulations. *Environmental Earth Sciences*, 75, 198.
- Wang, S.J., Lee, C.H., Hsu, K.C., 2015. A technique for quantifying groundwater pumping and land subsidence using a nonlinear stochastic poroelastic model. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8111-8124.
- Wu, J.C., Shi, X.Q., Ye, S.J., Xue, Y.Q., Zhang, Y., Yu, J., 2009. Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation in Su-Xi-Chang area, China. *Environmental Geology*, 57, 1409-1421.
- Xu, Y.S., Shen, S.L., Cai, Z.Y., Zhou, G.Y., 2008. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China. *Natural Hazards*, 45, 123-135.

- Xu, Y.S., Ma, L., Shen, S. L., Sun, W.J., 2012. Evaluation of land subsidence by considering underground structures that penetrate the aquifers of Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*, 20(8), 1623-1634.
- Yang, Y., Song, X.F., Zheng, F.D., Liu, L.C., Qiao, X.J., 2015. Simulation of fully coupled finite element analysis of nonlinear hydraulic properties in land subsidence due to groundwater pumping. *Environmental Earth Sciences*, 73, 4191-4199.
- Ye, S.L., Luo, Y., Wu, J.C., Yan, X.X., Wang, H.M., Jiao, X., Teatini, P., 2016a. Three dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai China. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 695-709.
- Ye, S., Xue, Y., Wu, J., Yan, X., Yu, J., 2016b. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 685-693.
- Ye, S., Xue, Y., Wu, J., Zhang, Y., Wei, Z., Li, Q., 2011. Regional land subsidence model embodying complex deformation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 164(10), 519-531.
- Yeh, H.D., Lu, R.H., G.T. Yeh, 1996. Finite Element modeling for land displacement due to pumping. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 20, 79-99.
- Yokoo, Y., Yamagata, K., Nagaoka, H., 1971a. Finite element method applied to Biot's consolidation theory. *Soils and Foundations*, 11(1), 29-46.
- Yokoo, Y., Yamagata, K., Nagaoka, H., 1971b. Finite element analysis of consolidation following undrained deformation. *Soils and Foundations*, 11(4), 37-58.
- Zang, Y., Wu, J.C., Xue, Y.Q., Wang, Z.C., 2017. Fully coupled three-dimensional nonlinear numerical simulation of pumping-induced land movement. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 552.
- Zhang, Y., Wu, J., Xue, Y.Q., Wang, Z.C., Yao, Y.G., Yan, X.X., Wang, H.M., 2015. Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*, 23(8), 1851-1866.
- Zienkiewicz, O.C., 1977. *The finite element method*. McGraw Hill, Berkshire, 787.



Derleme / Review Paper

Nefelinli Siyenit: Bir Gözden Geçirme

Nepheline Syenite: A Review

Serhan HANER¹ , Murat DEMİR² 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, ISPARTA

²B&S Yatırım A.Ş., Kırşehir Nefelin İşletmeleri, KIRŞEHİR

Geliş (Received): 06 Aralık (December) 2017, Düzeltme (Revised): 15 Şubat (February) 2018, Kabul (Accepted): 27 Mart (March) 2018

ÖZ

Nefelinli siyenit, nefelin, sodyum ve alkali feldispatlardan oluşmuş silisçe fakir siyenitik bir kayadır. Yerkürede geniş bir yayılıma sahip olmasına rağmen ekonomik değere sahip yatak oluşumları sınırlıdır. Ticari anlamda nefelinli siyenitin en az %20 nefelin ve %60 feldispat içermesi gerekmektedir. Bu tip ekonomik sayılabilecek yataklar Rusya, Kanada, Norveç, Brezilya, Çin ve Türkiye’de bulunmaktadır. Nefelinli siyenitin ana kullanım alanlarını cam ve seramik sanayileri oluşturmaktadır. Sağlık gereçleri, porselen, karo, cam, fiberglas gibi ürünlerde ergitici olarak rol oynayan bir alümina (Al_2O_3) kaynağıdır. Seramik ve cam ürünlere kattığı çok sayıda avantaj sayesinde Asya, Avrupa ve Amerika kıtalarında tüketimi yüksek seviyelerde olmaktadır. Bu derleme çalışmasında nefelinli siyenitin özellikleri, oluşumu, üretimi ve tüketimi, kullanım alanları, teknolojisi hakkında bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Feldispat, Magmatik kayaç, Nefelin, Nefelinli siyenit.

ABSTRACT

Nepheline syenite is a siliciously poor syenitic rock composed of nepheline, sodium and alkaline feldspars. Although it is wide spread on the earth, the nepheline deposits that have economic value are limited. Commercially speaking, nepheline syenite contains at least 20% nepheline and 60% feldspar. Such economic deposits are in Russia, Canada, Norway, Brazil, China and Turkey. Main uses of nepheline syenite are glass and ceramic industries. It is a source of alumina (Al_2O_3) and plays a role of melting products such as sanitary ware, porcelain, tile, glass and fiberglass. Because of the numerous advantages on ceramic and glass products, its consumption is high in Asia, Europe and America. In this review, characteristics of nepheline syenite, its formation, production and consumption, usage areas and technology are given.

Keywords: Feldspar, Igneous rock, Nepheline, Nepheline syenite.

GİRİŞ

Nefelinli siyenit, büyük ölçüde nefelin, sodyum feldispat (albit) ve alkali feldispattan (ortoklas, mikroklin) oluşmuş açık renkli, iri kristalli, silisçe fakir, feldispatik, plütonik magmatik bir kayadır. Nefelinli siyenit, temelde siyenittir. Sodalit, öjit, ejirin, biyotit, hornblend, sfen, zirkon, demir oksit (manyetit), apatit, granat, muskovit, korundum ve diğer alkaliler ya da nadir toprak elementlerince zengin iz mineraller içerir. Alterasyon sonucunda sodalit, kankrinit, zeolit türleri ve özellikle de analsime dönüşür. Dünyada geniş yayımlıdır. Ancak ticari olarak Rusya, Kanada, Norveç, Brezilya, Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Türkiye’de işletilmektedir.

Nefelinli siyenit, cam, seramik ve boya imalatında başlangıç malzemesi olarak kullanılmaktadır. Serbest silis içermemesi, yüksek alkali ve alümina içeriği, yüksek ergitme gücü ve dar erime aralığı, cam endüstrisine ideal uyum gösteren özellikleridir. Ayrıca, yüksek direnç ve hava koşullarına karşı sağladığı dayanım özellikleri sayesinde çatı parçacıkları, yol malzemeleri, taş kaplamalarının yanı sıra beton agregası ve asfalt üretiminde de kullanımına olanak sağlamaktadır. Nefelinli siyenit, pigment ve dolgu maddesi temel reçetesinde arzu edilen yüksek parlaklık, inertlik ve düşük ıslatma ve yayılım sağlamaktadır. Morötesi azaltma karakteristikleri açık hava şartlarına karşı direnç gösterdiğinden, asfalt çatıların bozulmasını önleyen ve güneş ışınlarını bloke eden çatı parçacıkları olarak kullanılmasına neden olmuştur. İnce tane boyutunda olanı, tuğla ve sıkıştırma dolgusu imalatında eritken ve renk verici olarak kullanılmaktadır. Boyutlandırılmış ve kırılmış kayalar yerel ihtiyaçlar için de kullanılmaktadır. Kuvars ya da serbest silis içermemesi ve göreceli sertliği nedeniyle silis

içermeyen aşındırıcı olarak kullanımına imkan vermektedir. Diğer potansiyel kullanım alanları ise suni gübre, refrakter, çimento harcı ve kağıttır (McLemore vd., 2006).

Nefelinli siyenit, Türkiye açısından da potansiyel feldispat kaynağı olarak gelecekte birçok kullanım alanı bulacaktır. Kırşehir Masifindeki sodalitli siyenit ve miyaskit türü kayalar, zenginleştirme çalışmaları sonucunda Norveç nefelinli siyenitine eşdeğer alkali zenginleşmesi ve demir oksit/karbonat safsızlıkları alt limit değerlerinde oldukça iyi verimle kazanılmıştır (McLemore vd., 2006; MTA, 2016).

Bu çalışmada, nefelinli siyenitin oluşumu, özellikleri ve bazı ekonomik faktörleri hakkında bilgiler verilmiştir.

JEOLOJİ

Nefelinli Siyenitin Mineralojisi, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Kayacın endüstriyel özelliklerini temin eden nefelin minerali, $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ kimyasal bileşimine sahip, $\text{Na/K}=3/1$ olan, hegzagonal sistemde kristallenen, Mohs sertliği 5-6 ve özgül ağırlığı $2.5-2.7 \text{ g/cm}^3$ olan bir mineraldir. Kimyasal adı sodyum ve potasyum alüminosilikattir. Siyenitin içindeki az miktardaki kuvarsın ve/veya bir miktar feldispatın yerini nefelin alırsa ortaya nefelinli siyenit çıkmış olur. Tipik bir nefelinli siyenitte, yaklaşık olarak %25 nefelin, %20 mikroklin ve %55 albit vardır (Ciullo, 1996).

Siyenit, alkalilerce zengin (% 65-90) magmanın derin ortamlarda yavaş soğuması nedeniyle, iri kristalli derinlik kayacıdır. Kristaller, çoğunlukla alkali feldispattan ve az miktarda ortoklaz, albit, pertit ve mikroklinlerden

oluşmaktadır. Siyenitin düşük oranlardaki diğer bileşenleri kuvars, ferromanganezler (biyotit, hornblend, piroksen) ile apatit, zirkon, titan, manyetit, melanit ve pirit gibi aksesuar minerallerdir. Nefelin ise siyeniti büyük yüzde ile oluşturan sodyumlu alüminyum silikat olup, feldispatoid grubu bir mineraldir. Nefelinli siyenitin bazı türleri: kongressit, kregmantit, ditroit, fenit, foyait, iyolit, laurdalit, litfieldit, melteigitt, miyaskit, monmoutit, raglanit, rouillit ve urtit'tir (Tait vd., 2003; O'Connor, 2011).

Nefelin, nefelinli siyenitin, nefelin monzonitin ve nefelinitin büyük oranda bileşenidir. Bu kayaların birbirilerine göre farkı, içerdikleri feldispat türü ve miktarlarıdır. Nefelinli siyenitte feldispat en önemli bileşendir. Nefelin monzonitte K-feldispat ve plajiolas eşit oranlarda bulunur. Nefelinitte ise daha az feldispat ve büyük oranda nefelin vardır (McLemore vd., 2006).

Nefelinin, nefelinli siyenit ile karıştırılmaması gerekir. Dolayısıyla kimyasal ve fiziksel özellikleri tamamen farklıdır. Saf nefelinin erime noktası oldukça yüksek ve 1520°C; Na-feldispatın 1118°C; K-feldispatın 1150°C ve nefelinli siyenitin 1223°C'dir. Diğer feldispatlarla karşılaştırıldığında, Na ve K oranı oldukça yüksektir. Na₂O+K₂O oranı yaklaşık olarak %9-15 arasındadır. Nefelinli siyenit, ürünlerin kompozisyonuna alümina (>%23) ve alkali kaynağı olarak katılmaktadır. Düşük silisten (<%60) dolayı serbest kuvars yoktur. Dolayısıyla düşük viskozite ve kolay çalışılabilirliğe olanak sağlamaktadır. Nefelinli siyenit yüksek alümina/alkali oranına sahiptir (sodyum feldispatta %30 ve potasyum feldispatta %32'ye nazaran %37). Bu ise aynı erime davranışı elde etmek için daha az malzeme kullanımı anlamına gelmektedir. Alüminanın yüksek olması çizilme dayanımını ve mukavemetini arttırmaktadır. Aynı zamanda

ısı dayanım ve kimyasal dayanımını beraberinde getirmektedir. Nefelinli siyenit, feldispat gibi cam ya da seramik karışımların ergime sıcaklığını azaltılmasında ergitici olarak davranmaktadır.

Nefelinli siyenit içindeki alkali feldispatta önemsiz bir miktar demir gözlenir. Tipik olarak %<0.2 Fe içermektedirler. İçerdiği minerallere göre renksiz, beyaz, gri, krem, yeşil ve kahverengi renklerinde olabilir. Düşük demir içeriği, saydam cam ve fiberglas, pigment ve dolgu gibi diğer nihai kullanımlar için kullanılan toz malzemelerde gerekli beyazlığı sağlamaktadır (McLemore vd., 2006).

Nefelinli siyenit, reaksiyona girmeyen, kimyasal olarak inert ve yanıcı olmayan bir kayadır. Tozuna yüksek derecede maruz kaldığında nefes darlığı, akciğer fonksiyonunda azalma belirtileri ile akciğer rahatsızlığı ve silikozise sebep olabilmektedir (MSDS, 2015). 1997'de Grup 2A olası kanserojen madde olarak, 1999'da ise Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmıştır. Kristalin silis, feldispat üreticileri için ciddi bir hastalık nedeni olmaktadır.

Nefelinli siyenit işletmelerinde atık miktarı az olmaktadır ve bu atıklar toksik değildir. Bölgesel olarak toz sorunu oluşmaktadır ve kolaylıkla kontrol altına alınabilmektedir.

Oluşumu

Siyenitler, baskın felsik mineral olarak alkali feldispat içeren magmatik sokulum kayaları olarak tanımlanmıştır. Nefelinli siyenitler, silikaya doymamış magmadan oluşmuş siyenitlerdir. Diğer bir deyişle, magmatik kökenli alkalın volkanik kayalardır. Nefelinli siyenitler magmatik ayrışmanın çok ilerlemiş döneminde kristalleşirler. Volkanik eşdeğeri fonolittir. Kanada yataklarının bazıları çeşitli bölgesel

tektonik olaylar esnasında metamorfizma geçirmiştir. Diğer taraftan, daha eski bir yatak olan Finlandiya'daki Livaara yatağı için metasomatik köken önerilmiştir (Tuzcu, 1992; McLemore vd., 2006; O'Connor, 2011).

Nefelinli siyenit tipik olarak sınırları belli rift ilişkili kıtasal kaynak alanlarda nispeten sığ kompleksler bileşeni olarak oluşur. Bazı okyanus sorguç kökenli nefelinli siyenitler Atlantik, Hindistan ve Pasifik okyanusunda bulunmaktadır. Çoğu feldispatımsı kayalar gibi nefelinli siyenitler de, doymamış plütonik ve volkanik kayalar ile ilişkilidir (Woolley, 1987; Guillet, 1994; Platt, 1996).

Karbonatitler, kimberlitler ve alkali gabrolar ile ilişkili ayrılmış alkali halka komplekslerinde bulunurlar. Bazı bölgelerde agpaitik katmanlanmış (peralkalin) siyenit intrüzyonları yaygındır. Nefelinli siyenit, siyenitler ya da granitlerle ilişkili istifin sınırlarında şekillenebilir. Kanada'da genellikle nefelin pegmatitlerle ilişkili nefelinli siyenit gnayları yaygındır. Nefelinli siyenit içeren alkali kompleksler genel olarak küçük ve düzensizdir (McLemore vd., 2006).

DÜNYA NEFELİNLİ SİYENİT REZERVLERİ VE FAALİYETLERİ

Tipik olarak alkali ya da karbonatit kompleksler ile ilişkili nefelinli siyenitler dünya genelinde ekonomik ve akademik alanlarda büyük ilgi görmektedir. Apatit (fosfat minerali), nadir toprak elementleri (NTE), niyobyum-tantal, uranyum-toryum, korundum ve diğer ekonomik tipteki yataklar ile bulunabilirler. Cam ve seramikte kullanılabilecek ekonomik nefelinli siyenit yataklarına ender rastlanır. Çünkü genellikle düşük miktarda demir içeriğine sahip değildirler. Tipik olarak nefelinli siyenit yatakları, farklı hammaddelere ait ekonomik yatakların civarında bulunmazlar. Günümüzde, potansiyel olarak cam ve seramikte kullanım için uygun olan bazı nefelinli siyenit yatakları ekonomik olarak görülmemektedir. Çünkü bu yataklar, potansiyel pazarlardan çok uzaktır ya da mevcut ulaşım olanakları yetersizdir. En büyük rezervler ve küresel nefelinli siyenit üreticileri Rusya, Kanada, Amerika Birleşik Devletleri, Norveç, Brezilya, Çin ve Türkiye'de bulunmaktadır (Şekil 1, Çizelge 1). 2013 yılında dünya genelinde, 59.3 milyon dolar tutarında (491.000 ton) nefelinli siyenit ithalatı yapılmıştır (McLemore vd., 2006; Tanner, 2015).



Şekil 1. Başlıca nefelinli siyenit üretilen yatakların konumu.

Figure 1. Location of major nepheline syenite deposits.

Çizelge 1. Başlıca nefelinli siyenit madenleri ve yatakları (McLemore vd., 2006; Brown vd., 2017).

Table 1. Major nepheline syenite mines and deposits (McLemore et al., 2006; Brown et al., 2017).

Yatak, Yer	Şirket	Madencilik Metodu	Başlama Tarihi	Üretim, ton/ yıl
Khibiny Mountain, Kola Peninsula, Rusya	Apatit Production Association	3 açık ocak, 2 yeraltı ocağı	1929	4.111.000
Nephton ve Blue Mountain, Havelock, Ontario, Kanada	Unimin Canada Ltd.	Açık ocak	1935 ve 1955	621.000
Pulaski County ve Saline County, Arkansas, ABD	3M Company ve Granite Mountain Quarries, Inc.	Açık ocak	1947	md
North Cape, Stjernoya, Norveç	North Cape Minerals AS (Unimin mülkiyetinde)	Yeraltı ocağı	1961	324.000
Canaan, Rio de Janeiro, Brezilya	Unimin Corporation	md	1980	134.000
Sichuan, Shuiye, Anyang, Henan Province, Çin	Fineton Industrial Minerals Ltd.	Gelişim halinde	1994	50.000
Buzlukdağ, Tatarilyasyayla, Kırşehir, Türkiye	B&S Yatırım A.Ş.	Açık ocak	2008	50.000

* md = mevcut değil

Rusya

Rusya'daki Apatit Production Association, Khibiny Complex'te bulunan dünyanın en büyük fosfat yatağı ve en büyük apaitik nefelinli siyinit kompleksini işletmektedir (Brown vd., 2017). 1924 yılında Khibiny Complex'te türüne az rastlanan apatit-nefelin yatakları keşfedilmiştir. Bu yatak 1929 yılından beri işletilmektedir (McLemore vd., 2006). 1929-2013 yılları arasında Apatit Madencilik tarafından yaklaşık olarak 67 milyon ton nefelin konsantresi üretilmiştir (Tanner, 2015). Rusya'da sadece 2015 yılında, 4.111.000 ton nefelinli siyinitin üretimi yapılmıştır.

Apatit-nefelin yatakları ijolit-urtit ile ilişkilidir. Apaitik nefelinli siyinit içerisinde yaklaşık olarak 100 metre kalınlığında ve 11000 m uzunluğunda yay şeklindedir. Bu yatak %10-80 nefelin, %15-75 apatit, %1-25 ejirin ve %5-12 sfen, titano-manyetit ve feldispattan oluşmaktadır.

The Apatit Production Association, 11 adet apatit-nefelin maden yatağı keşfetmiştir. Bu maden yataklarının toplam rezervi 3.6 milyar tondan daha fazladır. Bu yataklar Yukspor, Kirovsk Saami, Rudnik Rasvumchorr ve Tsentralny'de bulunan üç yeraltı ocağı ve iki açık ocak ile işletilmektedir. İlave olarak, geçmişte Koashva ve Nyorkpakh'ta açılan iki açık ocak ile sfen konsantresinden titanyum-silikon pigment üretimi için deneme çalışmaları yapılmış ve başarılı olmuştur (McLemore vd., 2006).

Nefelinli siyinit, Kola Peninsula'daki Lovozero masifinden üretilen NTE'nin bir yan ürünüdür. Bu masif, eudialyitik siyinit ve foyait, urtit, lujavrit ve ilişkili kayaçların alternatif tabakalarını içeren tabakalı bir topluluktur. Loparit, madenden çıkartılan baskın NTE mineralidir (McLemore vd., 2006).

Kanada

Kanada'da nefelinli siyinit yatakları 1890'larda keşfedilmiştir. Ancak nefelinli siyinitin üretimine 1935 yılında Nephton ve 1955 yılında Blue Mountain ile başlanmıştır (Unimin, 2014). Cam ve seramik endüstrileri için batı yarım küredeki en büyük nefelinli siyinit yatakları Ontario'da (Blue Mountain, Havelock ve Nephton) bulunmaktadır. Blue Mountain nefelinli siyinit rezervi 30 milyon tonu aşmaktadır. Mekhuen kasabasındaki Peterborough'un yaklaşık olarak 58 km kuzeydoğusundadır. Bu yataklara otoyol ve demiryolu ile ulaşım mümkündür. Kuzey Amerika'nın ilk nefelinli siyinit işletmesidir. Unimin Corporation, 1990 yılında Indusmin Division of Falconbridge Ltd.'den yatağı satın aldığındaki dünyadaki büyük nefelinli siyinit ve feldispat üreticilerinden biri haline gelmiştir.

Blue Mountain ve Nephton nefelinli siyinitleri güney Ontario'nun Grenville Province'deki nefelinli siyinit gnayslarnının 1280 km'lik kuşağının bir parçasıdır. Blue Mountain nefelinli siyinit gnayslarnı, yaklaşık olarak 2130 metre uzunluğa 1000 metre genişliğe sahip gözyaşı damlası şeklinde homojen bir küttedir. Yatağı, epidot-amfibol metasedimanter kayaçlar çevrelemektedir. Tipik olarak nefelinli siyinit, granitik doku ile iriden orta taneli beyaz kayaca katmanlanmıştır. Albit (%50-54), mikroklin (%20), nefelin (%22-30), mafik mineraller (%4) ve diğer aksesuar mineraller (ejirin-öjrit, andradit, biyotit, kalsit, kankrinit, korundum, hastingsit, hornblend, manyetit, muskovit, riebeckit ve zirkon) içermektedir. Bu yatak, homojenliği, orta-kaba tane boyutu ve düşük demir içeriğinden dolayı ekonomiktir.

Unimin maden çıkartma ve üretim prosesleri için bir dizi kuru mekanik işlemler kullanmaktadır. Bu işlemler kırma, kurutma, taşıma, eleme,

öğütme ve sınıflandırma içermektedir (Kennedy, 1990; Unimin, 2014).

Kanada'da 2013 yılında üretilen 674.000 ton nefelinli siyenitin 545.000 tonu ihraç edilmiştir (Tanner, 2015).

Amerika Birleşik Devletleri

Arkansas'tan çıkartılan nefelinli siyenit, güney ve güneydoğu ABD'deki asfalt kiremit endüstrisi için çatı parçacıkları olarak, porselen ve seramik yer karosu üretiminde ergitici olarak kullanılmaktadır (Tanner, 2016). ABD'de 2015 yılında, feldispat ve nefelinli siyenitin yurtiçi kullanımı, camda %60, seramik karo, çömlek ve diğer kullanımlarda %40 şeklinde dağılım göstermiştir. ABD'de nefelinli siyenit üretimi yapan iki şirket vardır. Üretilen nefelinli siyenitler %3 veya daha fazla demir oksit içermektedir. The 3M Co., Industrial Mineral Products Division şirketi, Arch Street madeninden kiremit endüstrisi için nefelinli siyenit sağlamaktadır. Ayrıca 1930'lardan beri kırma taş tesisi aktif olarak üretim yapmaktadır. Granite Mountain Quarries Co. ise, Granite Mountain Quarry #1 ve Granite Mountain Quarry #2 madenlerinden nefelinli siyenit çıkartmaktadır. Pulaski County'de 3 ocak ve Saline County'de 1 ocak bulunmaktadır. Bütün maden ocakları, Little Rock Arkansas'ın güney ve güneydoğusunda bulunmaktadır. Arkansas'ta 2008 yılında, agrega dışındaki uygulamalar için yaklaşık olarak toplam 520.000 ton nefelinli siyenit üretilmiştir (Tanner, 2010; Tanner, 2016; Tanner, 2017).

Norveç

Nefelinli siyenit üretimi Stjernoya Adası'nda 1961 yılından beri yapılmaktadır. 1961-1972 yılları arasında 9.3 milyon ton üretimden

17 milyon dolar gelir sağlamıştır. Norveç, 2013 yılında ise 328.000 ton nefelinli siyenit ihracatı yapmıştır. Çoğunluğu Avrupa ülkelerini içeren ihracatın dağılımı, %30 Polonya, %21 Hollanda, %17 Almanya, %11 İngiltere şeklinde olmuştur. Zayıf yapraklı biyotit-hornblend-piroksen nefelinli siyenitlerden oluşan bu yatak, mercek şeklinde ve 300 metreye 1700 metre boyutundadır. Feldispat (%56), nefelin ve az plajioklas (%34), hornblend (%0.3-2.5), biyotit (%2.5-6), ejirin (%1.3-3.8), kalsit, klinopiroksen, titanit (%iz-1.2) ve manyetit içermektedir. İlişkili kayalar, alkali piroksenit, karbonatit ve fenitler içerir. Bu nefelinli siyenit, düşük demir ve kuvars içeriğinden dolayı cam ve seramik endüstrisinde kullanılmaktadır (Sarız ve Nuhoğlu 1992; McLemore vd., 2006). Rezervi 400 milyon ton civarındadır.

Brezilya

Canaan'da, Prekambriyen kuvarso-feldispatik gnaysların ve migmatitlerin sokulum oluşturduğu ve alkali siyenitler tarafından sarılmış 20 km²'lik dairesel litfieldit sahası bulunmaktadır. Litfieldit, %55 mikroklin ve pertit, %20 nefelin, %15 albit, %10 biyotit ve az miktarda kankrinit, sodalit, korundum, zirkon, pirit, manyetit, aksesuar mineraller içermektedir. Ölçülmüş rezerv 1.6 milyon ton, belirlenmiş rezerv 5.7 milyon ton ve mümkün rezerv 25.4 milyon tondur (McVey, 1988; McLemore vd., 2006).

Çin

100 milyon tondan fazla homojen malzeme içeren Sichuan nefelinli siyeniti, Fineton Industrial Minerals Ltd. tarafından geliştirilmiştir. Ana olarak cam ve seramik derecesinde nefelinli siyenit üretimi yapılmaktadır. Anyang

nefelinli siyeniti, düşük demir ve yüksek alümina (>%21) içeriğine sahiptir. Fineton şirketi, işleme teknikleri ve ekipman için ciddi bir değerlendirme gerçekleştirmiş ve 2002'nin ortalarında deneme üretimini tamamlamıştır. Sonrasında endüstriyel boyutlarda üretime başlamıştır (O'Driscoll, 2005). 2010 yılında Anyang, Henan, Province'deki tesislerde 50.000 ton civarında nefelinli siyenit üretimi yapılmıştır (Tanner, 2012).

Türkiye

B&S Yatırım A.Ş. Nefelin İşletmeleri, Kırşehir merkeze bağlı Tatarilyasyayla köyü Buzlukdağı mevkiindedir. İşletme Kırşehir-Ankara yoluna 12 km mesafededir. Nefelinli siyenitin sahadaki görünür rezerv alanı 2250 m uzunluğa, 1850 m genişliğe ve 450 m derinliğe sahiptir. Bu yataktaki toplam rezervin 1 milyar tonun üzerinde olduğu düşünülmektedir. Karo, vitrifiye, frit, porselen, cam, izolator, çimento, izolasyon ve eletrot sanayilerine uygun özelliklerde nefelinli siyenit üretimi yapılmaktadır (BS, 2015). Buzlukdağı siyenitoyidi genel olarak foyid içeren ve tane boyutu açısından ince, orta ve iri taneli olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. İri kristalen, orta kristalen ve ince kristalen foyid siyenitler sırasıyla pembemsi, pembemsi gri ve gri renktedirler. Buzlukdağı foyid siyeniti petrografik olarak benzer mineralojik bileşime sahiptir, ancak farklı mineral oranlarında farklı renklerde kaya gruplarına ayrılmaktadır. Çoğunlukla nefelin, ortoklaz, oligoklaz, piroksen, biyotit, amfibol ile az oranda granat, kankrinit, sfen ve opak minerallerden meydana gelmektedir (Deniz, 2010).

Afyon iline bağlı Ömerli bölgesinde bulunan nefelinit-lösit, camı bir hamur içinde bulunan biyotit ve nefelin fenokristalleri içermektedir.

Değirmen bölgesinde bulunan nefelin-lösit-bazalt, porfirik dokuludur. Olivin kristalleri tamamen limonitleşmiştir. Biyotit, ojit ve nefelin içermektedir.

Amasya merkeze bağlı Göyüncek ve Merzifon'a bağlı Suluova ve Gümüşhacıköy çevresinde volkanik seriler içerisinde nefelin yataklanmaları mevcuttur.

Ankara-Kırıkkale-Yahşihan bölgesinde analsitleşmiş nefelin lösitit, porfirik dokuludur ve geniş poligonal bir bölgeye sahiptir.

Manisa merkezine bağlı Gördes-Kübaşı mevkiinde nefelinli bazalt içeriği mevcuttur. Bol miktarda plajioklas ve ojitle beraber nefelin kristalleri içerir. Yüksek derecede gözeneğe sahiptir (Sarıöz ve Nuhuğlu, 1992).

UYGULAMA ALANLARI

Nefelinli siyenitin, düşük ergime noktası ve erime kabiliyetinden dolayı 1900'lerin başlarından beri cam ve seramiklerde kullanımıyla ilgili birçok çalışma kapsamında araştırılmıştır. Ana pazarları cam, seramik, dolgu, pigment, boya, kaplama ve çatı parçacıklarıdır.

Cam

Nefelinli siyenitin düz cam, cam elyafı, buzlu cam, elektriksel cam, borosilikat camı ve cam sofrta gereçlerinde kullanılabilmesine rağmen en büyük uygulama alanı cam kaplardır. Düz cam ve tekstil cam elyafı %0-0.5, cam kaplar %8, özel camlar %11, yalıtım cam elyafı %18 nefelinli siyenit içermektedir. Nefelinli siyenit, cam üretimi için gerekli olan alümina ve alkalinin ucuz bir kaynağıdır. Dolayısıyla hammadde maliyetini azaltmaktadır (McLemore vd., 2006). Cam yapımında genellikle -500 µm tane boyutunda kaba öğütülmüş nefelinli

siyenit kullanılmakta olup, ortalama %23 Al_2O_3 , %15 Na_2O+K_2O ve %0.10 Fe_2O_3 içermektedir (McLemore vd. 2006; BS, 2015). Nefelinli siyenit cam kompozisyonuna sağladığı alümina katkısı ile son ürünün mukavemetini geliştirir ve yapıda stabilizatör olarak davranmaktadır. İçerdiği alkaliler sayesinde cam hamurunda ergitici olarak davranmaktadır. Bu da üretimde kullanılan hammaddelerin maliyeti kadar enerji maliyetinde tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca viskoziteyi düşürür ve işlenebilirliği arttırmaktadır. Nefelinli siyenitin kullanılması ile kırılmaya karşı daha fazla dirençli cam ürünler elde edilmektedir (Negm vd., 2000).

Seramikler

Feldispatik malzemeler yüzlerce yıldır seramik formülasyonunda ana ergitici olarak kullanılmaktadır. Nefelinli siyenit bu yüksek rekabet ortamında önemli bir oyuncudur. Seramik endüstrisinde ergitici olarak feldispat, nefelinli siyenit, feldispatik pegmatitler, kaolinize olmuş granit (cornish stone), aplit, üretilmiş feldispatik ergiticiler kullanılmaktadır. Bütün bu malzemeler $75 \mu m$ 'den daha ince tane boyutlarına öğütülmektedir. Feldispatik seramik ergiticilerinde kaliteyi belirleyen öncelikli ölçütler, tane boyutu ve tane boyut dağılımının yanı sıra safsızlıkların seviyesi, kalsit gibi CO_2 çıkartan maddeler, kankrinit ve sodalit çok düşük seviyelerde olmalıdır. Demir gibi maddeler bünyenin rengini bozmaktadır ve %1 ya da daha düşük miktarlarda olması gerekmektedir. Camlaşma esnasında zararlı etkilerinden dolayı korundum gibi refrakter tanelerinin varlığı minimize olmalıdır (Salem vd., 2009; Kunduracı vd., 2016).

Nefelinli siyenit, seramik sağlık gereçleri, karolar, elektrik porselenleri, sofrta takımları ve sırlarda, düşük pişirme sıcaklığı ve hızlı

pişirme programına imkan sağlamaktadır. Nefelinli siyenit yer ve duvar karosunda %10-55, beyaz seramikler ve kimyasal porselenlerde %15-30, sağlık gereçlerinde %25-35 ve elektrik porselenlerinde %30-50 miktarında kullanılmaktadır. Yer ve duvar karosunda diğer alümina kaynaklarından daha düşük su emme ve rutubet genleşmesi, daha iyi mekanik mukavemet ve düşük ısıl genleşme sağlamaktadır. Nefelinli siyenit beyazlığından dolayı seramik endüstrisi için önemli bir hammaddedir. Nefelinli siyenit ve silis ile plastik kaolen karıştırıldığında çok beyaz camsı ortalama bir sıcaklık porseleni elde etmek mümkündür (Dolan vd., 1991; McLemore vd., 2006).

Diğer Uygulamalar

Nefelinli siyenit, dolgu, dolgu pigmentleri, boya, kaplama ve çatı parçacıklarında kullanılmaktadır. Nefelinli siyenitin yüksek kuru parlaklığı ve aşınma ile kimyasal bozunmaya karşı direnç göstermesi sebebiyle plastik, kauçuk ve yapışkanlarda dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Nefelinli siyenit, UV ışınları azaltma özelliği ve kötü hava şartlarına karşı direnç göstermesi nedeni ile çatı parçacıklarında kullanılmaktadır. $2 \mu m$ tane boyutuna kadar öğütülmüş nefelinli siyenit ile pigmentler ve dolgularda reaksiyona girmeyen, kolay ıslatma, iyi dağılabilme, dengeli pH ve aşınma direnci elde edilmektedir. Kırılma indeksi önemli özelliklerindedir. Nefelinli siyenitin kırılma indeksi 1.53'tür ve yaygın olarak vinil reçinelerde kullanılmaktadır. Plastik malzemelerde mikronize nefelinli siyenitin en büyük uygulama alanı çeşitli PVC plastikler ve epoksiler ile polyesterlerdir. Başta Rusya olmak üzere birkaç ülkede nefelinli siyenitin önemli bir miktarı alümina ve alüminyum metalinin üretiminde kullanılmaktadır.

Nefelinli siyenit, iyi bir dış görünüşe sahip, parlatılabilir, nispeten kırıksız ve homojen olduğundan kesme taş olarak kullanılabilir. Birçok yerde agrega olarak kırılmış nefelinli siyenit kullanılmaktadır. Kumlama için hafif aşındırıcı olarak, kaynak elektrotlarında kaynak tozu olarak ve kaplama tozlarını bağlama ve ekstrüzyonu için de kullanılmaktadır.

Kanada'da yüksek demirli nefelinli siyenit, alümina ile silis kaynağı ve düşük maliyetli ergitici olarak mineral yün üretiminde kullanılmaktadır.

Zımpara taşının imalatında yapıştırıcı madde olarak kullanılmaktadır.

Az miktarlarda kaynak elektrodu üretiminde kullanılmaktadır (Dolan vd., 1991; Sariiz ve Nuhoglu, 1992; McLemore vd., 2006).

TEKNOLOJİ

Çoğu endüstriyel mineralde olduğu gibi bir nefelinli siyenit yatağının da «yer değeri» kritiktir. Arama jeoloğu, arazi incelemesine ilişkin çalışmalara ek olarak, üretim ve ürünlerin piyasaya taşınma maliyetlerini göz önünde bulundurmalıdır. Bilinen bir nefelinli siyenit yatağının işletilmesini etkileyen tüm faktörlerin karşılıklı etkileşimi incelenerek, gelişme garantili olup olmadığı belirlenebilir.

Arazi Teknikleri

Saha jeoloğunun, iri-orta taneli kayaçtan oluşan bir maden yatağı araması gerekmektedir. Ürünün satılabilir hale gelmesi için, 30 mesh elekten (ABD standartına göre) geçecek şekilde kırılmalı ve ortadan kaldırılması istenilen safsızlıklar uzaklaştırılmalıdır. Madenciligi etkileyebilecek dokusal, yapısal ve mineralojik

değişiklikleri ortaya çıkartmak için, maden yatağı dikkatlice haritalanmalıdır. İlk aşamada uygun yöntemle kayacı temsil edecek numuneler seçilmeli ve mikroskopik, fiziksel, kimyasal ve seramik testleri yapılmalıdır.

İnceleme esnasında, safsızlıkların, feldispat kristalleri boyunca ince bölünmüş halde dağılımlı olduğu ortaya çıkarsa, bu maden yatağı cam ve seramik kullanımı için uygun olmayacaktır. Eğer safsızlıklar kırma işlemi ile kolayca ayrılıyorsa, yatak hakkında daha ayrıntılı bir değerlendirme yapılabilir. Normal olarak, feldispatik malzemelerin açık ocak yöntemleriyle çıkarılması beklenmektedir. Belirli bir ocağın yeterli olup olmadığını belirlerken basamak yüksekliklerine, dar basamağa ve madencilik yönetmeliklerine gereken önemin verilmesi gerekir. Alıcılar, tedarik güvencesi talep ettiği için hammadde rezervlerinin uzun süre operasyonu sürdürecektir kadar geniş olması gerekmektedir. Dolayısıyla endüstriyel maden işletmelerinde, yatırılan sermayenin geri dönebilmesi için on veya daha fazla yıl gerekebilir. Genellikle, 20 yıldan daha az işletme süresi olan cevher rezervlerine sahip bir maden yatağı dikkate alınmamaktadır.

Kimyasal bozunmanın etkili olduğu alanlarda, çalışılacak temiz numuneler bulunmalıdır. Nefelin kaya yüzeylerinden nispeten daha kolay çözünür, feldispat mineralleri kaoline dönüşür, içindeki demir oksitler ve sülfürler de süzülebilir.

Halka kompleks ve karbonatit tipi sokulumlar gibi kompleks nefelinli siyenit yataklar, cam ve seramikte kullanım için çok az umut vaat etmektedir. Bunlar normal feldispat ve mafik bileşenlerde çok değişkendir ve buna ek olarak, nadir toprak elementleri, halojenürler ve diğer birçok iz elementler içerebilir. Bu durum nedeniyle kayaç için tasarlanan birçok uygulama alanında kullanımı sağlanamamaktadır.

Sondaj

Kayaçların yapısını görebilmek ve laboratuvar çalışmaları için sondaj yapılması gerekmektedir. Şartlara bağlı olarak, AX, BX ve NX karotiyerler ile karot alınır. Bir sondaj programının düzenlenmesinde, deliklerin uygun eğim açılarında tüm kaya türleri ile kesişmesine dikkat edilmelidir. Örneğin, biyotit gnays bantları düzensiz dağılımda olabilir. Sondaj yanlış yapılmış ise mevcut olan bu tür yabancı maddelerin miktarı hakkında doğru sonuçlara varılamaz.

Sondaj deliklerinin aralığı, kayanın tek düzeliği ve araştırmanın evresine göre belirlenir. İlk sondaj geniş çaptadır, ardından muhtemelen 122 m (400 ft) aralıkla grid sondaj işlemi yapılır. Daha sonra da şartlar gerektirirse 30.5 m (100 ft) veya daha az aralık bırakılarak devam edilir

Nefelinli siyenit için jeofizik ve jeokimyasal teknikler araştırmanın normal bir parçası değildir. Ancak sismik araştırmalar, örtü tabakasının derinliğinin belirlenmesine yardımcı olmak için faydalı olabilir.

Diğer Hususlar

Piyasanın büyüklüğü ve karakteri, nakliye şekli ve maliyeti, yardımcı hizmetlerin kullanılabilirliği, işgücü arzı ve kısıtlayıcı olabilecek kanunlar gibi hususlara dikkat edilmelidir. Bunlara araştırmanın erken safhasında gerekli önemin verilmesi, maden yataklarından hangisinin en büyük değere sahip olduğuna karar vermek için bir temel oluşturabilir (Kennedy, 1990).

Madencilik

Nefelinli siyenit genellikle standart açık işletme madenciliği ya da taş ocaklığı

yöntemiyle çıkartılmaktadır. Bu maden yataklarında delme ve patlatma uygulanmaktadır. Hammadde önden yükleyiciler ile kamyonetlere yüklenir. Diğer taraftan Norveç ve Rusya'daki madenlerde yeraltı madencilik yöntemleri kullanılmaktadır. Rusya'da 600-700 metre derinlikte blok göçertme yöntemi kullanılırken, Norveç'te yeraltı oda-topuk yöntemi ile madencilik yapılmaktadır (McLemore vd., 2006). Şekil 2'de Blue Mountain (Kanada) nefelinli siyenitler için uygulanan zenginleştirme yönteminin akış şeması görülmektedir.

EKONOMİK FAKTÖRLER

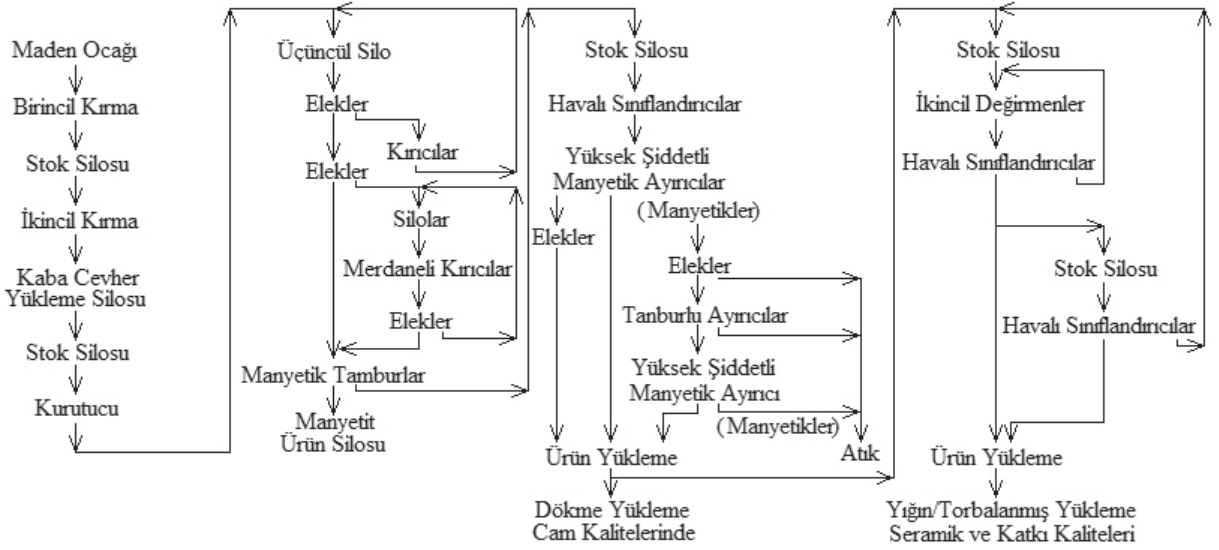
Talep ve Tüketim

Doğu Avrupa ve Çin gibi ülkelerde yaşam düzeyinin artmasına bağlı olarak sağlık gereçleri, beyaz pişen ürünler, yer ve duvar karoları, düz cam alanlarında beklendiği gibi nefelinli siyenit için talep artmaktadır. Diğer taraftan PET (polietilen tereftalat), alüminyum ve kağıt kapların kullanımının artması ve camların geri dönüşümünün artması sebebiyle cam kaplara talep azalmıştır (NSW, 2008).

Feldispat ve nefelinli siyenitin ana tüketicileri olan ülkeler, Avrupa'da İtalya, İspanya, Birleşik Krallık, Almanya ve Fransa; Asya Pasifik bölgesinde ise Çin ve Hindistan'dır.

Kanada ve Norveç'te çıkarılan nefelinli siyenitlerin yaklaşık olarak %70'i cam üretimde tüketilmektedir. Bununla beraber Norveç nefelinli siyenitinin %28'i seramiklerde ve %2'si dolgu maddelerinde kullanılmaktadır. Kanada madenlerindeki üretimin yaklaşık olarak %15'i seramikler ve dolgu maddesi uygulamaları için kullanılmaktadır (Ciullo, 1996). Rusya'daki üretimin büyük kısmı ile bölgesel bazda alüminyum üretilmektedir.

Haner, Demir



Şekil 2. Ontario Blue Mountain nefelinli siyinitinden mineral ürünler için üretim işlemi(Nephton tesisi) (Dolan vd., 1991).

Figure 2. Production process for mineral products from Blue Mountain nepheline syenite, Ontario (Nephton Plant) (Dolan et al., 1991).

Nefelinli siyinit, uluslararası tanımlamada, “Lösit; nefelin ve nefelinli siyinit (harmonized system code: 252930)” adı altında sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle sadece nefelinli siyinit için ihracat ve ithalat rakamları hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olmamaktadır. Türkiye 2016 yılı verilerine göre “Lösit; nefelin ve siyinit nefelin”in yaklaşık olarak 33.824 tonunu ihraç ve 1766 tonunu da ithal etmiştir. İhracattan 3.378.232 TL kazanılırken, ithalata 2.028.955 TL ödemiştir (TÜİK, 2016).

Fiyatlar

Türkiye’de, yer kabuğunda ve su kaynaklarında doğal olarak bulunan, ekonomik ve ticari değeri olan petrol, doğal gaz, jeotermal ve su kaynakları dışında kalan her türlü madde, 5177 sayılı kanuna göre madendir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Maden Kanununda IV-A grubunda ruhsatlandırılan

nefelinli siyinit madeni için, 2016 yılı Ocak ayı başı satış fiyatı KDV ve nakliye hariç 45 TL/ton olarak belirlenmiştir (MİGEM, 2016).

Nefelinli siyinitin, 2008 yılı Norveç cam kalitesinde (0.5 mm yığın) FOL İngiltere limanda teslim fiyatı 97 GBP/ton, seramik kalitesinde (45 mikron yığın) FOL İngiltere limanda ise 146 GBP/ton’dur (Stary vd., 2009). 2013 yılı Norveç FOB fiyatı 750 NOK/ton’dur (Smelror, 2014).

SONUÇLAR

Nefelinli siyinitin malzemeye kazandırdığı çok sayıda özellik nedeniyle, dünya genelinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük silis içeren, ucuz bir alümina ve alkali kaynağıdır. Diğer feldispat türlerine nazaran daha yüksek alümina/alkali oranına sahiptir. Alümina/alkali oranının yüksek olması ise çizilme dayanımı, mukavemet, ısıl dayanım,

kimyasal dayanımın yanı sıra düşük ergime sıcaklığı anlamına da gelmektedir.

Nefelinli siyenitin bilinen kaynakları, yakın gelecek için öngörülen dünya talebini karşılamaya yetecek seviyededir. Ancak İtalya, İspanya, Brezilya, Çin ve Meksika gibi ülkelerdeki seramik üretimi artışına paralel olarak nefelinli siyenite olan talep artabilecektir. Nefelinli siyenitin ana tüketim alanlarından diğeri cam ürünleridir. Fakat atık cam ambalajların sonsuz bir şekilde geri dönüşümü olduğu için, bu alanlarda nefelinli siyenit talebi azalacağı düşünülmektedir.

Türkiye'nin Kırşehir ilinin Buzlukdağı bölgesinde çok kaliteli nefelinli siyenit yatakları bulunmaktadır. Yıllık yaklaşık olarak 50000 ton üretimi yapılan nefelinli siyenitin, yurtiçindeki çeşitli sektörlerde tüketimi 20000 ton civarındadır. Uygulama alanı kısıtlı olması rağmen, nefelinli siyenit ile ilgili yapılan araştırma çalışmaları kapsamında tüketim miktarının artması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Brown, T.J., Idoine, N.E., Raycraft, E.R., Shaw, R.A., Deady, E.A., Hobbs, S.F., Bide, T., 2017. World mineral production 2011-15. British Geological Survey, 87 p.
- BS, 2015. B&S Yatırım A.Ş., Türkiye. <http://www.bs-nefelin.com/tr/index.php>, son erişim 12.02.2018.
- Ciullo, P.A., 1996. Industrial minerals and their uses. Noyes Publications, New Jersey, No:96-29173, 632 p.
- Deniz, K., 2010. Buzlukdağı (Kırşehir) alkali magmatik kayaçların jeolojisi, petrolojisi ve konfokal raman spektrometresi ile incelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Yüksek Lisans Tezi, 138 s.
- Dolan, M.L., Hains, D.H., Ash, D.R., 1991. High-alumina rocks in Ontario: resources and process technology. Queen's Printer, Ontario, 130 p.
- Guillet, G.R., 1994. Nepheline syenite. (editor: D.D. Carr). Industrial Minerals and Rocks (6th Edition). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 711-730.
- Kennedy, B.A., 1990. Nepheline syenite. (editor: B.A. Kennedy). Surface Mining (2nd Edition). Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 214-217.
- Kunduracı, N., Aydın, T., Akbay, A., 2016. The effect of nepheline syenite addition on the sintering behaviour of sanitaryware bodies. Journal of the Australian Ceramic Society, 52 (2), 82-86.
- McLemore, V.T., 2006. Nepheline Syenite. (editor: J.E. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker, S.T. Krukowski). Industrial Minerals & Rocks (7th Edition). Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, 653-670.
- McVey, H., 1988. A study of markets for British Columbia's nepheline syenite and feldspathic minerals. Mineral Marketing, Inc., No:0005032857, 50 p.
- MİGEM, 2016. 4-A grubu madenler ocakbaşı satış fiyatları. Maden İşleri Genel Müdürlüğü, <http://test.migem.gov.tr/duyurular/malikonular.html>, son erişim 12.02.2018.
- Smelror, M., 2014. Mineral resources in Norway 2013 production data and annual report. Geological Survey of Norway, No:2, 54 p.
- MSDS, 2015. Nepheline syenite safety data sheet. Unimin Corporation, No: 013-U-GHS <https://www.psh.ca/MSDS/Nepheline%20Syenite.pdf>, son erişim 12.02.2018.
- MTA, 2016. Feldispat (feldspat). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/feldispat>, son erişim: 12.02.2018.
- Negm, A.T., Abouzeid, A.Z., Boulos, T., Ahmed, H., 2000. Nepheline syenite processing for glass and ceramic industries. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 34, 5-16.
- NSW, 2008. Nepheline syenite. Government of New South Wales Department of Primary Industries. https://www.resourcesandenergy.nsw.gov.au/___data/assets/pdf_file/0010/238177/Nepheline.pdf, son erişim: 12.02.2018.

- O'Connor, D.E., 2011. Petrogenesis of nepheline syenites and phonolites from the lofdal intrusive complex, Kunene region, Namibia. Dalhousie University, Department of Earth Sciences, Halifax, Nova Scotia, Bachelor of Science Degree, 103 p.
- O'Driscoll, M., 2005. Fineton finds its niche: Industrial Minerals, No:456, September, 68-69.
- Platt, R.G., 1996. Nepheline-syenite complexes-an overview. (editor: R.H. Mitchell). Undersaturated Alkaline Rocks: Mineralogy, Petrogenesis, and Economic Potential. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 63-100.
- Salem, A., Jazayerib, S.H., Rastellic, E., Timellinic, G., 2009. Effect of nepheline syenite on the colorant behavior of porcelain stoneware body. Journal of Ceramic Processing Research, 10 (5), 621-627.
- Sariiz, K., Nuhoglu, İ., 1992. Endüstriyel hammadde yatakları ve madenciliği. Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, Eskişehir, Sayı: 62, 443 s.
- Stary, J., Kavina, P., Vanecek, M., Sitensky, I., Kotkova, J., Hodkova, T., 2009. Mineral commodity summaries of the Czech Republic. Ministry of the Environment Czech Geological Survey-Geofond, 492 p.
- Tait, K.T., Sokolava, E., Hawthorne, F.C., 2003. The crystal chemistry of nepheline. The Canadian Mineralogist, 41, 61-70.
- Tanner, A.O., 2010. Feldspar and nepheline syenite. Minerals Yearbook, Metals and Minerals 2010, Mines Bureau, Geological Survey and Interior Department, V. 1, 1114 p.
- Tanner, A.O., 2012. Feldspar and nepheline syenite. 2010 Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/myb1-2010-felds.pdf>, son erişim: 12.02.2018.
- Tanner, A.O., 2015. Feldspar and nepheline syenite. 2013 Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/myb1-2013-felds.pdf>, son erişim: 12.02.2018.
- Tanner, A.O., 2016. Feldspar and nepheline syenite. 2014 Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/myb1-2014-felds.pdf>, son erişim: 12.02.2018.
- Tanner, A.O., 2017. Feldspar and nepheline syenite. Mineral commodity summaries, U.S. Geological Survey, <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/mcs-2017-felds.pdf>, son erişim: 12.02.2018.
- Tuzcu, N., 1992. Petrografi-I (Magmatik Kayaçlar) (3. Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, Sayı: 100, 222 s.
- TÜİK, 2016. Dış ticaret istatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu, <https://biruni.tuik.gov.tr/disticaretapp/menu.zul>, son erişim: 12.02.2018.
- Unimin, 2014. A History in Havelock. Canadian Nepheline Modernization, <http://canadiannepheline.ca/#our-history>, son erişim: 12.02.2018.
- Woolley, A.R., 1987. Alkaline rocks and carbonatites of the World-Part 1: North and South America. The University of Texas Press, Austin, Texas, 216 p.

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAÇ

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

• İnsan ile Yerküre arasındaki etkileşimlere ilişkin bilgi ve deneyimleri doğal çevreyi de gözeterak daha güvenli ve rahat bir yaşam ortamı sağlamak amacıyla 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 özendirme 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 miktarda 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 önsonuçlarının veya bulgularının sunulduğu yazıdır. Amaç, okuyucuya güncel bir konuya ilişkin bir çalışmanın ön bulgu ve sonuçlarını duyurarak konu üzerinde tartışma ortamı yaratmak, konunun gelişmesine diğer araştırmacıların katkılarını sağlamaktır. Yazı uzunluğu 5000 sözcük eşdeğerini (5 JMD sayfası) aşmamalıdır. En az iki Yayın Kurulu üyesi tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
- 5- GÖRÜŞ-YORUM ve YANITLAR (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 yayın 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 eder 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 aralıklı, 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 yayımlara metin içinde değinirken ilk soyadı belirtilmeli, diğer yazarlar için vd. İbaresini kullanılmamalıdır.
....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 Dizini'nde de yer 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 değinilmeli ve metin içinde değinilen tüm kaynaklar, "Kaynaklar Dizini"nde eksiksiz olarak belirtilmelidir. Kaynakların yazılmasında aşağıdaki örneklerde belirtilen düzen esas alınmalıdır:

Sürelili yayınlar ve bildiriler

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. Sürelili Yayın 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., Canitez, N., 1972. Yapısal Jeoloji. İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, Sayı:869,520 s.

[Yazar ad(lar)ı, Tarih. Kitabın Adı (ilk harfleri büyük). Yayımevi, 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. Eskişehir (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_4 , 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 edilmelidir ($y=5 * 10^{-3}$ 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 kullanılabilecek oranda 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 dipnotlara 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 İtali 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 İtali 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 güçlüklerle neden olduğundan, çok gerekli durumlarda kullanılmamalıdır. Eğer dipnot kullanılırsa, yıldız (*) işareti ile gösterilmeli ve mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Dipnota eğer değinme yapılırsa bibliyografik bilgiler dipnota 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 başvuru 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
Arzu FIRAT ERSOY, Duygu KARAGÜLLÜ
Söğütlü Deresi (Trabzon) Su Kalitesi Parametrelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi
Evaluation of Water Quality Parameters of Söğütlü River (Trabzon) Using Geographical Information System
- 17- Araştırma Makalesi / Research Article
Ali ELMAS
Kıbrıs Adası Yapısal Süreksizliklerinin EGM08 Gravite Verileri Kullanılarak Belirlenmesi
Determination of Structural Discontinuities in Cyprus Island by Using EGM08 Gravity Data
- 33- Araştırma Makalesi / Research Article
Mehmet ÖZÇELİK
Kabataş-Mecidiyeköy Metro (İstanbul) Tünellerinde Zor Zemin Koşullarının Tünel Kazısına Etkisi
Effect of Difficult Ground Conditions on Tunnel Excavations in Kabataş-Mecidiyeköy Metro (Istanbul) Tunnel
- 49- Araştırma Makalesi / Research Article
Feyat TAZ, Ömer ÜNDÜL, Hasan DENEK
Çamlıca Tepesi Ulaşım Tünellerinin Yapım Aşamalarında Karşılaşılan Sorunların Değerlendirilmesi
Evaluation of Problems Encountered During the Construction of the Çamlıca Hill Access Tunnels
- 77- Derleme / Review Paper
Nurkan KARAHANOĞLU
Yeraltısuyu Çekimi Sonucu Oluşan Yüzey Çökmesi Problemi; Bilimsel Araştırmaların Tarihsel Gelişimi
Surface Subsidence Problem Due to Groundwater Withdrawal; A Historical Review
- 107- Derleme / Review Paper
Serhan HANER, Murat DEMİR
Nefelinli Siyenit: Bir Gözden Geçirme
Nepheline Syenite: A Review