

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 48

Sayı - Number 2

ISSN 1016 - 9172

Aralık / December 2024



TMMOB JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Türkiye

BAŞ EDİTÖR / EDITOR in CHIEF

Tolga ÇAN
tolgacan@cu.edu.tr

EDİTÖRLER / EDITORS

Cüneyt GÜLER
cguler@mersin.edu.tr

Nihat Sinan IŞIK
nihatsinan@gazi.edu.tr

Mustafa Kerem KOÇKAR
mustafakockar@hacettepe.edu.tr

Senem TEKİN
senemtekin@adiyaman.edu.tr

İNGİLİZCE EDİTÖRÜ / ENGLISH EDITOR

Catherine YİĞİT

Makale Gönderim Adresi:

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara
Tel : (0312) 434 36 01
Faks : (0312) 434 23 88
E-Posta : jmo@jmo.org.tr
<https://dergipark.org.tr/pub/jmd>

Yayın Türü: Yaygın Süreli Yayın

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

Yayın Sahibi: TMMOB JMO Adına

Hüseyin ALAN

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

Baskı: ERS Matbaacılık,
Kazım Karabekir Cad. Altuntop İşhanı
No:87/7 İskitler/Ankara
Tel : (0312) 384 54 88
Baskı Tarihi : Aralık 2024
Baskı Adedi : 500

Yayın Kurulu / Editorial Board

Ahmet Hakan NEFESLİOĞLU (Eskişehir Teknik Üniversitesi)
Ali KAYABAŞI (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)
Ali ÖZVAN (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
Alper BABA (İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü)
Arzu Fırat ERSOY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Atiye TUĞRUL (İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa)
Ayhan GÜRBÜZ (Gazi Üniversitesi)
Aykut AKGÜN (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı)
Bülent KAYPAK (Ankara Üniversitesi)
Candan GÖKÇEOĞLU (Kapadokya Üniversitesi)
Celalettin ŞİMŞEK (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Cem KINCAL (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Ergün TUNCAY (Hacettepe Üniversitesi)
Hakan ERSOY (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Halil KUMSAR (Pamukkale Üniversitesi)
Haluk AKGÜN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
İsmail DİNÇER (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)
Kaan Şevki KAVAK (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi)
Mahmut Göktuğ DRAHOR (Dokuz Eylül Üniversitesi)
Mehmet Furkan ŞENER (İzmir Bakırçay Üniversitesi)
Mehmet İrfan YEŞİLNACAR (Harran Üniversitesi)
Muhterem KÜÇÜKÖNDER (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)
Murat YILMAZ (İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa)
Mustafa KORKANÇ (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)
Mustafa Tolga YILMAZ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
Mutluhan AKIN (Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi)
Raşit ALTINDAĞ (Süleyman Demirel Üniversitesi)
Remzi KARAGÜZEL (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Sair KAHRAMAN (Hacettepe Üniversitesi)
Tolga GÖRÜM (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Zülfü GÜROCAK (Fırat Üniversitesi)

Jeoloji Mühendisliği Dergisi makale ve dizin özleri
Scopus, Google Scholar, TR Dizin, indeksleri tarafından taranmaktadır.

Journal of Geological Engineering is indexed and abstracted by Scopus, Google Scholar, TR Dizin.

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

Hüseyin ALAN
Seçkin GÜLBUDAK
Dursun Malik BAKIR
Düzcün ESİNA
Özgür DEĞİRMENCİ
Zeynel Abidin GÖK
Burcu GÖRBİL

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

Jeoloji Mühendisliği Dergisi JMO yayını olup para ile satılmaz.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi / Journal of Geological Engineering

Cilt - Volume 48

Sayı - Number 2

Aralık / December 2024

İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 95- Araştırma Makalesi / Research Article
İsmail DİNÇER, Mutluhan AKIN, Ahmet ORHAN, Emre BECERİR, Mehmet Yasin CANBOLAT
**Kültürel ve Tarihi Miras Alanlarındaki Kaya Oyma Yapılarda Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları:
Kayaşehir Yüzey Yerleşkesi (Nevşehir) Örneği**
*Engineering Geological Studies of Rock Hewn Structures in Cultural and Historical Heritage Sites: A Case Study of
Kayaşehir Surface Settlement (Nevşehir)*
- 123- Araştırma Makalesi / Research Article
Nil VURAL, Murat YILMAZ, Burcu ONAT, Atiye TUĞRUL, Burcu UZUN AYVAZ
**Agrega Madencilğinde Çevresel Etkilerin Yaşam Döngüsü Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi:
Cebeci Agregası Ocakları Örneği**
*Assessment of Environmental Impacts of Aggregate Mining with the Life Cycle Approach; an Example of Cebeci Aggregate
Quarries*
- 139- Araştırma Makalesi / Research Article
Eroltan DURMUŞ, Özkan CORUK, Ahmet KARAKAŞ
Kaya Düşmesi Risklerinin Kentlerin Planlanmasına Etkileri: Çoruh Havzası Örneği
Effects of Rockfall Risks on Urban Planning: The Coruh Basin Case
- 161- Araştırma Makalesi / Research Article
Mehmet Ali AKGÜL
EnMAP Hiperspektral Uydusunun Batimetri Kabiliyeti
Bathymetry Capability of EnMAP Hyperspectral Satellite
- 179- Araştırma Makalesi / Research Article
Murat KARAHAN, Muhammet Oğuz SÜNNETCİ, Hakan ERSOY, Ali İPEK
**3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri ile Birleşik Kaya İslah Uygulamalarının Değerlendirilmesi:
Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Örneği**
Evaluation of Combined Rock Remediation Applications with 3D Rockfall Analyzes: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Case
- 203- Derleme / Review
Yusuf Ziya ÖZKAN
Maden Kaynak Belirleme Sondaj Programlarının Optimizasyonu
Optimization of Mineral Resource Definition Drilling Programs



Araştırma Makalesi / Research Article

Kültürel ve Tarihi Miras Alanlarındaki Kaya Oyma Yapılarda Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları; Kayaşehir Yüzey Yerleşkesi (Nevşehir) Örneği

Engineering Geological Studies of Rock Hewn Structures in Cultural and Historical Heritage Sites: A Case Study of Kayaşehir Surface Settlement (Nevşehir)

İsmail DİNÇER^{1*} , Mutluhan AKIN¹ , Ahmet ORHAN¹ ,

Emre BECERİR² , Mehmet Yasin CANBOLAT¹ 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Kapadokya Jeolojik Miras ve Kaya Oyma Yapıları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir

² Nevşehir Belediyesi, Kentsel Dönüşüm Müdürlüğü, Nevşehir

Geliş (Received): 24.10.2024 / Düzeltme (Revised): 17.11.2024 / Kabul (Accepted): 26.11.2024

ÖZ

Kültürel ve tarihi miras niteliğindeki kaya oyma yapıların buldukları kaya kütleleri ve inşasında kullanılan doğal malzemeler, çevresel faktörlerin etkisiyle zaman içinde ilksel özelliklerini kaybederek bozunmaktadır. Bunun sonucu olarak söz konusu yeraltı yapıları bazı kaya kütle duraysızlıklarına maruz kalmakta, ve tarihi ve kültürel özelliklerini kaybetmektedir. Bu durum genel olarak mühendislik jeolojisinin tarihi ve kültür varlıklarının korunması ve yönetimi çalışmalarındaki önemini göstermektedir. Bu çalışmada, Nevşehir kent merkezinde 2014 yılında kentsel dönüşüm çalışmaları sırasında ortaya çıkarılan ve çok sayıda kaya oyma mekândan oluşan Kayaşehir yeraltı şehrindeki “Kilise” ve “At Ahır” olarak kullanılmış kaya oyma yapılarda olası kaya kütle duraysızlıkları mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmiştir. Söz konusu kaya oyma yapılar sonlu elemanlar yöntemine göre sayısal olarak analiz edilmiştir. Buna göre, incelenen kilisenin tavan ve incelenmiş yan duvarlarında çekme gerilmeleri oluşurken, At Ahır’ının kırık hatlarının kesiştiği tavan bölümünde çekme gerilmeleri yoğunlaşmıştır. Kaya oyma yapılarda gerçekleştirilen sayısal analizlerde, belirlenen çekme gerilmeleri ve dayanım faktörü değişimleri olası duraysızlıkların değerlendirilmesinde anlamlı sonuçlar vermektedir. Kapadokya Bölgesi’ndeki kaya oyma yapılarda tavadan blok düşmesi, aşırı sökülme, eğilme, pullanma, doğal ayaklarda ayrışma ve makaslama yenilmesi, tavan kalınlığının azalması, açıklık girişlerindeki kaya düşmesi, mevcut destek sistemlerinde zayıflama ve düşük kaya kütle kalitesi en önemli duraysızlık türleridir. Bölgenin kültürel miras niteliği göz önünde bulundurularak söz konusu stabilite problemlerine karşı iyileştirme yöntemlerinin seçiminde doğal dokunun mümkün olduğunca korunmasına ve yapıların tarihi önemlerine mutlaka özen gösterilmelidir. Bunun için arkeolog, sanat tarihçi, mimar, restoratör ve yetkin mühendisler gibi disiplinlerin de içinde bulunduğu bir grup tarafından iyileştirme yöntemlerinin değerlendirilip karar verilmesi, tarihi ve kültürel yapıların korunması ve mevcut çevresel koşullara uyumlu hale getirilmesi noktasında oldukça önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Kapadokya, tarihi kaya oyma yapılar, zayıf kaya, sayısal analiz

ABSTRACT

The rock masses where rock-hewn structures forming cultural and historical heritage are located and the natural materials used in their construction lose their initial properties and deteriorate over time under the influence of

environmental factors. As a result, the underground structures in question are exposed to some rock mass instabilities and lose their historical and cultural properties. This situation generally illustrates the importance of engineering geology for the protection and management of historical and cultural assets. In this study, possible rock mass instabilities in the rock-hewn structures used as “church” and “horse stable” in Kayaşehir underground city, which was unearthed during urban transformation works in Nevşehir city center in 2014 and consists of many rock-hewn spaces, were evaluated in terms of engineering geology. The rock-hewn structures in question were numerically analyzed with the finite element method. Accordingly, while tensile stresses occur in the ceiling and thinned side walls of the church, tensile stresses are concentrated in the ceiling section where the discontinuities of the Horse Stable intersect. In numerical analyses performed on the rock-hewn structures, the tensile stresses and strength factor changes provide meaningful results for the evaluation of possible instabilities. In the rock-hewn structures in the Cappadocia Region, the most important types of instabilities are blocks falling from the ceiling, breaking, bending, flaking, deterioration and shear failure of natural piers, decreases in ceiling rock thickness, rockfall at the entrances of openings, weakening of existing support systems and low rock mass quality. Considering the cultural heritage nature of the region, when selecting improvement methods for these stability problems, attention should be paid to preserving the natural texture as much as possible and to the historical importance of the structures. For this reason, it is very important for improvement methods to be evaluated and decided by a group including several disciplines, such as archaeologists, art historians, architects, restorers and competent engineers, in order to preserve historical and cultural structures and to assist in adaptation to the current environmental conditions.

Keywords: Cappadocia, historical rock hewn structures, weak rocks, numerical analysis

GİRİŞ

İnsanlığın Dünya'da bıraktığı en önemli izlerden biri olan kültürel miraslar ve bunların bulunduğu tarihi alanların korunması ve mevcut çevresel koşullara uyumlu hale getirilmesi, sahip olduğumuz kültürel ve tarihi mirasların gelecek nesillere aktarılması noktasında oldukça önemli bir husustur. Kültürel ve tarihi mirasın korunması ve yönetilmesi sanat, tarih, arkeoloji, mimarlık, mühendislik ve yönetim sistemleri gibi disiplinler arası bir sürecin işletilmesine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle insanlar tarafından oluşturulmuş kutsal alanlar, arkeolojik alanlar, anıtsal heykeller ve diğer mimari yapılar gibi somut kültürel miraslar ve bunların kalıntıları mevcut çevresel koşullar ile uyumlu değildir. Söz konusu yapıların oluşturulmasında kullanılan doğal malzemeler ve içine oluşturuldukları kaya kütleleri çevresel faktörlerin etkisiyle zaman içinde ilksel özellikleri kaybederek bozunmaktadır. Bu durum genel olarak mühendislik jeolojisi ve yer bilimlerinin, kültür varlıklarının korunması ve

yönetimi konusunda önemli bir rolü olduğunu göstermektedir. Margottini (2015), jeolojinin genel olarak tarihi kentsel alanların ve kültürel mirasın kentsel planlamasına ve inşasına getirdiği sınırlamaları değerlendirmiştir. Buna göre kaya malzemesinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin zayıflamasında etkili olan jeolojik faktörlerin, çevresel ve doğal tehlikelerle birlikte anıt ve sit alanlarının kısa, orta ve uzun vadede korunmasını etkileyen faktörler olarak karşımıza çıktığını ifade etmiştir.

Kapadokya, mühendislik jeolojisi çalışmalarının yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği en önemli tarihi ve kültürel miras alanlarından biri olup doğası, tarihi ve kültürel değerleri ile 1985 yılında UNESCO tarafından Dünyada korunması gerekli Kültür Mirası listesine dâhil edilmiştir. Kapadokya, volkanik aktivitenin yoğun olarak yaşandığı bir bölge olup yörede kalın bir piroklastik istif (tüf, ignimbirit vb.) yayılım göstermektedir. Söz konusu piroklastik kayalar, kolay kazılabilen zayıf kaya özelliği

göstermeleri ve termal yalıtım özelliklerinden dolayı hem tarihsel dönemde hem de günümüzde korunma, barınma, ibadet alanı, depolama ve turistik tesis amacıyla kullanılan kayadan oyma yapılar için temel kayası konumundadır. Söz konusu jeolojik çevrenin kayadan oyma yapılar için tarih boyunca kullanımı, bölgede birçok önemli tarihi ve kültürel mirasın oluşmasına neden olmuştur. Ancak, söz konusu tarihi ve kültürel miras öğeleri, inşa edildikleri kaya kütle kalitesinin düşük olması ve çevresel faktörlerin etkisiyle kolaylıkla ilksel dayanımlarını kaybetmekte ve bunun sonucu meydana gelen kaya kütle duraysızlıkları tarafından ciddi şekilde tehdit edilmektedir. Bundan dolayı bölge birçok mühendislik jeolojisi çalışmasına konu olmuştur. Erguvanlı ve Yüzer (1977) bu yapıların tarihsel ve güncel kullanımı üzerine ilk çalışmayı yapmışlardır. Bunun yanı sıra; bu yapıların tasarımını etkileyen mühendislik jeolojisi parametreleri birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir (Topal ve Doyuran, 1997; Topal ve Doyuran, 1998; Ulusay vd., 2006; Aydan vd., 2007; Sülükçü, S., 2019; Dinçer vd., 2020; Deniz ve Topal, 2021). Bölgede, kalın ve masif tabakalı istifler içerisinde açılan yeraltı açıklıklarında herhangi bir sorun ile karşılaşılmazken, ince ve orta tabakalı istifler içerisindeki yeraltı açıklıklarında duraysızlık problemleri ile karşılaşmaktadır (Yılmaz, 2005). Aydan ve Ulusay (2003) bu yapıların inşa edildiği tüflerin yatay ve düşey yönde herhangi bir değişim göstermediğini belirtmiştir. Kapadokya Bölgesi'nde yer alan kaya oyma yapılarda stabilite sorunlarını kontrol eden temel parametreler ayrışma ve süreksizliklerdir (Ulusay vd., 2006). Yeraltı açıklıklarında blok duraysızlıkları, aşırı sökülme, erozyon, sütun kesmeleri ve kaya düşmeleri en önemli stabilite sorunları olarak tanımlanmıştır. Öte yandan Ulusay ve diğ. (2013) ve Kaşmer ve diğ. (2013)

bölgedeki stabilite sorunlarını önemli lokasyonlar için değerlendirmişlerdir. Ayrıca bölgede yaygın afet türü olan kaya düşmelerini konu alan bir çok çalışma da bulunmaktadır (Tunusluoğlu ve Zorlu, 2009; Dinçer vd., 2015 ve 2016, Akın vd., 2021).

Bu çalışmada, Nevşehir kent merkezinde 2014 yılında kentsel dönüşüm çalışmaları sırasında ortaya çıkarılan ve çok sayıda kaya oyma mekândan oluşan yeraltı şehri oluşturulan kaya oyma yapılar (Kilise ve At Ahır) mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmiştir. Söz konusu yeraltı şehri bölgede son on milyon yılda etkili olan volkanizmanın ürünü olan volkanosedimanter bir istif içerisinde yer almaktadır. Oldukça kırıklı-çatlaklı ve keskin litolojik değişimlerin hâkim olduğu kaya kütleleri ayrışmanın etkisiyle zayıflamış ve birçok kaya oyma mekânda kaya kütle duraysızlıklarının yaşanmasına neden olmuştur. Bundan dolayı yeraltı şehri tamamen ziyarete açılmamış olup, günümüzde yeraltı şehri kısmi olarak ziyaret edilebilmektedir. Nevşehir Belediyesi tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında ziyaret rotasının genişletilerek daha nitelikli kültür miraslarının ziyarete açılması planlanmaktadır. Bu kapsamda ziyarete açılması planlanan ve görece nitelikli kültür miraslarının bulunduğu kaya oyma yapılarıdaki olası kaya kütle duraysızlıkları bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

MALZEME VE YÖNTEM

Kayaşehir

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Kayaşehir yeraltı şehri (Şekil 1), Nevşehir Kale Yerleşkesi içerisinde yer almakta olup, söz konusu bölgede Taşınmaz Kültür ve Tabiat Varlıkları Yüksek Kurulu'nun 17.04.1987 tarih 3578 sayılı kararıyla Nevşehir Kalesi ve etrafındaki alan

üzerinde çok sayıda anıtsal yapı ve sivil mimari örneği tescil edilmiştir. Bu dönemdeki tesciller sadece yerüstü kültür varlıklarını kapsamaktadır ve tescilli yapılar mevcut kent dokusu içinde dağınık biçimde konumlanmıştır (Becerir, 2020). Nevşehir Belediyesi'nce 05.09.2005 tarih 10 sayılı karar ile söz konusu alan 'Kentsel Dönüşüm ve Gelişim Alanı' ilan edilmiştir. 2009 yılında bölgede yer alan konutlarda kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında boşaltılma ve yıkım süreci başlamıştır. Bu aşamada yıkılan konutların bodrum ve yamaç bölümünde bir takım kaya oyma yapılarının varlığı tespit edilmiştir. Bu

gelişmeye istinaden yapılan çalışmalarda sahada çok sayıda boşluk, tünel vb. yapıların varlığı tespit edilmiş ve bunun üzerine Nevşehir Kültür Varlıkları Koruma Bölge Kurulu'nun 09.05.2014 tarihli 1079 sayılı kararıyla alanda hiçbir imar uygulaması yapılmaması kararı alınmış ve Nevşehir Kalesi etrafı üçüncü derece arkeolojik sit alanı ilan edilmiştir. 2019 yılında Nevşehir Müze Müdürlüğü'nün kontrolü altında Nevşehir Belediyesi'nce yapılan temizlik çalışmalarında açığa çıkarılan kaya oyma mekânlar ve diğer gelişmeler ışığında üçüncü derece sit alan sınırı tescil sınırları güncellenmiştir.



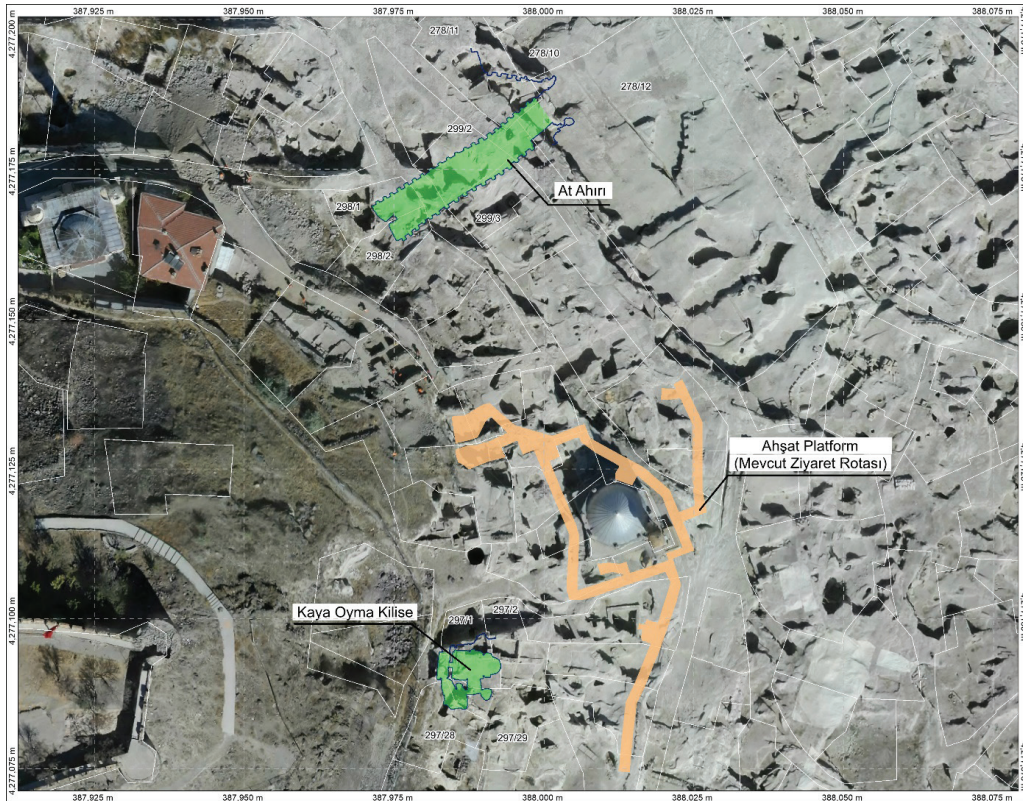
Şekil 1. Kayaşehir'in kentsel dönüşüm öncesi görünümü (a), yeraltı şehrinin genel görünümü (b), yeraltı şehrinin detay görünümü (c).

Figure 1. General view of Kayaşehir before urban renewal (a), general view of the underground city (b), close up view of the underground city (c).

2020 yılında Nevşehir Kalesi ve çevresini kapsayan alan 5366 sayılı yıpranan tarihi ve kültürel taşınmaz varlıklarının yenilenerek korunması ve yaşatılarak kullanılması yasası uyarınca ‘yenileme alanı’ ilan edilmiştir. Bu karardan sonra bölgede yerüstü güncel sivil mimari örneklerinin çoğu kaldırılmış olup yeraltı şehrini oluşturan su yapıları, kaya oyma mezarlar, tüneller, barınma yapıları gibi askeri, dini ve sosyal yaşam alanlarına ait farklı nitelikte kaya oyma mekânlar büyük ölçüde açığa çıkarılmıştır. Bugüne kadar 120 bin metrekarelik alanda gerçekleştirilen temizlik çalışmalarında, 6. yüzyıla tarihlenen Manastır ve 12. yüzyılda yapılan Bizans Kilisesi gün yüzüne çıkartılmış olup söz konusu bölge 2020 yılında “Kayaşehir” adıyla kısmi olarak ziyarete açılmıştır.

Yöntem

Bu çalışmada mevcut Kayaşehir ziyaret rotasının genişletilmesine yönelik devam eden güçlendirme ve ıslah çalışmaları kapsamında bazı kaya oyma yapılarıdaki stabilite problemleri değerlendirilmiştir. Bu amaç için Bizans Kilisesi ve At Ahırını olarak adlandırılan iki farklı kaya oyma yapı seçilmiş ve mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir (Şekil 2). Bu kapsamda öncelikle her iki kaya oyma yapısının mimari özelliklerini ortaya koymak üzere rölöve çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen plan ve kesitler mühendislik jeolojisi çalışmalarında temel altlık olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. İncelenen kaya oyma yapıların konumları.

Figure 2. Locations of the investigated rock hewn structures.

Sahada öncelikle kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Fiziksel özellikleri için küçük boyutlu örnekler alınırken, dayanım özellikleri için tahribatsız deney yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada İğne Penetrometresi deneyi yardımıyla zayıf ignimbirit ve volkanosedimanter birimlerin tek eksenli basınç dayanımı dolaylı yoldan belirlenmiştir. İğne Penetrometresi deneyinin esası, elle yapılan yüklemeye penetrometrenin ucunda bulunan iğnenin kayanın içine batmasına dayanmaktadır (Ergüler, 2007). Deneylerde kullanılan iğne penetrometresi aleti, Maruto Testing Machine Co. (Maruto, 2006) tarafından üretilen SH-70 modelidir ve ağırlığı yaklaşık 700 g'dır.

İnceleme sahasındaki piroklastik kayaların ve volkanosedimanter birimler ilk olarak 1990'lı yıllarda Hoek-Brown tarafından geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da değerlendirilmiş olup GSI sisteminde kaya kütleleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütlelerinin özelliğini yansıtan yapısal özellik puanı yardımıyla sınıflanabilmektedir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır.

Bilindiği üzere kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri kaya malzemesi dayanımı ve süreksizliklerin ortak bir fonksiyonu olup kaya kütlelerini kesen süreksizliklere ait özellikler de arazi çalışmaları ile belirlenmiştir. İgnimbiritlerin ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için yenilme zarfları Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile elde edilmiştir.

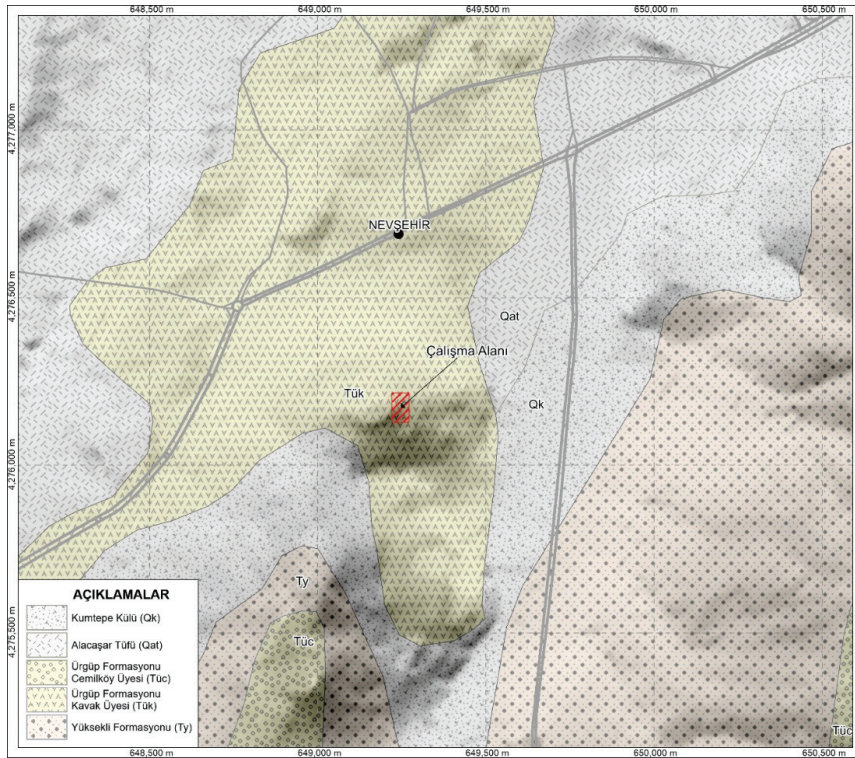
Kaya oyma yapılarındaki stabilite problemleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak

değerlendirilmiştir. Bu çalışmada sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan iki boyutlu (2D) yazılım RS2 (Rocscience, 2020) kullanılmıştır. Analizlerde incelenen yapıyı karakterize edecek şekilde, rölelerinden farklı yönlerde kesit hatları belirlenmiştir.

Kayaşehir ve Civarının Jeolojisi

Kayaşehir ve yakın civarının jeolojisini Tersiyer yaşlı karasal ve volkanik birimler oluşturmaktadır. Söz konusu birimler Atabey (1989) tarafından Yüksekli formasyonu, Ürgüp formasyonu Kavak üyesi ve Cemilköy üyesi ve Alaçaşar tüfü ve Kumtepe külü olarak adlandırılmıştır (Şekil 3). Kayaşehir'in güney ve güney doğusunda gözlenen Yüksekli formasyonu (Ty) akarsu ve göl ortamı ürünüdür. Birim genel olarak beyazımsı – gri, orta – ince taneli, teknesel çapraz tabakalı kumtaşı, çakıllı kumlu, tüfit, miltası, kiltası ile kaba kumtaşı ve çakıl taşlarıyla temsil edilmektedir (Atabey, 1989).

Kayaşehir'in içerisinde yer aldığı Ürgüp formasyonu Kavak üyesi (Tük) ignimbirit karakterli olup, açık kahve, beyazımsı renkli homojen ignimbirit ve pomza içermektedir. Kavak üyesinde beyaz – kirli beyaz renkli, andezitik bileşenli, camsı tüfitli, köşeli parçacıklı pomza külü düzeyleri de izlenmiştir. Kavak üyesi, Ürgüp yöresinde ilk ignimbirit oluşumlarını temsil etmektedir (Atabey, 1989). Birim kumtaşı, marn, kiltası ve çakıl taşı gibi sedimanter seviyeler ile ar dalanma göstermekle birlikte yer yer oldukça kırıklı çatlaklı bir yapı sunmaktadır. Buna karşın Kayaşehir'in güneyinde oldukça sınırlı bir alanda gözlenen Ürgüp formasyonu Cemilköy üyesi (Tüc) ise pomzalı, inci grisirenginde pumisli ve litik karakterli volkano – sedimanter bir ar dalanmadan oluşmaktadır. Yer yer ofiyolitik kayaç ve bazaltik lav çakılları içerir (Atabey, 1989).



Şekil 3. Kayaşehir ve yakın civarının jeoloji haritası (Atabey, 1989'dan değiştirilerek alınmıştır).

Figure 3. Geological map of Kayaşehir and vicinity (modified from Atabey, 1989).

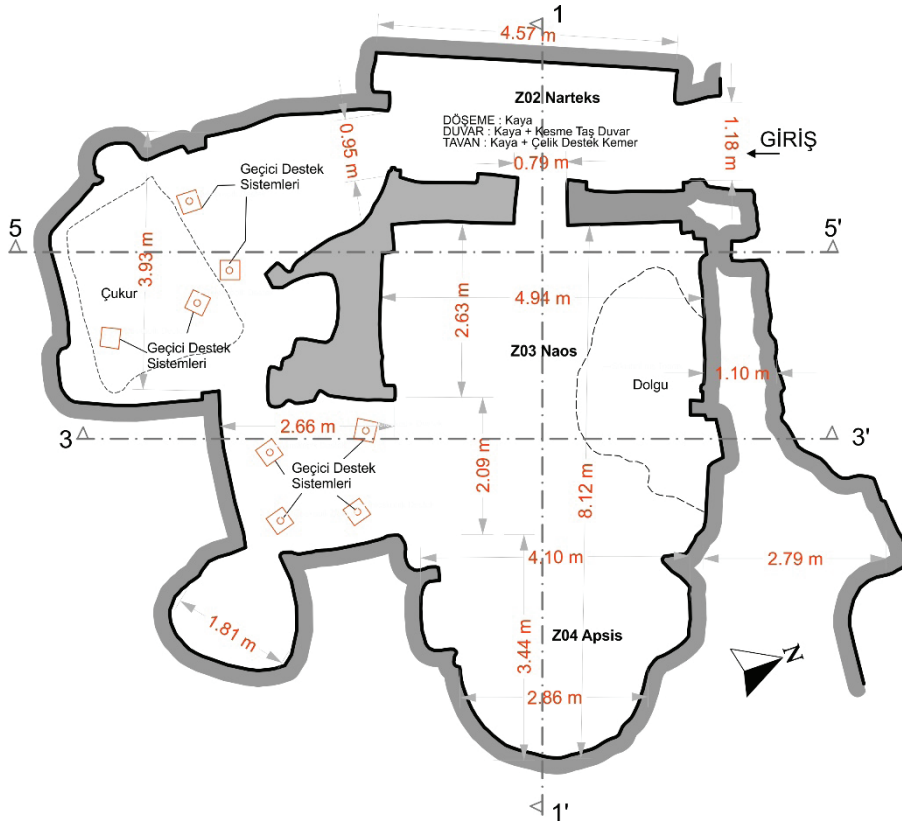
Kayaşehir civarında geniş mostralar sunan ve zayıf kaynaşmış karakterde olan Alacaşar tüfü (Qat) ve Kumtepe külü (Qk) geniş alanlarda gözlenmekte olup Alacaşar tüfü lav parçaları ve obsidiyence zengin iken, Kumtepe külü ise pomzaca zengin camsı küllerden oluşmaktadır. Kumtepe külünün yaşı Holosen – Güncel olarak kabul edilmiştir (Atabey, 1989).

ARAŞTIRMA BULGULARI

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere Kayaşehir çok sayıda kaya oyma yapıdan oluşmaktadır. Bu çalışmada “Kilise” ve “AtAhır” olarak adlandırılan iki farklı kaya oyma yapıda kaya kütle duraysızlıklarının değerlendirilmesine yönelik gerçekleştirilen mühendislik jeolojisi çalışmalarına yer verilmiştir.

Kaya Oyma Kilise

Tek nefli ve 4.60 metre genişliğinde duvar resimlerinin bulunduğu Kaya Oyma Kilise'nin ilk çalışmalarına göre 13.yy Geç Ortaçağ dönemine ait olduğu düşünülmektedir. Şekil 4'te detaylı planın verildiği açıklık, yaklaşık doğu-batı uzanımında olup toplam 10.58 metre uzunluğundadır. Kaya oyma kilisenin neden olduğu yeraltı açıklığın genişliği 4.94 ile 2.86 metre arasında değişmekte olup açıklık yüksekliği 4.24 ile 3.62 metre arasındadır. Üzerindeki örtü kalınlığı 1.00 ile 1.50 metre arasında değişmekte olup, üst bölümde herhangi bir kaya oyma yapı veya ilave gerilme oluşturacak bir yapı bulunmamaktadır.

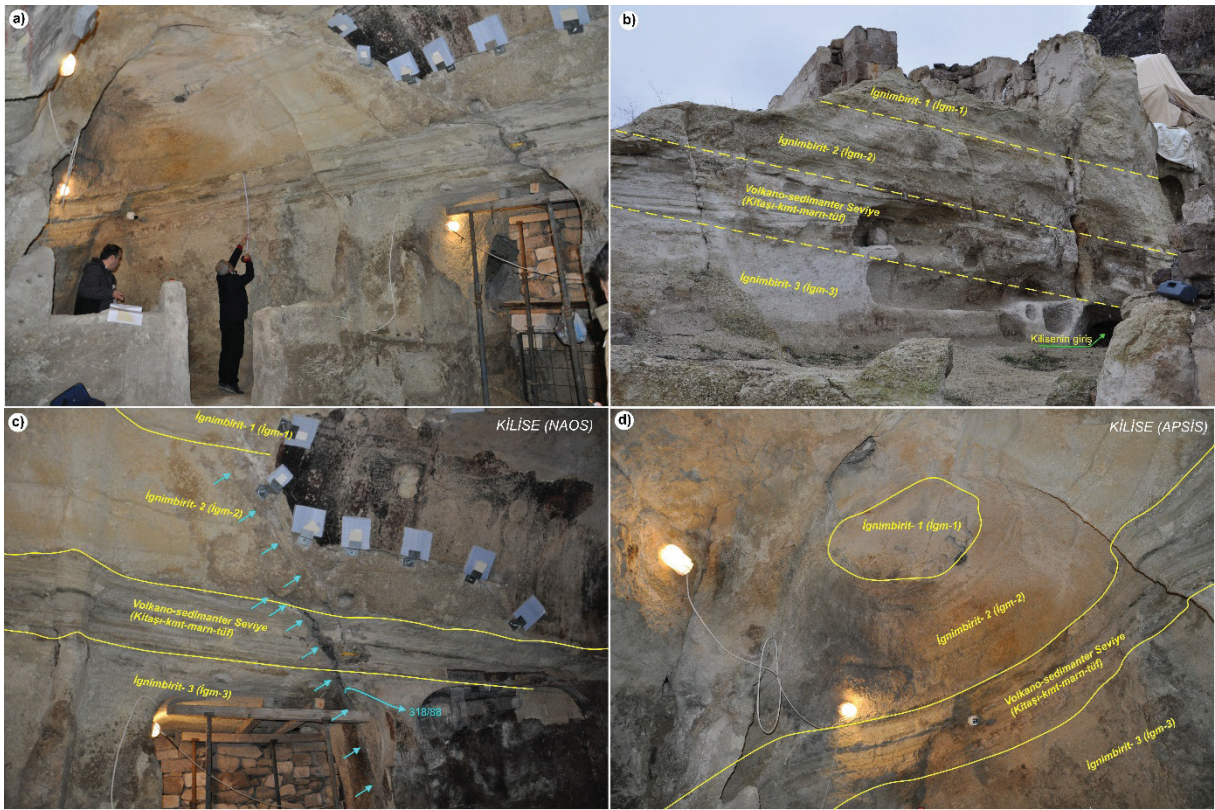


Şekil 4. Kaya oyma kilisenin plan görünümü.

Figure 4. Plan view of the rock hewn church.

Kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlesi, bölgede 9-10 milyon yıl önceki volkanik faaliyetler sonucunda oluşmuş ve volkano-sedimanter seviyeler ile kesilmiş farklı ignimbirit seviyelerinden oluşmaktadır. Söz konusu farklı seviyeler kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlesinde de net olarak gözlenmektedir (Şekil 5a ve b). Kaya oyma kilisenin tabanı çalışma kapsamında İgnimbirit-3 olarak adlandırılan birim ile başlamaktadır. İgnimbirit-3 krem yer yer kirli beyaz orta-zayıf kaynaşmış karakterdedir. Bu seviyenin hemen üzerine yaklaşık 343/12 tabaka yönelimine sahip ve yaklaşık 0.7 metre kalınlığında sedimanter seviye gelmektedir. Söz konusu seviye kumtaşı-

marn-kiltaşı-tüf ardalanmasından oluşmaktadır. Daha sonra bu seviyenin üzerinde İgnimbirit-2 olarak adlandırılan ve yaklaşık 1.10 metre kalınlığında iri pomzalı ve az kaynaşmış seviye yer almaktadır. En üstte ve kaya oyma kilisenin tavanını oluşturan ignimbirit yine orta-zayıf kaynaşmış karakterdedir (Şekil 5c ve d). Açıklık içerisinde düzenli-düzensiz süreksizlikler bulunmakta olup önemli süreksizlik yönelimleri 318/88, 357/82, 344/74 ve 343/12 olarak belirlenmiştir. 318/88 yönelime sahip süreksizlik oldukça geniş açıklığa ve yüksek devamlılığa sahip olup kiliseyi kuzeydoğu-güneybatı yönünde boydan boya kesmektedir (Şekil 5c).



Şekil 5. Kilisenin genel görünümü (a), kaya kütle özelliklerinin kilisenin dışından görünümü (b), kilisenin içinden (Naos ve Apsis) kaya kütle birimlerinin değişimi (c ve d).

Figure 5. General view of the rock hewn church (a), rock mass properties of the church from outside (b), rock mass properties of the church (nave and apse) from inside (c-d).

Kilisenin kaya malzemesi ve kaya kütle özellikleri

İnceleme alanındaki İgnimbiritler ve volkanosedimanter seviyelerin malzeme ve kaya kütle özellikleri açısından tahribatsız test yöntemleri ve görgül sınıflamalar ışığında değerlendirilmiştir.

Arazide yapılan iğne penetrometresi deneyleri sonucuna göre inceleme alanındaki İgnimbiritlerde iğne penetrometresi batma oranları (NPR) 3.5 ile 25.0 N/mm arasında değişmekte olup, Ulusay ve Ergüler (2012) tarafından önerilen formül (1)'e göre kaya

birimlerin sağlam kaya tek eksenli basınç dayanımları belirlenmiştir.

$$UCS = 0.51 \times NPR^{0.8575} \quad (1)$$

İgnimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımı 2.00 MPa ile 5.10 MPa arasında değişmekte olup, ortalama tek eksenli basınç dayanımı İgnimbirit-1 ve volkanosedimanter seviyeler için 5.00 MPa, İgnimbirit-2 için 3 MPa ve İgnimbirit-3 için 4.00 MPa olarak belirlenmiştir. Birimlerin kaya kütle özellikleri Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da

değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır. Kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerini oluşturan ignimbirit seviyelerindeki süreksizlik yüzeyleri genellikle az pürüzlü ve az-orta derecede bozunmuş özelliktedir. Süreksizliklerde dolgu gözlenmemiştir. Bu özellikler ışığında ignimbiritler ve volkano-sedimanterler için süreksizlik yüzey koşulu (SCR) puanı 12 olarak saptanmıştır. Öte yandan, İgnimbirit-1 için hacimsel eklem sayıları (Jv) 1.5 ve İgnimbirit-2, İgnimbirit-3 ve volkano-sedimanter için 2'dir. Bu durumda, GSI sistemindeki yapısal özellik puanı (SR), İgnimbirit-1 için 75, diğer kaya birimleri için 64 olarak belirlenmiştir. Buna göre İgnimbirit-1 için GSI puanı 65 ve diğer kaya birimleri için 60'dir. GSI değerine göre çalışma alanında yer alan kaya birimleri "bloklı" kaya kütlelerini yansıtmaktadır.

İgnimbiritlerin ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002) yararlanılmıştır. Çalışma alanında volkano-sedimanter birimler için kaya malzeme sabiti (m_i) 10 kabul edilirken, örselenme faktörü (D) sıfır olarak kabul edilmiştir. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için Hoek-

Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kütleli dayanımı, elastisite modülü ve Hoek-Brown sabitleri olan "mb, s ve a" belirlenmiştir (Çizelge 1). Rocdata programı kullanılarak kaya kütlelerinin deformasyon modülü Hoek ve Diederichs (2006)'da verilen eşitlik ile belirlenmiştir.

Kaya oyma kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerini kesen ve yaklaşık olarak 318/88 yönelime ve yüksek devamlılığa sahip süreksizlik düzleminin kayma direnci için Barton-Bandis yenilme ölçütü kullanılmıştır.

Barton ve Choubey (1977) residual sürtünme açısının şu şekilde tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad (2)$$

Burada, r ayırışma yüzeyin veya ıslak yüzeyin Schmidt değeri, R is ayırışmamış yüzeyin Schmidt değeridir. Temel sürtünme açısı (ϕ_b) süreksizliklerin makaslama dayanımının tahmininde anahtar rol oynamaktadır. Temel sürtünme açısı taze yüzeyleri karakterize etmekte olup laboratuvarında tilt deneyi ve süreksizlik makaslama kutusu deneyi yapılarak taze düz yüzeyler için hesaplanabilir.

Çizelge 1. Kaya birimlerinin kütleli dayanım ve deformasyon özellikleri.

Table 1. Rock mass strength and deformation properties of the rock units.

Birim Adı	m_b	s	a	Kaya Kütleli Çekme Dayanımı (MN/m ²)	Kaya Kütleli Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MN/m ²)	Kütleli Dayanım (MN/m ²)	Elastisite Modülü (MN/m ²)
İgnimbirit-1	2.865	0.020	0.502	-0.036	0.710	1.237	1500
İgnimbirit-2	1.917	0.012	0.503	-0.018	0.321	0.595	900
İgnimbirit-3	2.157	0.012	0.503	-0.022	0.428	0.834	1200
Sedimanter S.	2.397	0.012	0.503	-0.025	0.535	1.092	1500

İnceleme alanındaki kaya birimlerinin temel içsel sürtünme açısı (ϕ_b) iki tane disk şeklinde örnek kullanılarak aynı örnek üzerinde yapılan beş farklı tilt deneyinden elde edilen eğim açılarının (β) ortalaması alınarak Stimpson (1981)'e göre belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda inceleme alanındaki ignimbiritler ve volkanosedimater için temel sürtünme açısının (ϕ_b) ortalama 34 olduğu belirlenmiş ve buna göre artık sürtünme açısı ise (ϕ_r) 32° olarak hesaplanmıştır. Pürüzlülük katsayısı (JCR) 10 ve süreksizlik yüzey dayanımı 2.0 MPa olarak belirlenmiştir. Buna göre düşük gerilme koşulları (70 kPa) için süreksizlik düzleminin sürtünme açısı (ϕ) 48° ve kohezyon 2.0 kPa olarak saptanmıştır.

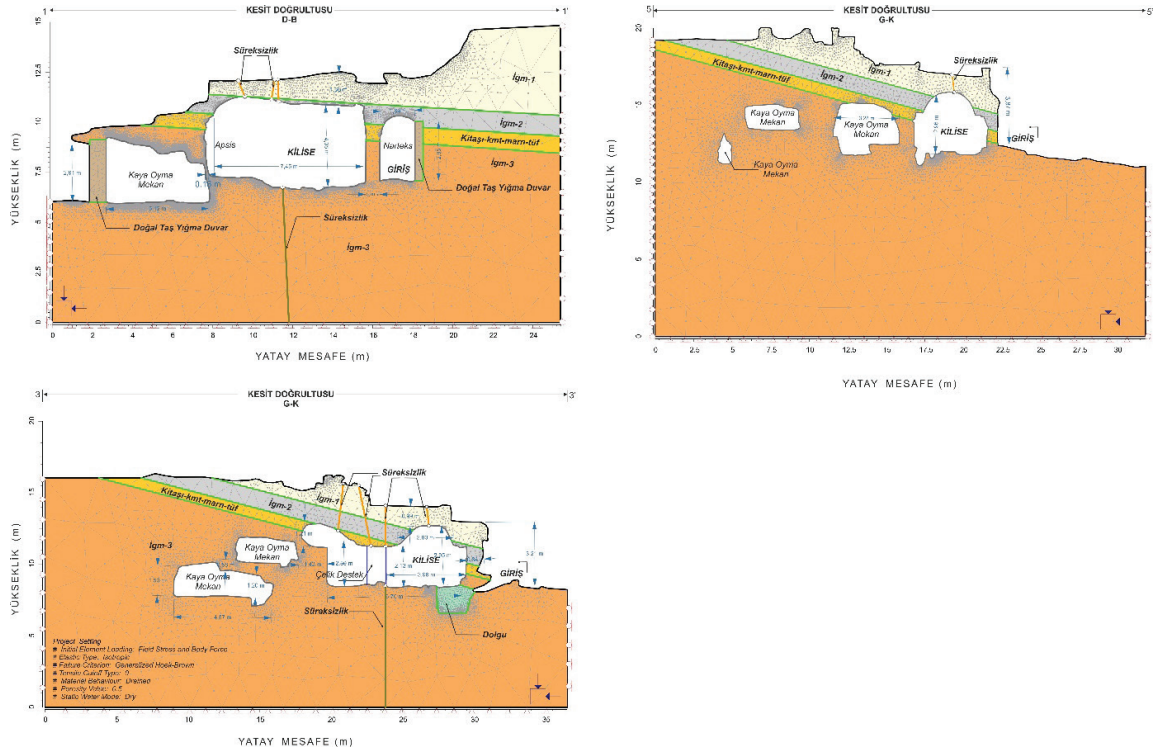
Kilisenin sayısal modellenmesi

Sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan iki boyutlu (2D) yazılım RS2 (Rocscience, 2020) kullanılmıştır. Bu amaç için yapıyı karakterize edecek şekilde farklı yönlerde üç adet kesit hattı belirlenmiştir (Şekil 4). Söz konusu kesit hatları 1-1', 3-3' ve 5-5' olarak adlandırılmış olup 1-1' doğu-batı yönündeyken diğer kesit hatları kuzey-güney yönündedir. 3-3' kesit hattı Naos ile Apsis arasında gözlenen ve yüksek devamlılığa sahip süreksizlik hattına paralel bir konumda yer almaktadır.

Kaya oyma kilise, bölgede yaygın olarak gözlenen volkanosedimenter bir istif içerisinde açılmış olup jeolojik yapının değişimi Şekil 6'da verilen kesitlerde gösterilmiştir. Çizelge 1'de verilen mühendislik parametreleri analizlerde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Analizlerde Hoek-Brown yenilme ölçütü dikkate alınmış olup ağırlıklı olarak ignimbiritlerden oluşan kaya kütlelerinin davranışı elasto-plastik malzeme olarak değerlendirilmiştir. Arazi gerilmeleri ve yerçekiminden kaynaklanan doğal kütle gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur.

“Kaya Oyma Kilise” olarak adlandırılan kaya oyma yapı boyunca 3 farklı kesit analizlerde kullanılmıştır (Şekil 6).

Analizlerde kuru ve statik koşullar göz önünde bulundurulmuş olup sonuçlar maksimum düşey gerilme, toplam deformasyon, dayanım faktörü (strength factor) ve çekme gerilmesi olarak verilmiştir (Şekil 7, 8 ve 9). Sayısal analizlerde sınır koşullarına dikkat edilmiş olup sayısal analiz sonuçlarına ait kesitler görsel olarak düzenlenmiştir. Buna göre, Kesit-1 boyunca elde edilen maksimum gerilmelere kilisenin yan duvarlarında ulaşılmakta olup kilisenin doğusundaki bölümde kaya duvar kalınlığı oldukça azaldığı için gerilmenin 2.00 MPa'a kadar ulaştığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında açıklık etrafında gerilme değerleri 1.00 MPa'ın altındadır. Kilisenin tavan bölümünde (kazı sınırı üzerinde) 0.01 MPa seviyesinde kalan çekme gerilmeleri kazı sınırına yakın bölümde 0.10 MPa'a kadar ulaşabilmektedir (Şekil 7d). Açıklık tavan bölümünde 7.00 mm'ye yaklaşan toplam deformasyonlar hesaplanmıştır. Dayanım faktörü (strength factor) belirli bir seviyedeki malzeme dayanımının, o seviyede etkili olan gerilmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir. Dayanım faktörünün 1'den büyük olması, malzeme dayanımının etkili olan gerilme şartlarından büyük olduğunun ve dolayısıyla bir yenilmenin olmayacağını işaretleri olarak algılanabilir. Buna göre dayanım faktörünün bazı lokasyonlarda kritik sınırın altında olduğu görülmekte olup özellikle Apsis ile doğusunda yer alan kaya oyma bölüm arasındaki et kalınlığının düşük olması en önemli riski oluşturmaktadır. Bu bölümün mutlaka yapı estetiğine uygun şekilde desteklenerek güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca Narteks ile Naos arasındaki geçişin tavan bölümünün de desteklenmesi gerektiği görülmektedir.



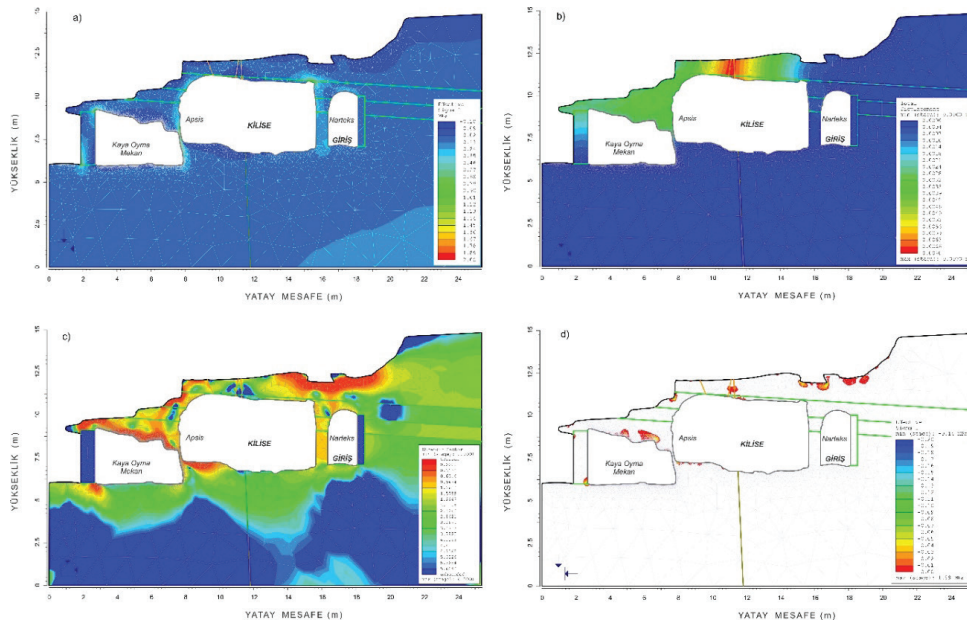
Şekil 6. Kaya oyma kilisenin seçilen kesit hatları için belirlenen mühendislik jeolojisi modelleri.

Figure 6. Engineering geological models for selected sections of the rock hewn church.

Kesit 3-3' kaya oyma kiliseyi kuzey-güney eksenini boyunca Naos ile Apsis arasında kesmekte olup 318/88 yönelimine sahip süreksizliğe paralel bir şekilde konumlanmıştır. Söz konusu kesit kilise ana mekânının güneyinde yer alan kaya oyma yapıları ile ilişkisini de göstermektedir (Şekil 8). Bu kesit hattı için maksimum düşey gerilme 0.75 MPa olarak belirlenmiş olmasına rağmen kesit etrafında hâkim düşey gerilmeler 0.20 ile 0.25 MPa arasında değişmektedir (Şekil 8a). Kilise ana mekânı ile güneyinde yer alan açıklık arasındaki geçişin tavan bölümünde ağırlıklı olarak çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 8d). Çekme gerilmeleri maksimum 1 kPa civarında olup bu bölümler geçici olarak desteklenmiştir. Maksimum 7.2 mm'lik bir toplam deformasyonun hesaplandığı kesit için, deformasyon vektörlerinin dağılımı Şekil 8b'de

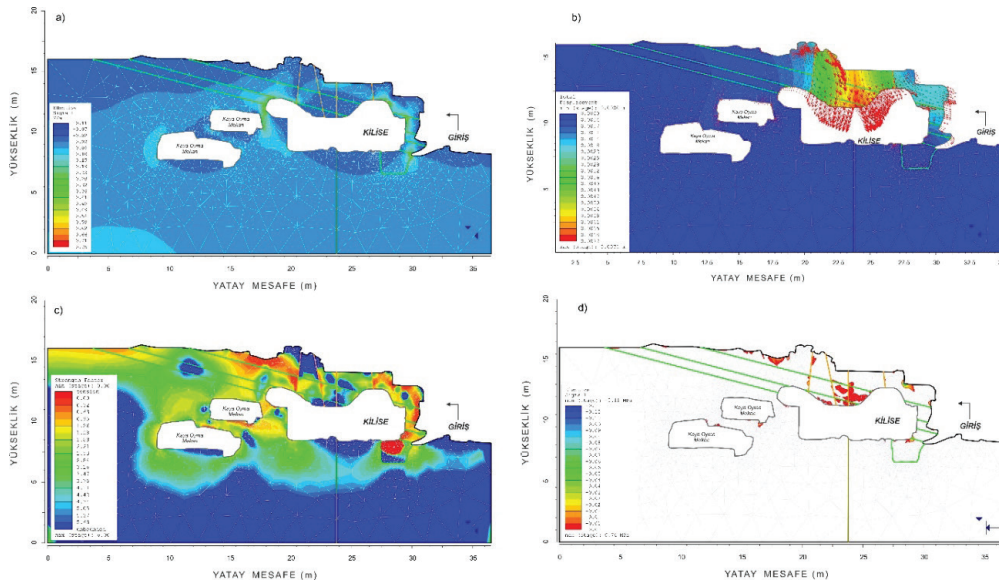
gösterilmiştir. Buna göre kilisenin ana mekânı ile güneyinde yer alan kaya oyma yapıları arasındaki geçiş boyunca deformasyonlar güney ve kuzey yönünde gelişmektedir. Bunun yanında kilisenin ana mekânının kuzey duvarında dayanım faktörü oldukça düşük değerler sunmaktadır (Şekil 8c).

Kaya Oyma Kilisede Naos'un batı bölümü Kesit-5 ile temsil etmekte olup kesitte kilisenin maksimum açıklığı 4.73 m ve yüksekliği 3.80 m'dir. Güneyinde yer alan kaya oyma mekânı ile arasındaki kaya kalınlığı yaklaşık 1.0 metre olup kilise üzerindeki örtü kaya kalınlığı 1.23 m olarak belirlenmiştir. Kesitin temsil ettiği açıklık etrafında maksimum 0.57 MPa gerilme oluşmakta olup (Şekil 9a) açıklık çevresinde genel gerilme dağılımı ise 100 ile 150 kPa arasında değişmektedir.



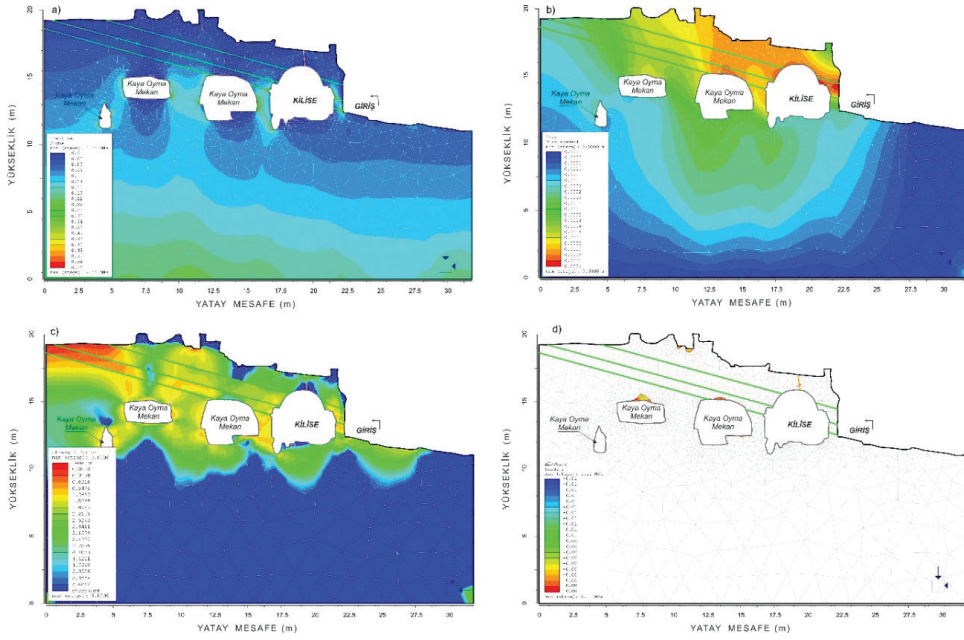
Şekil 7. Kesit -1 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 7. Results of numerical analyses for Section-1 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.



Şekil 8. Kesit -3 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 8. Results of numerical analyses for Section-3 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.



Şekil 9. Kesit -5 için sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme değişimi, b) toplam deformasyon değişimi, c) dayanım faktörü değişimi, d) çekme gerilmesi değişimi.

Figure 9. Results of numerical analyses for Section-5 a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength factor; d) distribution of tensile stress.

Kilisenin ana açıklığı diğer kesitlere göre daha az olduğu için, bu kesit hattı boyunca çekme gerilmeleri çok etkin değildir (Şekil 9d). Ancak kilisenin güneyinde yer alan açıklıkların tavanında sınırlı bir alanda çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Söz konusu bölümde ince-orta tabakalı kumtaşı-marn-kiltaş ardalanmasının gözlemlendiği düşünüldüğünde, oluşacak çekme gerilmelerinin tabaka düzlemleri boyunca kopmalara neden olması beklenmektedir. Maksimum 0.6 mm'lik toplam deformasyon belirlenmiş olup deformasyon vektör yönleri kuzeye doğrudur (Şekil 9). Bunun yanında kilise çevresinde dayanım faktörü sınır değerini (1.0) hemen üzerinde değişim göstermektedir.

At Ahır

Bu bölümde göz önünde bulundurulmuş kaya oyma yapı, ait oldukları dönemde at barınağı

olarak kullanılmış olduğundan “At Ahır” olarak adlandırılmıştır. Şekil 10’da at ahırının Kayaşehir yerleşkesi içindeki konumu ve giriş bölümüne ait genel bir görünüm verilmiştir. Şekil 11’de detaylı planın verildiği açıklık, yaklaşık kuzeydoğu-güneybatı uzanımında olup 34.40 metre uzunluğundadır ve açıklığın genişliği 4.93 ile 6.64 metre arasında değişmektedir. Bunun yanında kaya oyma mekânının açıklık yüksekliği 2.60 ile 3.10 metre arasındadır. Üzerindeki örtü kalınlığı 11.00 ile 12.00 metre arasında değişmekte olup üst bölümde yer alan kaya oyma yapılarının konumu karmaşık geometrileri nedeniyle tam olarak belirlenememiştir. Söz konusu açıklığın stabilitesi planda görüldüğü üzere üç doğal ayak ile sağlanmaya çalışılmış olup doğal ayak aralarındaki mesafeler 8.46 ile 11.40 metre arasında değişmektedir (Şekil 11).



Kayaşehir Temizlik Çalışmaları (2017)

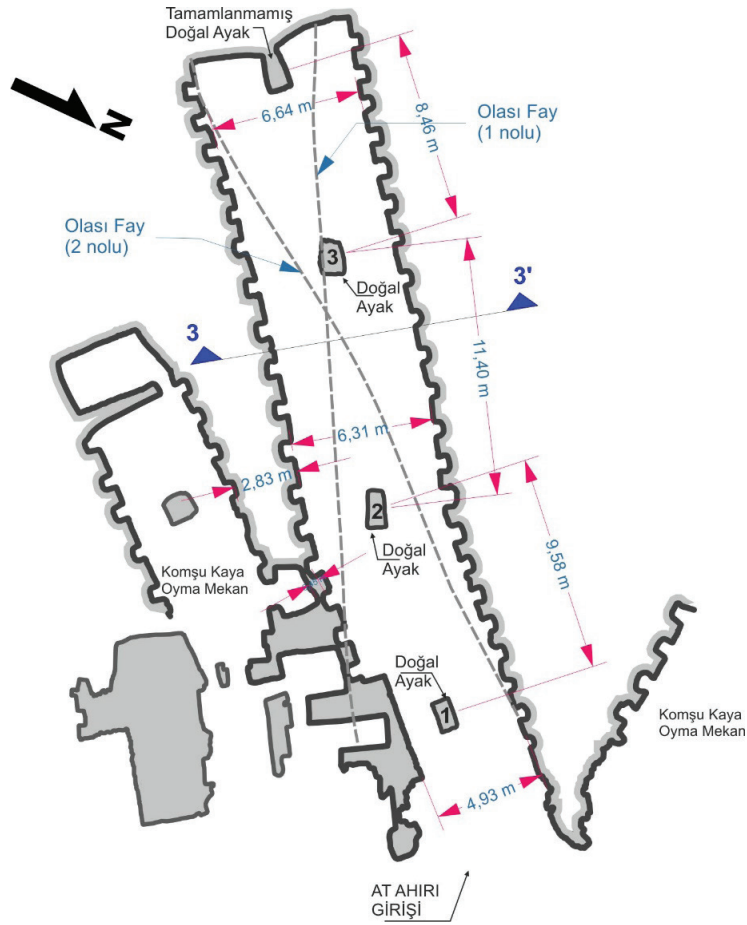
Şekil 10. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapının genel görünümü.

Figure 10. General view of the rock hewn structure named "horse stable".

At ahırının kaya kütle özellikleri

At ahırının bir bölümü tuf-ignimbirit içerisinde açılmasına rağmen, bir kısmında ise kumtaşı, marn ve kilaşı aralanmasından oluşan seviye yer almaktadır (Şekil 12). Kaya oyma mekânın içerisinde keskin jeolojik değişimler gözlenmekte olup bu durum kırık hatları tarafından kontrol edilmektedir (Şekil 12b). Özellikle 1 nolu kırık mekân içerisinde

litolojik sınırı da oluşturmaktadır. 1 nolu kırık hattının kontrol ettiği kumtaşı, marn ve kilaşı aralanması kaya oyma mekânın iç bölümünde sadece kuzey yan duvarda gözlenirken, mekân girişine doğru 1 nolu kırık hattının kontrolünde yapının tavan bölümü de dahil olmak üzere geniş bir bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 12). Kaya oyma yapıyı boydan boya kateden kırık hatları boyunca ayrışma izleri ve küçük ölçekli duraysızlık sorunları gözlenmektedir.



Şekil 11. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapının plan görünümü.

Figure 11. Plan view of the rock hewn structure named "horse stable".

Açıklığın giriş bölümünde yoğun olmak üzere birçok noktada kavlaklanma türü duraysızlıklar gözlenmektedir. Kumtaşı-marn ve kilaşı ardalanmasının oluşturduğu litoloji, bozunma etkisine tuf-ignimbirit seviyelerine göre daha az direnç göstermektedir. Kumtaşı, marn ve kilaşı ardalanmasının mekânın giriş bölümünde yapının tavan bölümünde geniş yayılım sunması, kavlaklanma ve aşırı sökülme problemlerinin daha fazla gözlenmesine neden olmuştur. Aşırı sökülme genelde sedimanter seviyenin tabaka düzlemleri boyunca gerçekleşmektedir (Şekil 12d).

Kaya oyma yapının stabilitesini sağlamak için yapıldığı dönemde üç adet doğal sütun bırakılmıştır. Boyutları düşey yönde değişken olmakla birlikte yaklaşık olarak dikdörtgen (1.20 m x 0.70 m) kesitli olup, yükseklikleri 2.32 ile 2.50 metre arasında değişmektedir. Çevresel faktörler ile tektonizma ve bozunmanın etkisiyle, bırakılan doğal sütunlar zamanla aşınmış olup sisteme yapmış oldukları destek kapasitesinde bir azalma olduğu öngörülmektedir.



Şekil 12. At Ahırı olarak adlandırılan kaya oyma yapının jeolojik yapısı, (a) litolojik değişimlerin görünümü, (b ve c) kırık hatlarının yönelimi, (d) tavan bölümünde bozunma ve duraysızlıklar.

Figure 12. Geological properties of the "horse stable" rock hewn structure, (a) view of lithological variations, (b-c) direction of faults, (d) deterioration and instabilities in the ceiling section.

Önemli bir yapısal problem olarak karşımıza çıkan bu durum özellikle en içte bulunan sütun üzerinde açıkça görülmektedir (Şekil 12c).

İgnimbirit ve volkanosedimanter seviyelerinin kütleli dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesinde Hoek-Brown görgül yenilme ölçütünden (Hoek vd., 2002)

yararlanılmıştır. İgnimbirit ve volkanosedimanter kaya kütleleri için Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre RocData yazılımı ile kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kütleli dayanımı, elastisite modülü ve Hoek-Brown sabitleri olan "mb, s ve a" belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kaya birimlerinin kütleli dayanım ve deformasyon özellikleri (At Ahır).

Table 2. Rock mass strength and deformation properties of the rock units (horse stable).

Birim Adı	m_b	s	a	Kaya Kütleli Çekme Dayanımı (MN/m ²)	Kaya Kütleli Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MN/m ²)	Kütleli Dayanım (MN/m ²)	Elastisite Modülü (MN/m ²)
İgimbirit	2.870	0.020	0.502	0.05	5.00	1.278	1400
Sedimanter S.	2.454	0.009	0.503	0.019	5.00	1.088	1250

At ahırının sayısal modellenmesi

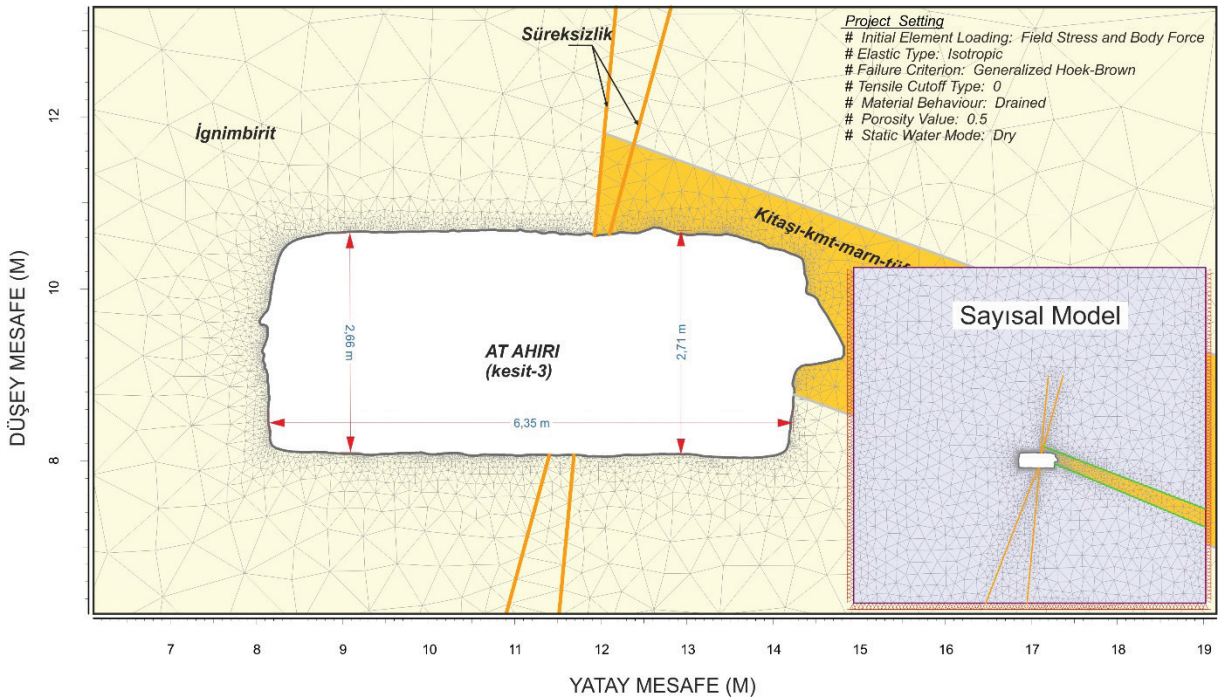
Dinçer vd. (2019) kaya oyma yapıyı 2018 yılında farklı yönlerde 3 adet kesit hattı belirlenmiş ve nümerik olarak incelenmiş olup bu çalışmada Şekil 11'de gösterilen 3-3' kesit hattı boyunca elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Kaya oyma At Ahır, bölgede yaygın olarak gözlenen volkanosedimanter bir istif içerisinde açılmış olup jeolojik yapının değişimi Şekil 13'te verilen kesitte gösterilmiştir. Sayısal analizlerde sınır koşulları dikkate alınmış olup Şekil 13'te verilen model görsel olarak düzenlenmiştir. Analizlerde Hoek-Brown yenilme kriteri dikkate alınmış olup ağırlıklı olarak İgimbiritlerden oluşan kaya kütlelerinin davranışı elasto-plastik malzeme olarak değerlendirilmiştir. Arazi gerilmeleri ve yerçekiminden kaynaklanan doğal kütle gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur (Şekil 13).

Söz konusu kesit hattı kaya oyma yapının orta bölümünü ve her iki kırık hattının yaklaşık kesişim yaptığı bölgeyi temsil etmektedir. Kesitin maksimum yüksekliği 2.66-2.71 metre iken genişliği 6.35 m'dir. Kesitin temsil ettiği açıklık etrafında maksimum 1.30 MPa gerilme oluşmakta olup gerilmeler yan duvarlarda daha etkili olmaktadır (Şekil 14). Açıklık tavanında kırık hattının sol bölümünde geniş bir bölümde çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 14d). Maksimum 0.1 MPa düzeyinde oluşan çekme gerilmeleri, tabakalı yapı sunan volkanosedimanterler içerisinde tabaka düzlemleri boyunca kopmalara

neden olması beklenmektedir. Bunun yanında çekme gerilmelerinin olduğu bölümde maksimum 3.0 mm'lik bir toplam deformasyon miktarı belirlenmiştir. Kesit boyunca dayanım faktörü çekme gerilmelerinin olduğu bölümde kritik sınırın altına inmekte (Şekil 14c) olup bu bölümde kaya kütle yenilmeleri olasıdır.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada birbiriyle bir şekilde ilişkisi olan yüzlerce kaya oyma yapının bulunduğu tarihi ve kültürel miras alanında yer alan iki farklı kaya oyma yapıda gözlenmesi muhtemel mühendislik jeolojisi kökenli duraysızlıklar ve bunların sayısal analizleri irdelenmiştir. Kapadokya Bölgesi'nde genel olarak kaya oyma mekânlarda meydana gelen duraysızlıklar düşük kaya kütle kalitesi, bozunma ve süreksizliklerin kontrolünde gerçekleşmektedir. Ulusay vd. (2006) ve Akın vd. (2020) tarafından kayadan oyma yapılarda gözlenen kaya kütle duraysızlık problemleri tavadan blok düşmesi, aşırı sökülme, eğilme, pullanma, doğal ayaklarda bozunma ve makaslama yenilmesi, tavan kalınlığının azalması, açıklık girişlerindeki kaya düşmesi, mevcut destek sistemlerinde zayıflama ve düşük kaya kütle kalitesi olarak ifade edilmiştir (Şekil 15).

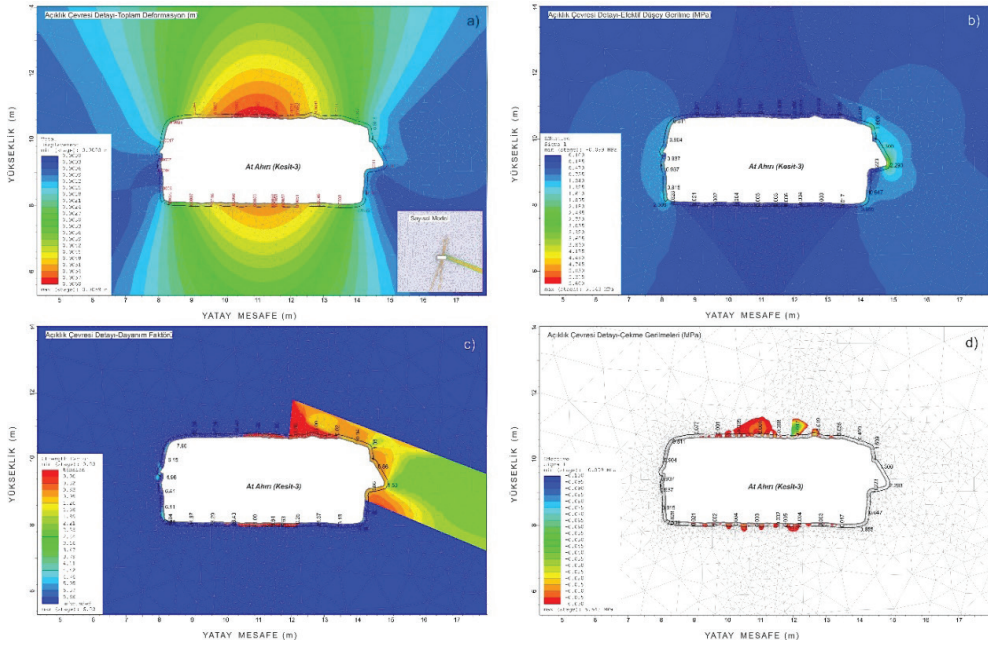


Şekil 13. At Ahır olarak adlandırılan kaya oyma yapıda Kesit-3 için açıklık etrafındaki detay mühendislik jeolojisi modeli.

Figure 13. Detailed engineering geological model for the section-3 of the "horse stable" rock hewn structure.

Tavandan blok düşmesi, kaya oyma yapının yer aldığı kaya kütesini kesen süreksizlik düzlemleri sınırlandırdığı kaya bloklarının yerçekimi etkisiyle süreksizlik kesişim düzlemleri boyunca düşmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Yatay veya yataya yakın tabakalanma stabilite açısından tehlikeli durumların oluşmasına, diğer bir ifadeyle tavan bölümünde aşırı sökülmelere neden olabilir. Bu durum duraysız bloğu diğer blokların takip etmesi sonucu oldukça geniş çaplı duraysızlık problemlerine neden olabilmektedir. Kayaşehir'in bulunduğu bölgede ignimbirit seviyelerinin kalınlıkları çok değişken olmakla birlikte, zaman zaman bu seviyeler arasında ince sedimanter ve tüf seviyeleri ortam koşullarına bağlı olarak ara katman olarak yer alabilmektedir.

Ardalanmalı bir yapıya sahip olan bu tür kaya ortamları içerisinde yer alan kaya oyma yapılarında aşırı sökülme önemli bir duraysızlık türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında ince tabakalar içerisinde açılmış olan kaya oyma yapılarında, tabakalar yavaş bir şekilde boşluğa doğru hareket eder. Kaya, açıklığı çevreleyen kaya kütesinden tamamen ayrılmaya meydan gelen deformasyon kayaç içerisinde kırıklara ve oyuntulara neden olabilir. Ulusay vd. (2006) tarafından eğilme olarak tanımlanan bu sürecin devam etmesi durumunda, eğilme direnci aşılar ve kaya malzemesi ait olduğu küteden ayrılarak bir takım duraysızlıklara neden olabilmektedir. Bölgede kayadan oyma yapıların açıldığı ortamlar zayıf kaya kütesi özelliğinde olup bozunmaya karşı oldukça duyarlıdır.

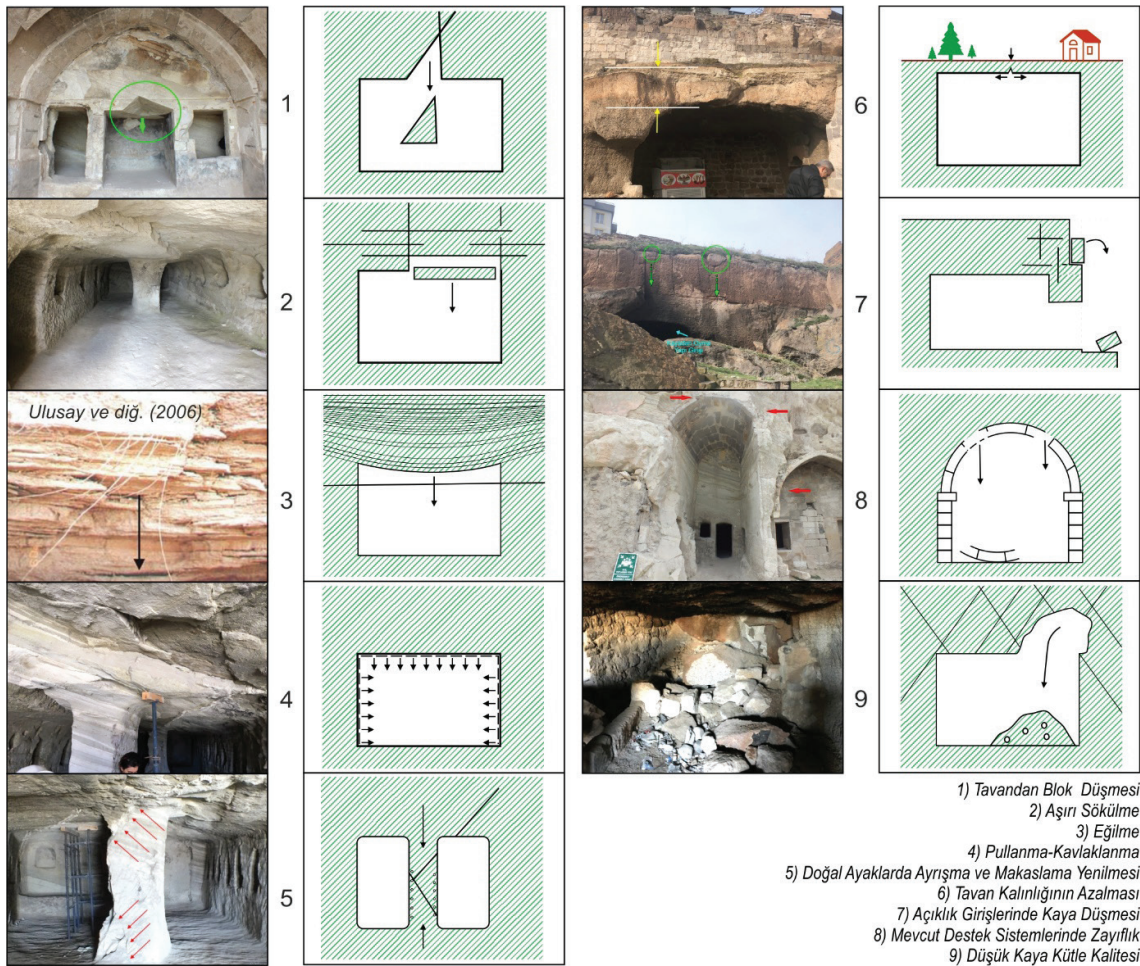


Şekil 14. At Ahırını olarak adlandırılan kaya oyma yapının kesit-3 boyunca elde edilen sayısal analiz sonuçları a) düşey gerilme dağılımı, b) toplam deformasyon dağılımı, c) dayanım faktörü dağılımı, d) çekme gerilmesi dağılımı.

Figure 14. Results of numerical analyses for Section-3 of the "horse stable" rock hewn structure a) vertical stress distribution, b) total deformation distribution, c) distribution of strength, d) distribution of tensile stress.

Kaya oyma yapılarda kaya kütle kalitesinin zayıflamasına dönüşecek olan bozunmanın en önemli işareti ise pullanma ve kavlaklanmadır. Bölgede geniş yeraltı açıklıklarında stabiliteyi sağlamak amacıyla doğal ayaklar (sütun) bırakılmaktadır. Atmosferik koşulların etkisi altında ve ayrışma sürecine bağlı olarak, söz konusu doğal ayaklar ayrışmaya ve aşınmaya maruz kalmaktadırlar. Bu durum, doğal ayakların açıklığa sağlamış oldukları destek kapasitelerini zamanla kaybetmesiyle sonuçlanabilir. Doğal ayaklardaki bozunmaya bağlı dayanım kayıplarına ek olarak, düşey gerilmelerin bu sütunlar üzerinde yoğunlaşması, doğal ayaklarda makaslama kırıkları oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum "At Ahırını" olarak incelen kaya oyma yapıda açık bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 12).

Kaya oyma yapılarda tavan kaya kalınlığının azalmasına bağlı olarak çekme gerilmesi kırığı ve devamında çökme gibi bazı duraysızlık problemleri de meydana gelebilmektedir. Ayrıca alt-üst ilişkisi olan katlı kaya oyma mekânları arasındaki tavan kalınlığının (döşeme kalınlığı) az olması durumunda da duraysızlık sorunları gelişebilmektedir. Bazı kaya oyma yapılarında bulunduğu kaya kütlelerinde duraysızlık açısından herhangi bir problem olmamasına rağmen, açıklık girişlerinden daha yüksek kotlarında yer alan bazı bloklar düşme riski taşıyabilmektedir. Bu durum Kayaşehir açısından oldukça önemli bir problemdir. Daha detaylı açıklamak gerekirse, Kayaşehir'i oluşturan kaya oyma yapılarında daha üst kotlarında yer alan bazalt blokları kaya düşmesi açısından kaynak alan konumunda olup olası kaya düşmeleri hem de ziyaretçileri etkileyebilecek düzeydedir (Şekil 16).



Şekil 15. Kaya oyma yapılarında gözlenen duraysızlık türleri.

Figure 15. Instability types observed in the rock hewn structures.

Bölgede zayıf kaya kütlelerinde açılan boşlukların özellikle girişleri, bazen de iç bölümleri yine çevre kayalardan elde edilmiş olan prizmatik blokların kullanıldığı kemer ve/veya duvar sistemleri ile desteklenmiştir. Kökeni zayıf kaya olan bozunmaya eğilimli prizmatik bloklar da zaman içerisinde bozunarak sağlamış oldukları destek görevini yerine getirememekte ve bunun sonucu olarak bazı stabilite problemleri yaşanabilmektedir. Son olarak bölgede düşük kaya malzemesi dayanımı, çok eklemli, kırıklı, oldukça açık yer yer pürüzsüz

dolgulu süreksizlikler ve nemli koşullar ile temsil edilen düşük kaya kütle kalitesi, tasarım hatalarından bağımsız olarak doğrudan stabilite problemlerinin kaynağı olabilmektedir. Bölgede yaşanan stabilite problemleri göz önünde bulundurulduğunda, Kayaşehir'de bulunan kaya oyma yapılarında tavandan blok düşmesi, aşırı sökülme, tavan kalınlığının azalması, doğal ayaklarda deformasyon, daha üst kotlardan kaya düşmesi ve mevcut destek sistemlerinde zayıflama en önemli duraysızlık türleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 16).



Şekil 16. Kayaşehir’de kaya oyma yapılarda gözlenen stabilite problemlerine ait fotoğraflar.

Figure 16. Photographs showing stability problems in the rock hewn structures of Kayaşehir.

Çoğukültürel ve tarihi varlık kapsamında olan ve genellikle zayıf kaya kütleleri içerisinde açılan kaya oyma yapıların duraylılık incelemesinde veri toplamadaki problemler, kaya kütlelerinde bozunmaya bağlı heterojenlikler ve yeraltı açıklığının çoğunlukla düzensiz geometriye sahip olması ve kaotik alt-üst ilişkileri nedenleriyle bazı zorluklar söz konusu olabilmektedir. Bu bölümde yeraltı açıklıklarının duraylılık değerlendirmelerinde bazı analitik ve sayısal

(sonlu elemanlar) yöntemleri kullanılabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık sınır koşulları ve doğrusal olmayan (non-linear) malzeme davranışı, homojen olmayan malzemeler gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde sistematik bir programlamaya izin verebilir olup mühendisliğin çok geniş bir alanında sınır değer problemlerine uygulanabilmektedir (Berilgen, 1996; Cansız, 2014). Sonlu elemanlar analizleri sonucunda asal gerilmeler, yanal ve düşey

hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı gibi parametreler farklı mühendislik uygulamaları için belirlenmektedir. Kaya oyma yapılar için gözlemsel ve görgül yöntemlerin yanı sıra, bu açıklıklarının etrafındaki asal gerilme dağılımlarının ortaya konması, deformasyon miktarlarının belirlenmesi ve yenilme koşullarının araştırılması gibi amaçlar doğrultusunda sayısal analizler doğru kullanıldığında anlamlı sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen “Kilise” ve “At Ahır” isimli kaya oyma yapılar RS2 (Rocscience, 2020) yazılımı kullanılarak sayısal olarak değerlendirilmiştir. Öncelikle kültürel ve tarihi değeri olan kaya oyma yapılar sistematik bir mimariye sahip olmadığı için iki boyutlu analizlerde çok sayıda kesit boyunca analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu analizlerde özellikle açıklık genişliğinin en küçük olduğu eksene paralel kesitler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanında arazideki jeolojik ve yapısal unsurlar modelde mümkün olduğu kadar yansıtılmalıdır.

Kilisenin içerisinde yer aldığı kaya kütlelerinde keskin litolojik değişim, buna bağlı olarak yan duvarlarında meydana gelen deformasyonlar ve zamanla meydana gelen diğer tahribatlar kilisenin ilksel yapısal özelliklerinin zayıflamasına neden olmuştur. Bu durum kilisenin içerisinde ve dış yüzeyinde açık bir şekilde izlenmektedir. Kilisenin mevcut durumu sonlu elemanlar yöntemine göre sayısal olarak analiz edilmiş olup, yer yer tavan ve incelmış yan duvarlarda çekme gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Ulusay vd. (2013), bölgede yapmış oldukları çalışmada kuru koşullarda tüfler için çekme dayanımının 0.17 ile 0.26 MPa arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu durum ve doymuş koşullarda çekme dayanımındaki olası azalmalar göz önünde bulundurulduğunda, kilisenin

tavanında ve yan duvarlarında (doğu ve kuzey) ilerleyen zamanlarda bir takım yenilmelerin oluşması muhtemeldir. Bundan dolayı kilisenin özellikle kuzey ve doğu duvarlarının güçlendirilmesi kaya oyma kilisenin yapısal bütünlüğünün korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

Sayısal analiz sonuçlarına göre “At Ahır” içerisinde stabilite problemleri açısından riskli olarak işaret edilen bölümde, 2020 yılı içerisinde tavan bölümünde önemli bir kütleli yenilme meydana gelmiştir (Şekil 17). Söz konusu yenilmenin meydana geldiği bölüm, iki ve üç no’lu doğal ayakların arasında ve kırık hatlarının keşiştiği bir alandır. Yenilme gerçekleşmesinden önce yapılan sayısal analizlerde söz konusu tavan bölgesinde çekme gerilmelerinin olduğu belirlenmiş olup, yenilme olasılığı da değerlendirilmiştir. Şekil 17’den görüleceği üzere kaya kütlelerinin kırıklı-çatlaklı olduğu ve tavadaki yenilmenin öncelikle kırık hatları boyunca meydana geldiği dikkati çekmektedir. Bu durum sayısal analizlerde oluşturulan mühendislik jeolojisi modellerinin gerçek koşulları tam olarak yansıttığında oldukça başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sayısal analizler sonucu elde edilen toplam deformasyon değerleri tarihi kaya oyma yapıların uzun süre önce açılmış olmaları göz önünde bulundurulduğunda çok anlamlı olmamakla birlikte, kaya koyma yapının zorlandığı noktaların tespiti açısından önemlidir. Bunun yanında dayanım faktörünün 1.0’ın altında olduğu ve çekme dayanımlarının olduğu bölümler ise kaya oyma yapıların en riskli olduğu bölümleri işaret etmektedir. Bundan dolayı özellikle tavan bölümünde oluşacak çekme gerilmeleri tabakalı litolojilerin bulunduğu kaya kütlelerinde ciddi duraysızlıklara neden olmaktadır.



Şekil 17. At Ahırı olarak adlandırılan kaya oyma yapıda 2020 yılında meydana gelen kaya kütle yenilmesinin genel görünümü

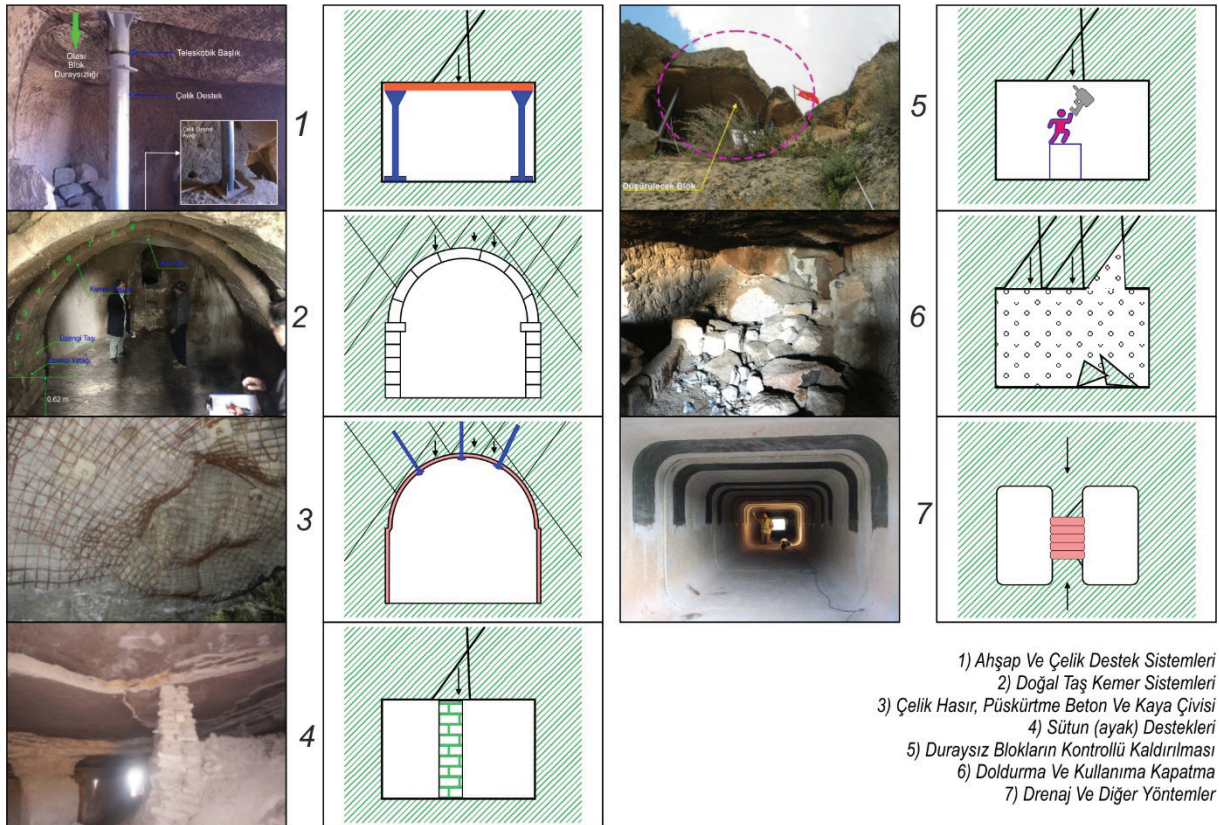
Figure 17. General views of the rock mass failure occurred in 2020 in the rock hewn structure named as (horse stable).

Kaya oyma yapıların doğası gereği sahip oldukları kaotik yapı, içinde yer aldıkları kaya kütlelerinin jeolojik ve mühendislik özellikleri ile birleşince daha riskli ve zor mühendislik koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, söz konusu sahaların çoğu zaman sit alanı olması, olayı daha da karmaşık hale getirmekte ve afeti oluşturan problemlerin alışlagelmiş mühendislik yöntemleriyle çözülmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla kaya oyma yapılarıdaki stabilite problemlerine yönelik iyileştirme yöntemleri geliştirilirken, doğal ve tarihi dokunun mümkün olduğunca korunmasına özen gösterilmelidir. Ulusay vd. (2006) kaya oyma yapılarında hali hazırda kullanılmış olan ahşap

kirişler, prizmatik daha sert doğal kayalardan imal edilmiş sütunlar, düşen ve riskli blokların kaldırılması ve doğal sütunların güçlendirilmesi gibi iyileştirme yöntemleri önermişlerdir. Ahşap ve çelik destek sistemleri, doğal taş kemer sistemleri, çelik hasır, püskürtme beton ve kaya çivisi, sütun (ayak) destekleri, duraysız blokların kontrollü kaldırılması, doldurma ve kullanıma kapatma ve drenaj ve diğer yöntemler olarak kaya oyma yapılarında kullanılabilecek iyileştirme yöntemlerini sınıflamışlardır (Şekil 18). Çelik hasır, püskürtme beton ve kaya çivisi gibi sistemlerin düzensiz bir kesit geometrisine sahip, zaman zaman da karmaşık bir yapıya sahip olan tarihi kaya oyma yapıların desteklenmesinde

uygulanmasında dikkatli olunmalıdır. Tarihi ve kültürel öneme sahip ve sit alanı içerisinde yer alan yeraltı açıklıklarında, tarihi dokuyu doğrudan etkilemesi açısından bu sistemlerin uygulanması uygun görülmemelidir. Aynı şekilde Ulusay vd. (2006) çelik hasır, püskürtme beton ve bulonlama ile ilgili bazı çekincelerini belirtmiştir. Öncelikle söz konusu sistemlerin estetik açıdan uygun olmayacağını belirtmişlerdir. Bunun yanında püskürtme beton ile kaya arasında yetersiz bağlanmanın sorun olacağını ve tüfler gibi yumuşak ve aşınmaya eğilimli kaya kütlelerinde bulonlama uygulanması ve performansının tartışmalı olduğunu ifade etmişlerdir.

Yukarıdaki açıklamalardan görüleceği üzere tarihi ve kültürel değeri olan kaya oyma yapıların yeniden kullanıma kazandırılması ve bu benzeri amaca yönelik çalışmalarda kullanılacak ıslah yöntemlerini belirlemede estetik, tarihi ve doğal dokuya uygunluk, yasal zorunluluklar gibi mühendislik ölçütlerin dışında birçok faktörün etkili olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu tür çalışmalarda arkeolog, sanat tarihçi, mimar, restoratör ve yetkin mühendisler vb. gibi disiplinlerin de içinde bulunduğu bir grup tarafından değerlendirilip karar verilmesi önerilmektedir.



Şekil 18. Tarihi kaya oyma yapılarda uygulanabilecek destek sistemleri

Figure 18. Support systems that can be applied in historical rock-hewn structures

KATKI BELİRTME

Yazarlar, bu çalışmada her türlü verinin sağlanması ve gerçekleştirilmesi noktasında Nevşehir Belediyesi'ne ve Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K., & Topal, T. (2021). Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. *Engineering Geology*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106001>
- Atabey, E. (1989). MTA Genel Müdürlüğü, 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Kayseri H19 (K33) Paftası, 18 sy.
- Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2003). Geotechnical and geo-environmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 6, 245-272. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00285-5)
- Aydan, Ö., Tano, H., Watanabe, H., Ulusay, R., & Tuncay, E. (2007). A rock mechanics evaluation of antique and modern rock structures in Cappadocia Region of Turkey. In *Proceedings of the symposium on the geology of Cappadocia*, Nigde, 13-23
- Barton, N.R., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Barton N, Bandis S (1980). Some effects of scale on the shear strength of joints. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 17, 69–73. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90009-1)
- Becerir, E. (2020). Nevşehir Kale çevresi kaya mekânların belgelenmesi ve koruma sorunları. (Master's Thesis), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Berilgen, M. (1996) Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi. (Doktora Tezi), YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cansız, B. M. (2014). İksa sistemlerinde köşe etkisinin iki boyutlu sonlu eleman analiz yöntemi ile incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 73 sy
- Deniz, B. E., ve Topal. (2021). A new durability assessment method of the tuffs used in some historical buildings of Cappadocia (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 266. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09546-1>
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2015). Rock mass instabilities in Tatlarin Underground City (Cappadocia-Turkey). In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8: Preservation of Cultural Heritage* (pp. 361-365). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_63
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82, 1075-1098. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2234-z>
- Dinçer, İ., Akın, M., & Orhan, A. (2019). Kaya oyma yapıların sayısal yöntemlerle modellenmesi: Nevşehir yeraltı şehri örneği. *International Symposium On Advanced Engineering Technologies*, Kahramanmaraş, Türkiye, 139-144
- Dinçer, İ., Akın, M., Orhan, A., & Duru, C. (2020). Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 131-156. <https://doi.org/10.24232/jmd.826934>
- Erguler, Z. A. (2007). Investigation of the effect of water content on engineering behavior of the clay-bearing rocks. Ph. D. Thesis (in Turkish), 225.
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2007). Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration resistance. In *ISRM Congress (ISRM-11 CONGRESS)*.
- Erguvanlı, A. K., & Yüzer, A. E. (1977) Past and present use of underground openings excavated

- in volcanic tuffs at Cappadocia area, Rock Storage, Oslo, 15-17. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8406-4.50011-7>
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, 1, 267-273
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- Kaşmer, Ö., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013). Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey). *Engineering geology*, 158, 135-158. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.010>
- Margottini, C. (2015). Engineering geology in shaping and preserving the historic urban landscapes and cultural heritage: Achievements in UNESCO World Heritage Sites. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8: Preservation of Cultural Heritage* (pp. 1-28). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09408-3_1
- Maruto. (2006). Penetrometer for Soft Rock: Model SH-70 Instruction Manual. Tokyo, Japan.
- Rocscience. (2020). RS2 finite element analysis for excavations and slopes. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada
- Rocscience. (2022). RSData Strength and Stress Analysis Software. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada
- Stimpson, B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 18, 63-65. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90266-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90266-7)
- Sonmez, H., Ulusay, R. (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri (Earth Sciences)*, 26, 77-99
- Sülükçü, S., 2019. Kapadokya Bölgesi'ndeki kayadan oyma yeraltı depolarının duraylılığının değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
- Topal, T., ve Doyuran, V. (1997). Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff. *Engineering Geology*, 47(1-2), 175-187. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00017-3)
- Topal, T., ve Doyuran, V. (1998). Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey. *Environmental geology (Berlin)*, 34(1), 5-20. <https://doi.org/10.1007/s002540050252>
- Tunusluoglu, M. C., & Zorlu, K. (2009). Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental geology*, 56, 963-972. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1198-z>
- Ulusay, R., & Erguler, Z. A. (2012). Needle penetration test: evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks. *Engineering geology*, 149, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.08.007>
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Erguler, Z. A., Ngan-Tillard, D. J., Seiki, T., Verwaal, W., & Sato, A. (2015). ISRM suggested method for the needle penetration test. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014, 143-155. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Geniş, M., & Tano, H. (2013). Stability assessment of Avanos underground congress centre (Cappadocia, Turkey) in soft tuffs through an integrated scheme of rock engineering methods. *Rock mechanics and rock engineering*, 46, 1303-1321. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0363-6>
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z A., ve Kasmer, Ö. (2006). Assessment of environmental and engineering

geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Ürgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology*, 50(4), 473-494. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0222-4>

Yılmaz, I. (1995). Engineering geologic factors in the design of a large underground structure in a tuff sequence in Cappadocia. *Engineering Geology*, 40(3-4), 235-241. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00057-7](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00057-7)

Araştırma Makalesi / Research Article

Agrega Madenciliğinde Çevresel Etkilerin Yaşam Döngüsü Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi: Cebeci Agregası Ocakları Örneği

Assessment of Environmental Impacts of Aggregate Mining with the Life Cycle Approach: an Example of Cebeci Aggregate Quarries

Nil VURAL^{1*} , Murat YILMAZ¹ , Burcu ONAT² , Atiye TUĞRUL¹ , Burcu UZUN AYVAZ² 

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34320 Büyükçekmece/İstanbul

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar/İstanbul

Geliş (Received): 12.09.2024 / Düzeltme (Revised): 8.10.2024 / Kabul (Accepted): 17.10.2024

ÖZ

Günümüzde madencilik ve sürdürülebilirlik konusuna yönelik küresel ilgi giderek artmakta, bu da madencilik endüstrisinin daha sürdürülebilir bir yapıya dönüştürülmesi gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Bu süreçte sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesi ve çevresel etkilerin en aza indirgenmesi büyük önem taşımaktadır. Agregası, beton ve asfalt üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırma taş gibi doğal yapı malzemelerinin genel adıdır. Bir ülkenin yapısal büyüme ve gelişimi, artan nüfusu ile endüstriyel ve altyapı yatırımlarının gerekliliği, agregayı Dünya çapında zorunlu stratejik hammaddelerden biri haline getirmektedir. Bu çalışmanın amacı, İstanbul ili Sultangazi ilçesi Cebeci Köyünde yer alan, kumtaşı ve kireçtaşlarının agregası olarak üretildiği taş ocaklarındaki madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerini değerlendirmektir. Bu kapsamda, ilk olarak kumtaşları ve kireçtaşlarının üretildiği taş ocakları ve yakın çevresinin jeolojisi incelenmiştir. Daha sonra, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yöntemi kullanılarak, fonksiyonel birim olarak 1 ton agregası üretimi kabul edilmiş ve agregası ocaklarındaki faaliyetler sisteme dahil edilmiştir. Bu faaliyetler; kazı ve patlatma, yükleme ve taşıma, kırma ve eleme ile stok sahasına nakliyyeyi kapsamaktadır. YDD analizi GaBi Education yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; kumtaşı ve kireçtaşı agregası ocak faaliyetleri küresel ısınma potansiyeli değerlerinin 1,98 ile 2,30 kg CO₂ eşd./ton agregası arasında değiştiği tespit edilmiştir. Madencilik faaliyetlerinde kullanılan ağır iş makineleri ve ekipmanların yüksek enerji ihtiyacını karşılamak için temin edilen elektrik ve kullanılan dizel yakıtın küresel ısınma potansiyelini arttıran en önemli unsurlar olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Agregası madenciliği, kumtaşı, kireçtaşı, yaşam döngüsü değerlendirilmesi, çevresel etki.

ABSTRACT

Global interest in mining and sustainability is steadily increasing in the present day, bringing the necessity of transforming the mining industry into a more sustainable form to the fore. During this process, adopting sustainable practices and minimizing environmental impacts have great importance. Aggregate is the general name for natural materials such as sand, gravel, and crushed stone used in the production of concrete and asphalt. The structural growth and development of a country, increasing population, and the needs of industrial and infrastructure investments make aggregate a mandatory strategic natural raw material worldwide. The purpose of this study is to evaluate the environmental impacts of mining activities at quarries located in Cebeci village, Sultangazi district, Istanbul,

where sandstone and limestone are produced as aggregate. In this context, firstly, the geology of the quarries where sandstone and limestone are produced, along with their surrounding areas, was examined. Then, using the life cycle assessment (LCA) method, 1 ton of aggregate production was accepted as the functional unit and the activities in the aggregate quarries were included in the system. These activities include excavation and blasting, loading and transportation, crushing and sieving, and transportation to the stockpile. LCA analysis was carried out using GaBi Education software. The global warming potential values of sandstone and limestone aggregate quarry activities ranged between 1.98 and 2.30 kg CO₂ eq./ton aggregate. The most significant contributors to the increase in global warming potential were the electricity required to meet the high energy demands of heavy machinery and equipment used in mining activities and the diesel fuel consumed.

Keywords: Aggregate mining, sandstone limestone, life cycle assessment, environmental impact

GİRİŞ

Doğal agregada, en yaygın yapı malzemesi olup yapılarda, hazır beton ve prekast beton üretiminde, yol kaplamalarında, asfalt üretiminde, demiryolu balastında, harç üretiminde, liman yapımında ve bakımında, çimento ve kireç üretiminde kullanılmaktadır (Wilburn ve Goonan 1998; Gonçalves vd., 2007). Gelecekte, yeni konut projeleri, deprem riski karşısında kentsel dönüşüm süreçleri ve yüksek kaliteli agregada gerektiren büyük mühendislik projeleri gündemde olduğu için, büyük şehirlerde (İstanbul gibi) yüksek miktarda agregada ihtiyacı olacaktır (Yıldız, 2021).

Agregada, üretim ve taşınmasıyla ilgili tüm çevresel ve sosyal baskılara rağmen, temel inşaat hammaddeleri arasında yer almaktadır. Bir taş ocağında hammadde işleme sırasında gerçekleştirilen faaliyetler, küresel ısınma, hava kirliliği, su tüketimi ve biyoçeşitlilik kaybı gibi çeşitli çevresel etkilere yol açabilir. Günümüzde agregada üretimi açık ocak işletmeciliği ile gerçekleştirilmekte olup bu süreçte önemli miktarda toz emisyonu meydana gelmektedir. Agregada ocaklarında en fazla toz oluşturan süreç, kırma ve elemedir. Delme ve patlatma da toz emisyonlarına neden olur, ancak genellikle kırma ve eleme ile karşılaştırıldığında bu etkiler önemsiz kabul edilir (Petavratzi vd., 2005).

Türkiye’de agregada üretimi üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, agregada ocaklarının çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Başçetin vd. (2017), ağırlıklı olarak kumtaşından oluşan Cendere ocağındaki CO₂-e emisyonu ve enerji hesaplamalarında kullanılan yöntemleri analiz etmiştir. CO₂-e emisyonunu tahmin etmek için agregaların yoğunluk ve tek eksenli basınç dayanımı (UCS) verilerini kullanmışlardır. UCS değerlerinin arttığı yerlerde, birim CO₂-e değerlerinin de arttığını ve taş ocaklarında dizel yakıt tüketiminin toplam CO₂ emisyonlarının %88’ini oluşturduğunu, elektrik tüketiminin ise %12’lik bir katkıda bulunduğunu göstermişlerdir.

Çevreye olan duyarlılığın artması ile sürdürülebilirliğin önemi de artmaktadır. Teknoloji ve yaşam düzeylerindeki gelişmeler sonucunda her tür projenin maliyeti, doğal kaynakların kullanımı ve küresel anlamda çevre sorunlarına yol açma olasılığı gibi faktörler daha sık olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan enerji üretim maliyetleri ve talepleri, enerji güvenliği, yakın gelecekte fosil enerji kaynaklarının tükenebileceğinin tahmin edilmesi, küresel ısınma ve sera gazı emisyonları gibi problemlerden dolayı ülkeler bazı ekonomik, sosyal, çevresel önlemler almak ve politikalarını bu doğrultuda belirlemek zorunda kalmıştır. Avrupa Birliği (AB), 11 Aralık 2019 tarihinde açıkladığı Yeşil Mutabakat ile 2050 yılında iklim-nötr ilk kıta olma hedefini ortaya koyarken; aynı

zamanda sanayisinin dönüşümünü gerektiren yeni bir büyüme stratejisi benimseyeceğini ve tüm politikalarını iklim değişikliği ekseninde yeniden şekillendireceğini açıklamıştır.

Endüstriyel karar verme ve üretim yöntemi belirleme süreçlerinde Dünya genelinde küresel ısınma ve sürdürülebilirliği dikkate alan yöntemler ön plandadır. Bu yaklaşıma sahip yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) uygulamaları ise maden endüstrisinde oldukça sınırlıdır. YDD farkındalığının olmaması, fonksiyonel birim ve ürün tanımlamanın zorlukları sistemlerin kapsamının belirlenmesi, uygun etki kategorilerinin tanımlanması ve belirsizlik ve duyarlılık analizini çevreleyen konular, endüstride kabul edilebilirliğinin yaygın olmamasının olası nedenleri olarak sunulmaktadır (Awuah-Offei ve Adekpedjou, 2011).

Tüm endüstriyel süreçlerde yoğun olarak tüketilen madencilik ürünlerine rağmen, agrega madencilik sistemlerinin ve teknolojisinin değerlendirilmesine yönelik literatürde sınırlı sayıda doğal agrega madenciliği YDD uygulaması çalışması bulunmaktadır. Korre ve Durucan (2009), hazırladıkları raporda, agregaların üretimi ve kullanımıyla ilişkili çeşitli çevresel etkileri incelemiş ve agregaların yaşam döngüsü boyunca sera gazı emisyonlarına ve kaynak tüketimine katkıda bulunan temel faktörleri vurgulamıştır.

Bendouma vd. (2020), Cezayir’de beş agrega ocağı için bir ton agreganın “beşikten kapıya” YDD modelini gerçekleştirerek çevresel etkisini karşılaştırmışlardır. Kittipongvises (2017) tarafından yürütülen çalışmada Tayland’da kireçtaşı ocağında YDD yaklaşımı kullanılmıştır ve çevresel etkilerin ana nedenlerinin madencilik faaliyetlerinde dizel yakıt ve elektrik kullanımı olduğu belirtilmiştir. Fransa’da, Jullien vd. (2012), üç farklı ocakta 1 ton ince ve iri doğal agrega için YDD metodolojisi ile enerji tüketimini

ve atmosferik emisyonları analiz etmiş ve ince agregaların enerji tüketimi açısından büyük etkilere sahip olduğunu ve patlayıcı kullanımının toplam çevresel etki üzerinde %1’den daha az bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. De Bortoli (2023) Quebec’te doğal agrega üzerinde YDD modeli geliştirerek önceki doğal agrega YDD çalışmalarındaki temel eksiklikleri ve tutarsızlıkları vurgulamak için detaylı bir literatür incelemesi sunmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, Kuzey Cebeci kumtaşı ve Güney Cebeci kireçtaşı agrega ocaklarındaki madencilik faaliyetlerinin YDD metodolojisi ile analiz etmek ve bu süreçlerin çevresel etkilerini azaltmaya katkıda bulunarak hem agrega üretiminde hem de çevresel açıdan daha verimli hale getirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla, 1 ton kumtaşı ve kireçtaşı agrega üretiminin çevresel etkilerinin belirlenmesi için CML 2001 ve EN 15804+A2 yöntemleri kullanılmış, her iki etki kategorisine ait sonuçlar incelenmiştir. Bu yöntemler, çevresel etkilerin kapsamlı bir değerlendirilmesini sağlayarak, farklı etki kategorilerinde ortaya çıkan çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak analiz etmeye olanak tanımıştır.

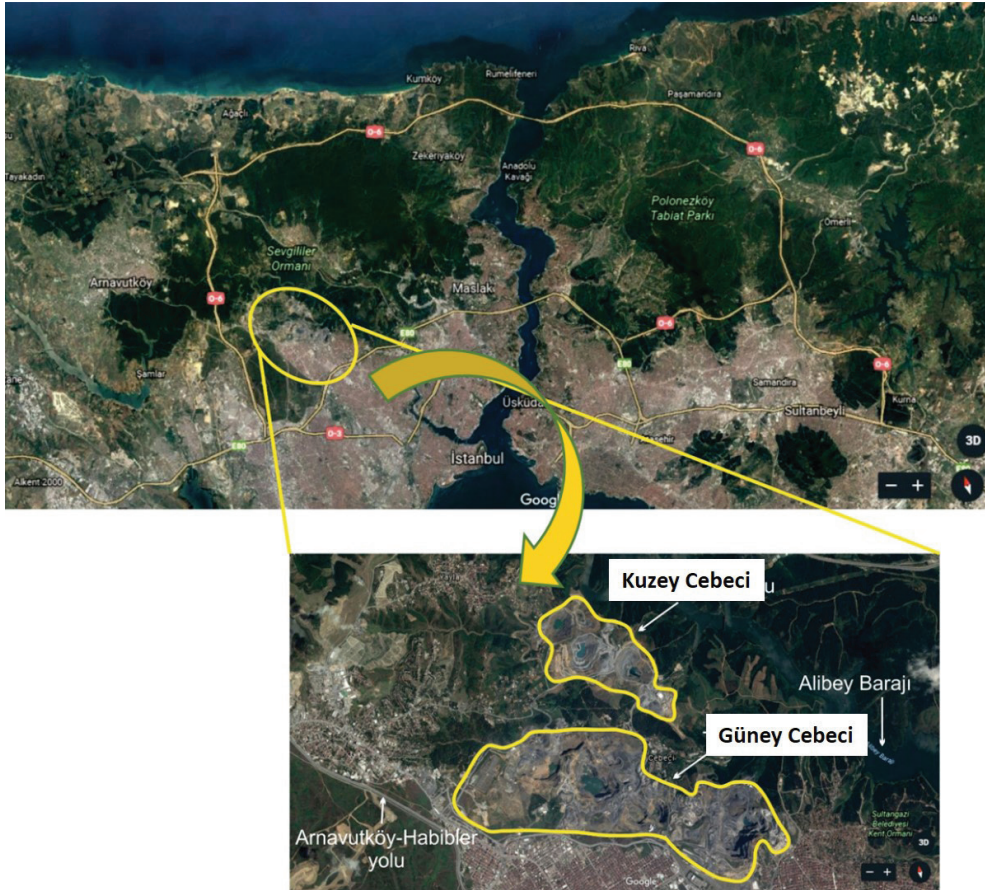
İNCELEME ALANININ TANITIMI

Cebeci agrega ocakları bölgesinde yer alan Kuzey Cebeci ve Güney Cebeci agrega ocakları İstanbul ili, Sultangazi ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Bölgenin kuzeyinde devlet ormanı, doğusunda Alibeyköy Barajı, kuzeydoğusunda Hasdal-Kemberburgaz Yolu, güneyinde Sultangazi İlçesi, batısında ise Arnavutköy-Habipler yolu ve yerleşim yerleri bulunmaktadır (Şekil 1). Cebeci agrega ocakları bölgesinde Trakya Formasyonu’na ait kumtaşı-şeyl ve bu formasyona ait Cebeciköy kireçtaşı üyesinden agrega üretimi yapılmaktadır.

Bölgede çeşitli proje ve sektörler için önemli miktarda agrega üretimi yapılmaktadır. Cebeci agrega ocakları bölgesi hava kirliliği ve gürültü kirliliği gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu çevresel problemler, Cebeci agrega ocağı bölgesinde üretimin sınırlandırılmasına yol açmıştır. Toz, Cebeci agrega ocağı bölgesindeki en önemli çevresel problemdir ve toz oluşumunu azaltmak amacıyla malzeme çıkarımı, kırma-eleme ve taşıma gibi tüm faaliyetler ocak alanında kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

Cebeci agrega ocağı bölgesi, farklı kaya türlerine sahip iki ocağın oluşmaktadır (Şekil 1). Kuzey ocağı ağırlıklı olarak kumtaşı rezervine

sahipken, güney ocağı kireçtaşı rezervine sahiptir. Agregada üretimi, diğer tüm yüzey madenciliği faaliyetlerine benzer şekilde kazı, delme, patlatma, kırma, eleme ve gerektiğinde yıkama süreçlerini de içerir. Kumtaşından kırma eleme sonrası elde edilen iri agrega beton ve asfalt üretiminde kullanılırken, ince fraksiyonun kil içermesi nedeniyle beton ve asfalt üretiminde kullanılabilmesi için yıkama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Kireçtaşının aşındırıcı özelliğinin kumtaşına oranla düşük olması, kil içermemeleri ve kolay kırılmaları gibi nedenlerle yüksek kapasiteli sekonder ve tersiyer darbeli kırıcılar kullanılmaktadır (Tuğrul vd., 2018).



Şekil 1. İnceleme alanının coğrafi konumu

Figure 1. Geographical location of the study area

İNCELEME ALANININ GENEL JEOLJİSİ

Cebeci agrega ocakları bölgesi, İstanbul Paleozoyik istifine ait Trakya Formasyonu'nun yayılım sunduğu alanlar üzerinde yer almaktadır. Cebeci Bölgesi'nde en altta, Karbonifer yaşlı kumtaşı ve şeyllerden oluşan Trakya Formasyonu yer almaktadır. Bu formasyonun içerisinde Cebeciköy kireçtaşı üyesi ayırt edilmiştir. Trakya Formasyonu'nu uyumsuz olarak örten kil ara seviyeli, çakıl, kum, tabanda yer yer çapraz tabakalı kumtaşlarından oluşan, kalınlığı 10-20 m aralığında olan Belgrad Formasyonu Kırışık üyesi bulunmaktadır (Gözübol ve Aysal, 2008) (Şekil 2). Bölgenin en genç çökeli Kuvaterner yaşlı alüvyon olup güncel dere yataklarında görülmektedir.

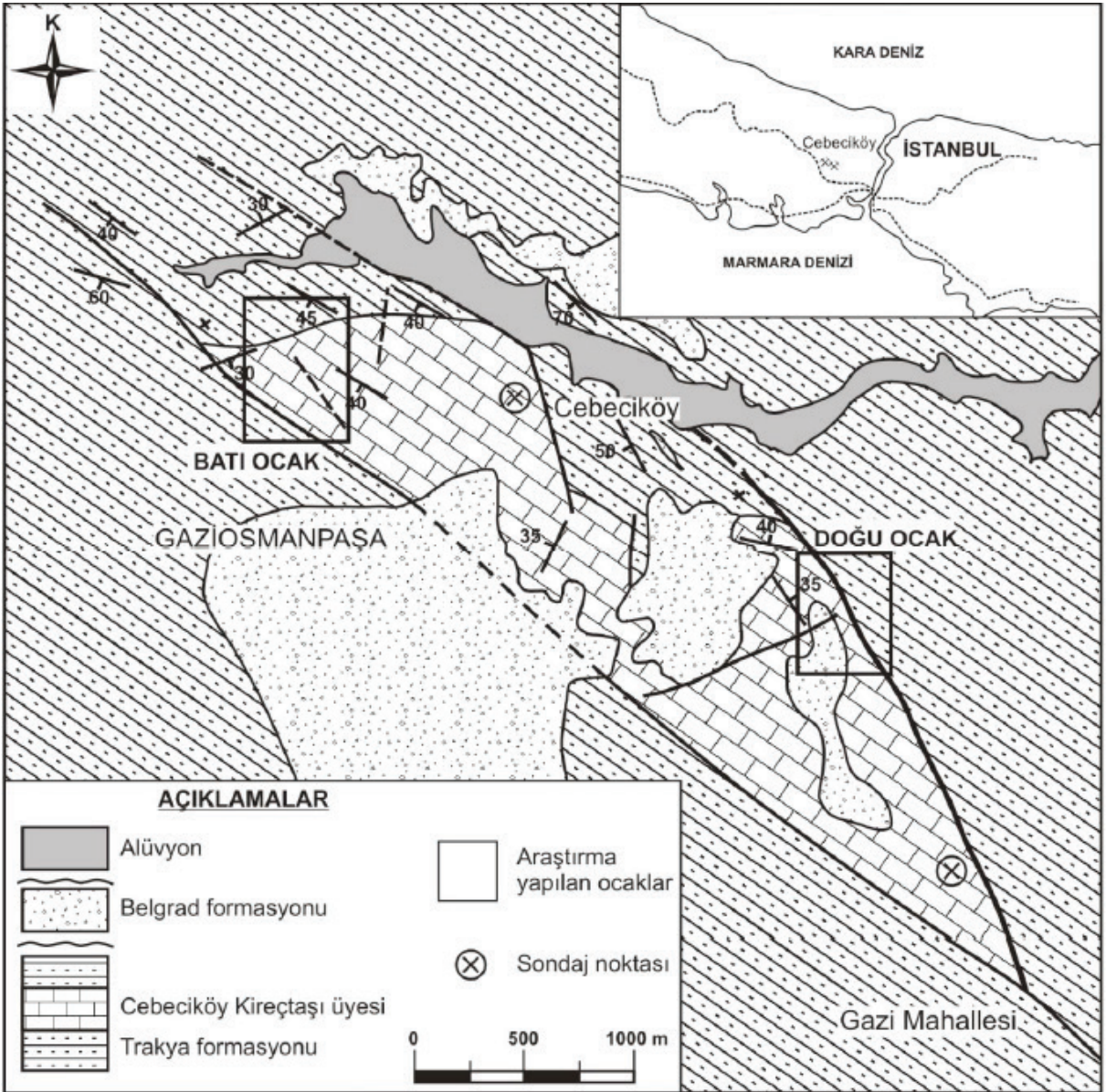
Kuzey Ocak Alanında yayılım sunan Trakya Formasyonu, değişik boyutlardaki şeyl-grovak araldanmalarından oluşmaktadır (Şekil 3). Formasyon büyük oranda şeyl ve az olarak da polijenik konglomera, kalkerli şeyl, kireçtaşı, kuvars-çakıltaşı ve kuvars-kumtaşından oluşmaktadır. Şeyller, genellikle koyu gri ve yeşilimsi gri, sarımsı gri, yersel olarak soluk kırmızı pembe ayrışma renklidir. Şeyl içinde çok ince laminalı siltaşından çok kaba çakıltaşlarına kadar türbidityik oluşuklar bulunur (Tuğrul vd., 2018). Çakıltaşları açık yeşilimsi gri ve grimsi sarı ile soluk kahverengi arasında ayrışma renkli, polijenik, çok kötü ile orta arası boylanmıştır. Bileşenleri oluşturan taneler çok ince çakılcıkla ufak-blok arasında, yarı yuvarlaklaşmış beyaz kuvars, metakuvarsit, koyu renkli çört, lidit, iyi yuvarlaklaşmış mikaşist, fillit; şeyl, grovak ve kireçtaşıdır. Trakya Formasyonu lidit çakılcıklı konglomera ile başlar, bol bitkisel kalıntı, artan kumtaşı ve azalan karbonat oranı ile sonlanır (Kaya, 1971).

Trakya formasyonu içerisindeki Cebeciköy kireçtaşları gri-siyah, sert ve kırılması zor,

kalın masif tabakalı yaygın sparit damarlıdır. Cebeciköy civarındaki kireçtaşı mostraları yaklaşık 1 km genişliğinde, 3,5 km uzunluğunda KB-GD uzanımındadır. Başlıca kireçtaşı ile az miktarda killi kireçtaşı, karbonatlı şeyl, ikincil dolomit ve ender olarak çörtlerden oluşmaktadır (Gözübol ve Aysal, 2008). Cebeciköy kireçtaşı üyesi gri, siyahımsı gri, mavimsi gri renkli, ince orta-kalın tabakalı yer yer masif kireçtaşlarından oluşur. Birim kireçtaşlarının yanı sıra karbonatlı şeyl, killi kireçtaşı ve kumlu kireçtaşları ile ikincil dolomitik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Dolomitleşmeler yaygın olarak ana fay düzlemelerini takip etmekte olup fay düzlemlerinden uzaklaştıkça dolomitleşme etkisini yitirmektedir (Şekil 4).

MATERYAL VE YÖNTEM

Küresel olarak çevre bilincinin gelişmesiyle, ürün, hizmet ve sistemlerin çevreye olan olumsuz etkilerinin belirlenmesine/tahmin edilmesine yönelik yeni yöntemler ilgi çekmektedir. Araştırmalarla birlikte çeşitli sistemlerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için çeşitli araçlar ve yöntemler geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak, Yaşam Döngüsü Değerlendirme (Life cycle assessment - LCA), Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (Sustainability Assessment), Stratejik Risk Analizi (Strategic Environmental Assessment - SEA), Çevresel Etki Değerlendirme (Environmental Impact Assessment - EIA), Çevresel Risk Değerlendirme (Environmental Risk Assessment - ERA), Entegre Etki Değerlendirme (Integrated Impact Assessment), Maliyet – Fayda analizi (Cost Benefit Analysis - CBA), Malzeme Akış Analizi (Material Flow Analysis - MFA), Ekolojik Ayak İzi (Ecological Footprint), Karbon Ayak İzi (Carbon Footprint) gibi yöntemler verilebilir (Finnveden vd., 2009).



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Gözübol ve Aysal, 2008).

Figure 2. Geological map of the study area and surroundings (Gözübol and Aysal, 2008).

Bu yöntemler arasında olan YDD, bir ürünün üretimi için kullanılan hammaddelerin temininden, kullanımı, kullanım ömrü sonunda işlenmesi, geri dönüşümü ve nihai bertarafına kadar hayatı boyunca (beşikten mezara), çevresel boyutlarını ve olası çevresel etkilerini

(kaynakların kullanımı ve sınımların çevresel sonuçları gibi) inceleyen bir araçtır. YDD metodolojisi, amaç ve kapsam belirlenmesi, envanter analizi, etki analizi ve yorumlama olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır (ISO, 2006a, 2006b).



Şekil 3. Agregası üretilen ve Trakya formasyonuna ait kumtaşılarının genel görünümü.

Figure 3. General view of sandstone within the Trakya formation, from which aggregate is produced.

SİSTEM SINIRI

Madencilikte YDD modeli geliştirmedeki ilk adım, ana sistemin ve YDD modelindeki farklı alt sistemlerin işlevlerinin sistem sınırlarının tanımlanmasını içerir (Durucan vd., 2003). Bu çalışmada, sistem sınırları ‘beşikten kapıya’ olarak tanımlanmış olup madencilik faaliyetleri iş akışı Şekil 3’te sunulmuştur. Ele alınan yaşam döngüsü aşamaları şunlardır (Şekil 5): tüm ham maddelerin üretimi/çıkartılması (A1), ham maddelerin kırma ve eleme tesisine taşınması (A2) ve tesis içindeki kırma ve eleme süreci (A3). Agregası ocağındaki faaliyetler, akışlarla bağlı süreçlerden oluşur. Bu çalışmada, ocaktan faaliyetlerinin akışlarından yola çıkılarak agregası üretiminin çıktıları (output) değerlendirilmektedir.

YDD çalışmalarında süreç birimleri, fonksiyonel birim ile ilişkilendirilmektedir ve tüm değerlendirmeler bu birime göre yapılmaktadır. Bu çalışmada, fonksiyonel birim kumtaşı ve kireçtaşı agregası ocak faaliyetleri için 1 ton agregası üretimi olarak kabul edilmiştir. Kumtaşı agregası üretimi, kireçtaşı agregası üretimine oldukça benzer bir süreç izler. Her iki agregası üretim süreci de kazı, delme, patlatma, kırma ve eleme süreçlerini içerir. Kumtaşı agregası üretiminde, bu adımların yanı sıra yıkama işlemi de yer almaktadır. Sistem sınırında, yıkama işlemi kesikli olarak kumtaşı agregası üretimi için eklenmiştir (Şekil 5).



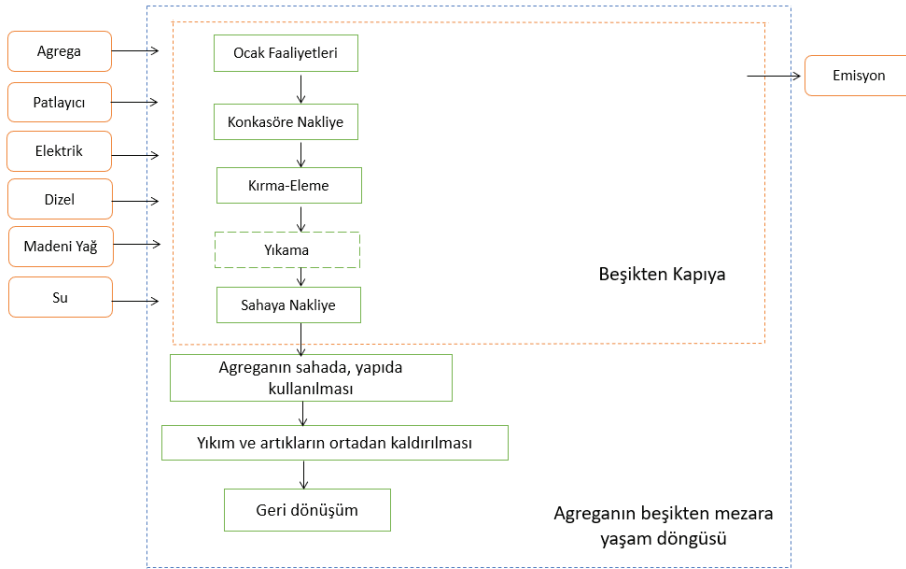
Şekil 4. Agregada üretimi yapılan ve Trakya formasyonu içerisinde bulunan kireçtaşlarının genel görünümü.

Figure 4. General view of limestones within the Trakya formation, from which aggregate is produced.

ENVANTER ANALİZİ

Yaşam döngüsü envanteri, yaşam döngüsünün her aşamasındaki malzeme ve enerji gibi tüm çevresel girdilerin ve hava emisyonları, su atıkları ve katı atık bertarafı gibi çıktılarının ayrıntılı bir derlemesini içermektedir (Blengini, 2009). Envanter analizi aşamasında, incelenen yaşam döngüsü modelinin bir parçası olan tüm süreçlerin hesaplanmasını ve değerlendirmesini gerektirmektedir. Bu aşama, ürün (agrega) ile ilişkili çevresel etkileri ve kaynak tüketimini nicel olarak belirlemek için esastır. Ürün sisteminin yaşam süresi boyunca girdi ve çıktılarının derlenmesi ve sayısallaştırılması bu aşamada gerçekleştirilmiştir.

Sistem sınırları kazı-patlatma, yükleme-taşıma, kırma-eleme ve nakliyeden oluşmaktadır. Agregada üretiminde ilk süreç kazı ve patlatmadır. Bu süreç, taşın ortaya çıkması için toprak katmanlarının kaldırılmasıyla başlar ve çıkarılan organik toprak geri kalan malzemeden ayrılır. Taş, delme ve patlatma yöntemleriyle veya kazı durumunda çıkarılır. Kumtaşı ve kireçtaşı agregası üretiminde, kaya delme işlemi bir kaya delme makinesi ile gerçekleştirilir. Daha sonra patlayıcılar çukura yerleştirilir ve agregada çıkarılır. Çıkarılan kayalar kamyonlara yüklenir ve kırma ve eleme tesisine taşınır.



Şekil 5. Agregat ocak faaliyetleri modeli sistem sınırı.

Figure 5. System boundary model for aggregate quarry activities.

Kırma eleme süreci, agregatın kırıcıya taşınmasından sonra başlar ve kırma, öğütme, yıkama, depolama ve tedarik aşamaları ile devam eder. Yıkama tesisinde, bölgedeki gölette biriken su kullanılmakta ve bu su arıtıldıktan sonra geri dönüşümlü olarak tekrar kullanılmaktadır. Kireçtaşının aşındırıcı özelliğinin kumtaşı oranla düşük olması ve kil içermemesi nedeniyle, kumtaşı agregat üretiminden farklı olarak kireçtaşı üretiminde yıkama aşaması yer almamaktadır. Agregayı boyutlarına göre sınıflandırma ve yıkama aşamalarından sonra, konveyör bantları malzemeyi stok alanına taşır. Kırma ve eleme işleminin girdi malzemeleri madeni yağ, elektrik, su ve agregat olarak tanımlanmıştır (Çizelge 1, Çizelge 2).

Nakliye aşamasında, agregat genellikle konveyörlerle boyutlarına göre stoklanmak üzere taşınır. Üretim sürecinin son adımı, agregatın kamyonlara yüklenerek stok sahasına taşınmasını içerir. Taşıma mesafesi, kumtaşı agregat ocağı için 2,5 km, kireçtaşı agregat ocağı

için ise 3 km olarak kabul edilmiştir. Standart ve şartnamelere uygun olan agregat, inşaat sahasına taşınır. Agregatın stok sahasından inşaat sahasına taşınma süreci, nihai ürünün kamyonlarla kullanım yerine taşınmasını içerir. Agregat ocağından inşaat sahasına taşımadan kaynaklanan çevresel etkisi ve geri dönüşüm aşaması bu çalışmaya dahil edilmemiştir.

Envanter analizini uygulayabilmek için agregat faaliyetleri aşamalarında gerekli olan veri kaynakları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir. Agregat üretim süreciyle ilgili verilerin çoğu, elektrik kullanımı, dizel yakıt tüketimi, agregat üretimi ve kumtaşı agregat ocağı için envanter analizini oluşturmak amacıyla patlatma verileri dahil olmak üzere, aylık bazda sahada yapılan madencilik faaliyetlerinden elde edilmiştir. İşletmeden temin edilen veriler 2022 yılını temsil etmektedir. Kumtaşı agregat ocağının üretim miktarı 1.251.236 ton, kireçtaşı agregat ocağının üretim miktarı ise 1.022.677 tondur.

Vural, Yılmaz, Onat, Tuğrul, Uzun Ayvaz

Çizelge 1. 2022 yılı kumtaşı agregada üretimine ait malzeme ve enerji verileri.

Table 1. Material and energy data for sandstone aggregate production in 2022.

Süreç	Malzeme	Miktar	Birim
Kazı	Dizel	192413	L
	Madeni Yağ	1882,5	L
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	38	kg
Patlatma	Elektrikli kapsül	60	adet
	Elektriksiz kapsül	3671	adet
	Dinamit	3141	kg
	Emülsiyon patlayıcı (sulu deliklerde)	87080	kg
	Gecikme rölesi	330	adet
Yükleme-Taşıma	Madeni Yağ	1882,5	L
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	47	kg
	Dizel	235988	L
	Kamyon Lastik	15	adet
Kırma -Eleme	Madeni Yağ	2427	kg
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	2408	kg
	Elektrik	3328482	kWsaat
Yıkama Tesisi	Su	530000	m ³
	Madeni Yağ	25	kg
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	58	kg
	Elektrik	101250	kWsaat
Nakliye	Dizel	38000	L
	Madeni Yağ	347	L
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	2	kg
Kazı	Dizel	48311,0	L
	Madeni Yağ	2484,0	kg
Patlatma	Anfo (kuru deliklerde)	128000,0	kg
	Elektrikli kapsül	0,000111	kg
	Elektriksiz kapsül	0,002757	kg
	Dinamit	2004,0	kg
	Emülsiyon patlayıcı (sulu deliklerde)	10360,0	kg
	Gecikme rölesi	0,000357	kg
Yükleme-Taşıma	Madeni Yağ	3024	kg
	Dizel	313834,0	L
	Kamyon Lastik	1350,0	kg
Kırma-Eleme	Madeni Yağ	200,0	kg
	Madeni Yağ (Gres Yağı)	1500,0	kg
	Elektrik	1834126,7	kWsaat
Nakliye	Dizel	83424,2	L
	Madeni Yağ	756,0	kg

ETKİ DEĞERLENDİRME

Literatürde yaşam döngüsü etki değerlendirme modelleri incelendiğinde farklı yaklaşımların mevcut olduğu görülmektedir. Bu modeller; “orta nokta yaklaşım modelleri”, “son nokta yaklaşım modelleri” ve “orta ve son nokta yaklaşımını birleştiren yaklaşım modelleri” olarak üç grupta ele alınmaktadır. Orta nokta yaklaşımına dayanan modellerde, envanter analizinden elde edilen çevresel veriler; küresel ısınma, asitleşme, ötrofikasyon gibi orta nokta etki kategorileri şeklinde sınıflandırılmakta, nicel hesaplamaların yapıldığı tanımlama adımı bu noktalarda yapılmaktadır (Öztaş Karaman, 2014).

Bu çalışmada, etki değerlendirme aşamasında 1 ton kumtaşı ve kireçtaşı agrega üretiminin çevresel etkilerini belirlemek için kullanılan yöntemlerden birincisi olan CML 2001 yöntemidir. CML 2001 yöntemi, küresel ısınma, asitlenme, ötrofikasyon ve insan toksisitesi gibi çeşitli etki kategorilerini kapsamaktadır. CML 2001’in ortalama Avrupa karakterizasyon faktörleri, Dünya’da ve Avrupa’da şu anda mevcut en iyi uygulama olarak önerilmektedir (Taşkın, 2018). Çalışmanın kapsamı ve hedefleriyle uyumlu olması, ayrıca kullanılan veri kaynaklarıyla uyum sağlaması nedeniyle CML 2001 yöntemi tercih edilmiştir.

Bununla birlikte EN 15804 standardı, bina YDD’si için tüm bilgileri türetmek, doğrulamak ve sunmak için bir çerçeve oluşturur. Bu standart, yapı ürünleri, yapı kullanımları ve inşaat süreçleriyle ilgili Mamüle İlişkin Çevre Beyanı (EPD) sunulmasını tutarlı bir şekilde önermektedir. Ürün aşaması, ham madde tedariki (A1), ham maddelerin taşınması (A2) ve imalat

(A3) süreçlerini içerir ve tüm malzemeler, ürünler, enerji kullanımı ve hurda atıkların işlenmesini ya da bertarafını kapsar. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında en son etki değerlendirme yöntemi olan EN 15804+A2’nin sonuçlarına da yer verilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 1 ton agreganın çevresel etkilerini değerlendirmek için GaBi Education programı içerisinde yer alan CML 2001 ve EN15804+A2 etki değerlendirme yöntemleri ile çalışılmıştır. Bu amaçla beşikten kapıya yaklaşımı doğrultusunda sınırlar belirlenmiş ve envanter analizi aşamasında YDD envanter verileri GaBi Education programına aktarılmıştır. Kumtaşı ve kireçtaşı agrega ocak faaliyetlerinin etki değerlendirme sonuçları Çizelge 3 ve Çizelge 4’te sunulmuştur. Çevresel etkiler CML 2001 yöntemi ile 11 farklı kategoride, EN 15804+A2 yöntemi ile ise 12 farklı kategoride ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Kumtaşı ve kireçtaşı üretim süreçleri, jeolojik oluşum, çıkarma yöntemleri ve işleme teknikleri gibi yönlerden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Kumtaşı, kil ve silt parçacıklarını gidermek için inşaatla kullanılmadan veya daha fazla işlenmeden önce bir yıkama aşaması gerektirmektedir. Buna karşılık, kireçtaşı üretimi bir dizi kırma ve eleme aşamasını içermektedir. Çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri ile ilgili kategoriler, iki farklı kaya türü agregası için incelenmiştir (Çizelge 3-4).

Kumtaşı ve kireçtaşı agrega üretiminde ana çevresel etkiler küresel ısınma potansiyeli, abiyotik fosil tüketim potansiyeli, insan sağlığı toksisite potansiyeli ve tatlı su akuatik ekotoksisite

potansiyeli etki kategorileridir. Agregada üretimi, yaşam döngüsü boyunca kazı, patlatma, kırma, eleme ve taşıma gibi çeşitli süreçler için önemli miktarda enerji gerektirmektedir. YDD analizinin ilk aşamasında, Cebeci ocağında gerçekleştirilen kazı, patlatma, yükleme, taşıma, kırma ve eleme ve nakliye süreçlerine göre iki farklı kaya türü olan kumtaşı ve kireçtaşının çevresel etkileri karşılaştırılmıştır (Çizelge 3 ve 4).

Her iki agregada türü için de yalnızca kırma ve eleme süreçlerinin çevresel etkileri karşılaştırıldığında, kumtaşı agregada üretiminin çevresel etkilerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, kumtaşı agregada üretiminde kırma ve eleme süreçlerine ek olarak yıkama aşamasının da yer almasıdır, bu da enerji ve su tüketimini artırarak çevresel etkilere katkıda bulunmaktadır. Kumtaşı agregada ocağında, kırma ve eleme tesisinde kullanılan elektrik 2,05 kg CO₂ eşd. ile, kireçtaşı agregada ocağında ise 1,66 kg CO₂ eşd. ile küresel ısınma potansiyeli üzerinde en yüksek etkiyi göstermektedir. Bu değerler, her iki agregada türü için elektrik tüketiminin küresel ısınma potansiyeline olan önemli katkısını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, süreçlerin toplam etkisi incelendiğinde, kireçtaşı üretiminde gözlemlenen çevresel etkide azalma, etki kategorisine bağlı olarak %19,1 ile %32,8 arasında değişiklik göstermektedir (Şekil 6). Ancak Abiyotik Fosil Tüketim Potansiyeli ve Tatlı Su Akuatik Ekotoksisite Potansiyeli kategorilerinde, kireçtaşı agregada üretiminin çevresel etkileri, yükleme ve taşıma aşamalarında kullanılan dizel tüketiminden kaynaklı olarak daha yüksek bulunmuştur (Şekil 6).

Çizelge 5, bu çalışmada elde edilen bulgularla önceki çalışmaların bulgularını karşılaştırmaktadır. Ancak, coğrafi konum, veri kalitesi, enerji türü, kullanım ömrü sonu senaryoları, yakıt kullanımı, süreçler ve sistem sınırları gibi farklılıklardan dolayı doğrudan karşılaştırmalar mümkün değildir. Ayrıca, önceki çalışmalar farklı kaya türlerinin jeolojik özelliklerinde gerçekleştirilmiş ve veriler farklı mevsimlerde toplanmıştır. İklim, agregada üretim hızını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, agregada madenciliği sektöründe kesin bilgilerin kullanılabilirliği açısından verilerin kalitesini ve güvenilirliğini etkilemektedir.

Agregada ocakları üzerine yapılan YDD çalışmalarında, agregada üretiminin çevresel etkileri sistem sınırlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Etki değerlendirme metodolojisi ve kaya türlerindeki farklılıklara ek olarak, beşikten sahaya kadar uzanan sistem sınırı, bu çalışmaların iklim değişikliği sonuçlarına ulaşım mesafesi etkilerinin de dahil edildiği anlamına gelir. Kittipongvises (2017), Tayland'daki bir kireçtaşı agregada ocağında, iklim değişikliği potansiyelinin 2,76 kg CO₂-eşd/ton olduğunu ve kireçtaşı işleme tesisinde kırma ve eleme için kullanılan elektriğin, 1,41 kg CO₂-eşdeğer/ton kırma kireçtaşı agregası ile iklim değişikliği etkisine en fazla katkıda bulunduğunu göstermiştir. Farklı etki değerlendirme metodolojisi kullanmamıza rağmen, karbon ayak izi sonuçlarımız benzerdir ve bu çalışmada da karbondioksit (CO₂) emisyonlarının birincil kaynağı, kırma ve eleme işlemleri için kullanılan elektrik tüketimidir.

Çizelge 3. CML 2001 yöntemi ile 1 ton kumtaşı ve 1 ton kireçtaşı agrega üretimi etki kategorilerinin karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of impact categories for the production of 1 ton of sandstone and 1 ton of limestone aggregate with the CML 2001 method.

Etki Kategorileri	Kuzey Cebeci (Kumtaşı)	Güney Cebeci (Kireçtaşı)	Birim
Küresel Isınma Potansiyeli	2,24	1,98	kg CO ₂ -eşd.
Asidifikasyon Potansiyeli	7,66E-03	6,68E-03	kg SO ₂ -eşd.
Ötrofikasyon Potansiyeli	5,30E-04	5,45E-04	kg PO ₄ -eşd.
Ozon Tabakası Tükenme Potansiyeli	9,89E-11	7,48E-10	kg R-11- eşd.
Abiyotik Element Tüketim Potansiyeli	5,37E-07	5,75E-07	kg Sb-eşd.
Abiyotik Fosil Tüketim Potansiyeli	37,7	41	MJ
Tatlı su Akuatik Ekotoksosite Potansiyeli	9,76E-03	1,17E-02	kg DCB-eşd.
İnsan Sağlığı Toksikite Potansiyeli	0,421	0,303	kg DCB-eşd.
Denizel Akuatik Ekotoksosite Potansiyeli	181	160	kg DCB eşd.
Karasal Ekotoksosite Potansiyeli	5,71E-03	6,22E-03	kg DCB eşd.
Fotokimyasal Ozon Oluşturma Potansiyeli	5,22E-04	4,95E-04	kg Ethene eşd.

Çizelge 4. EN 15804+A2 yöntemi ile 1 ton kumtaşı ve 1 ton kireçtaşı agrega üretimi etki kategorilerinin karşılaştırılması.

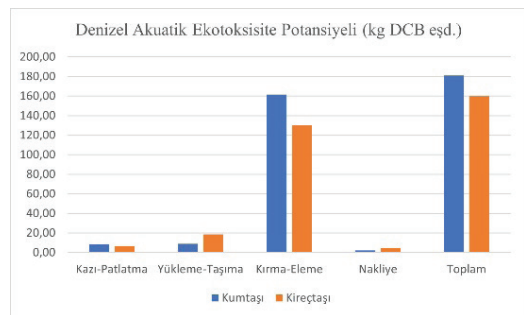
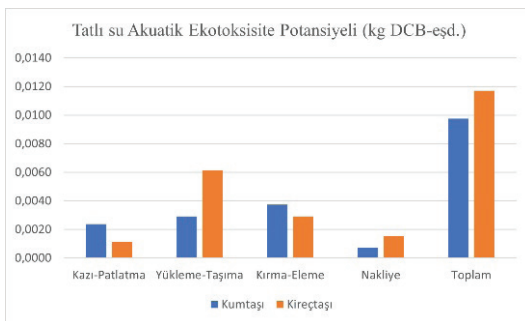
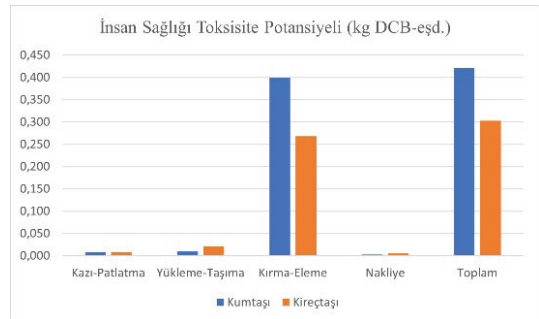
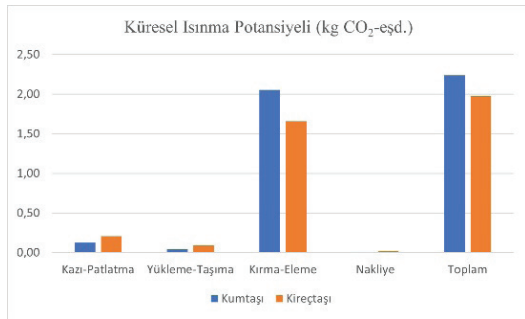
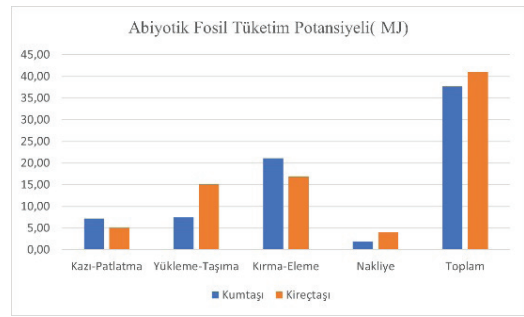
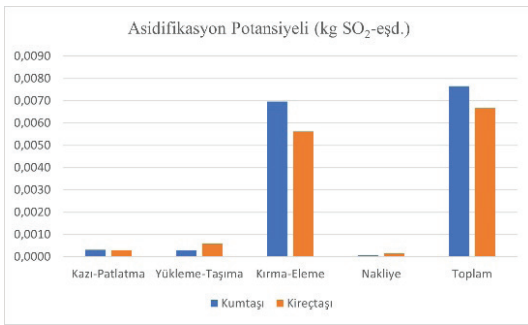
Table 4. Comparison of impact categories for the production of 1 ton of sandstone and 1 ton of limestone aggregate with the EN 15804+A2 method.

Etki Kategorileri	Kuzey Cebeci (Kumtaşı)	Güney Cebeci (Kireçtaşı)	Birim
İklim Değişikliği	2,3	2,05	kg CO ₂ eşd.
Asitleşme	8,89E-03	7,81E-03	mol H ⁺ eşd.
Tatlı sularda ötrofikasyon	4,80E-06	6,03E-06	kg P eşd.
Tuzlu sularda ötrofikasyon	1,24E-03	1,18E-03	kg P eşd.
Karasal ötrofikasyon	1,34E-02	1,26E-02	mol N eşd.
Ozon tüketimi	7,49E-11	5,66E-10	kg CFC 11 eşd.
Abiyotik kaynakların tüketimi – mineraller ve metaller	4,93E-07	4,55E-07	kg Sb eşd.
Abiyotik kaynakların tüketimi – fosil yakıtlar	38,4	41,6	MJ
Eko-toksitlik (tatlı su)	18,4	21,8	CTUe
İnsan zehirlenmesi, kansere yol açmayan etkiler	2,88E-08	3,07E-08	CTUh
İnsan zehirlenmesi, kansere yol açan etkiler	5,60E-10	6,01E-10	CTUh
Fotokimyasal Ozon Oluşumu	3,81E-03	3,56E-03	kg NMVOC eşd.

Çizelge 5. Önceki çalışmaların Küresel ısınma potansiyeli sonuçları.

Table 5. Global warming potential results from previous studies.

Literatür	Lokasyon	Kayaç türü	Küresel Isınma Potansiyeli	Etki değerlendirme yöntemi
Bendouma vd. (2020)	Cezayir	Kireçtaşı	4,66 to 42,55 kg CO ₂ -eq/ton	ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.01
Kittipongvises (2017)	Tayland	Kireçtaşı	2.76 Kg CO ₂ eşd./ton	IMPACT 2002+ and the Greenhouse Gas Protocol method
De Bortoli (2023)	Kanada	Kireçtaşı-Volkanik Kayaç	2.28 and 3.59 kg CO ₂ eşd./ton	TRACI
Bu çalışma	Türkiye	Kireçtaşı Kumtaşı	1,98 kg CO ₂ -eşd/ton 2,24kg CO ₂ -eşd/ton	CML 2001



Şekil 6. Agregada türüne göre etki kategorilerinin karşılaştırılması (CML 2001).

Figure 6. Comparison of impact categories by aggregate type (CML 2001).

SONUÇLAR

Bu çalışmada YDD yaklaşımı ile Kuzey Cebeci kumtaşı ve Güney Cebeci kireçtaşı agrega ocak üretimlerinin ‘beşikten kapıya yaklaşımı’ ile çevresel etkileri değerlendirilmiştir. İki farklı ocak için, CML 2001 ve EN 15804+ A2 etki yöntemleri ile farklı etki kategorilerine ait sonuçlar incelenmiştir. Kumtaşı agregasında kireçtaşı agrega üretimden farklı olarak yıkama aşamasının dahil olduğu kırma ve eleme süreci ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Kırma ve eleme aşamalarında kullanılan elektrik, her iki agrega türü için de önemli bir etken olsa da, kumtaşı üretiminde ek olarak yıkama sürecinin bulunması, elektrik tüketimini ve dolayısıyla küresel ısınma potansiyelini arttırmıştır. Elektrik üretiminde kullanılan fosil yakıtlar, özellikle kömür, petrol ve doğal gaz, sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağıdır ve atmosfere salınan CO₂ ve diğer sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır.

YDD yaklaşımı, çevresel etkilere sahip süreçleri belirlemeye yardımcı olan kapsamlı bir metodolojidir. Çalışmanın bulguları, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve elektrikli kamyonlarla taşımacılığın çevresel etkilerinin karşılaştırılması ile agrega üretimi maliyetlerinin analizine öncelik verileceğini göstermektedir. Bu yönüyle, gelecekteki araştırmalar daha sürdürülebilir ve maliyet etkin üretim yöntemlerine odaklanılacaktır.

Katkı Belirtme

Bu çalışma, Doç. Dr. Murat Yılmaz danışmanlığında, “Agrega Ocak Faaliyetinde Yaşam Döngü Değerlendirmesi” başlıklı Doktora Tezi olarak Nil Vural tarafından İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nde çalışılmaktadır. Ayrıca bu

çalışma, TÜBİTAK, Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenmiştir (Proje No: 123Y203).

KAYNAKLAR

- Awuah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1), 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.005>
- Başçetin, A., Adıgüzel, D., & Tuylu, S. (2017). The investigation of CO₂ emissions for different rock units in the production of aggregate. *Environmental Earth Sciences*, 76(279). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6602-0>
- Bendouma, S., Serradj, T., & Vapur, H. (2020). A case study of the life cycle impact of limestone quarrying on the environment. *International Journal of Global Warming*, 22(4), 432–447. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.10033384>
- Blengini, G. A. (2009). Life cycle of buildings, demolition, and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 44(2), 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.007>
- De Bortoli, A. (2023). Understanding the environmental impacts of virgin aggregates: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137629>
- Durucan, S., Korre, A., Muñoz-Meléndez, G., & Chane-Kon, L. (2003). Mining life cycle modeling for environmental control and waste minimization. *International Mining Congress and Exhibition of Turkey - IMCET 2003*.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., & Guinée, J. B. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- GaBi Educational Software. (2012). *GaBi Educational User Manual*. Stuttgart, Germany: Thinkstep.

- Gonçalves, J. P., Tavares, L. M., & Toledo Filho, R. D. (2007). Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.009>
- Gözübol, A. M., & Aysal, N. (2008). Cebeciköy kireçtaşı ocaklarında litolojik ve yapısal kökenli işletme sınırları. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 21(1), 25–35.
- ISO. (2006a). ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jullien, A., Proust, C., Martaud, T., Rayssac, E., & Ropert, C. (2012). Variability in the environmental impacts of aggregate production. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.002>
- Kaya, O. (1971). İstanbul'un Karbonifer stratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, XIV(2), 143–199.
- Kittipongvises, S. (2017). Assessment of environmental impacts of limestone quarrying operations in Thailand. *Environmental and Climate Technologies*, 20(1), 67–83. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2017-0011>
- Korre, A., & Durucan, S. (2009). EVA025 – Final Report: Aggregates industry life cycle assessment model: Modelling tools and case studies. American Ceramic Society. Retrieved from <https://coilink.org/20.500.12592/bkn0b6> on September 11, 2024. COI: 20.500.12592/bkn0b6
- Öztaş Karaman, S. (2014). Türkiye malzemesi sektörü için yaşam döngüsü etki değerlendirmesine yönelik bir model önerisi (Unpublished doctoral dissertation). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Petavratzi, E., Kingman, S. W., & Lowndes, I. (2005). Particulates from mining operations: A review of sources, effects, and regulations. *Minerals Engineering*, 18(12), 1183–1199. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.06.017>
- Taşkın, E. (2018). Linyit yakıtlı pilot termik santral için baca gazı emisyon azaltma seçeneklerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi (Unpublished master's thesis). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Tuğrul, A., Aysal, N., Yılmaz, M., Çinku, K., Hoşgörmez, H., Gözübol, A. M., Özer, Ü., Öztoprak, S., Onat, B., Karadoğan, A., Küçükdeniz, T., & Şahin, Ü. A. (2018). Cebeci Maden Bölgesi Proje Raporu. Ankara, Turkey: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Wilburn, D. R., & Goonan, T. G. (1998). Aggregates from natural and recycled sources: Economic assessments for construction applications: A materials flow study. U.S. Geological Survey Circular, 1176, 1–31. <https://doi.org/10.3133/cir1176>
- Yıldız, T. D. (2021). Possible effects of mining zone regulation on mining companies in Turkey and evaluation of mining companies. *Resources Policy*, 77, 102011. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102011>

Araştırma Makalesi / Research Article

Kaya Düşmesi Risklerinin Kentlerin Planlanmasına Etkileri: Çoruh Havzası Örneği

Effects of Rockfall Risks on Urban Planning: The Coruh Basin Case

Eroltan DURMUŞ^{1*} , Özkan CORUK² , Ahmet KARAKAŞ² 

¹ Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Geliş (Received): 24.07.2024 / Düzeltme (Revised): 20.08.2024 / Kabul (Accepted): 06.11.2024

ÖZ

Ülkemizde derin vadi tabanlarındaki yerleşimlerdeki jeolojik ve jeomorfolojik tehlikeler kent planlamasını kısıtlamakta ve zorlaştırmaktadır. Bu yerleşim alanlarında nüfusun artmasıyla yeni yapılaşma talebi kent yerleşimi ile planlamasını yeniden gündeme getirmiştir. Ülkemizde bazı il, ilçe ve köy yerleşkelerinde de yamaç stabilitesini etkileyen kaya düşmesi olayları önemli riskler oluşturmaktadır. Bu çalışmada Çoruh havzası ve Artvin ili yerleşim alanındaki kent planlamasını etkileyen kaya ve blok düşmesi riskleri ele alınmıştır. Çoruh havzasında nehrin günümüze kadar yapmış olduğu aşındırmalar dik/dike yakın vadi yamaçlarını şekillendirmiştir. Heterojen litolojinin yanında, bölgedeki tektonizma jeolojik birimlerde süreksizlik yoğunluğunu oluşturmuştur. Bölgenin iklimsel özellikleri kaya ortamında atmosferik bozunmalara da neden olmuştur. Morfolojik, jeolojik ve iklimsel özellikler, Çoruh havzasında Artvin ve yakın çevresinde kaya düşmesi olaylarının sık sık yaşanmasının ana nedenleridir. Vadi tabanlarının dar olması bu kesimlerdeki yerleşimi de kısıtlamaktadır. Genelde yerleşim eğimin nispeten düştüğü yamaçlardadır. Ancak bu sahaların birçoğu, daha üst kotlarında dik/dike yakın eğimli yamaçlara bağlı kaya düşmesi etkisi altındadır. Bu yerleşimlerde mevcut yapı stoğunun kontrol edilerek kent planı tekrar ele alınmalı, yeni yerleşim alanlarının planlanmasında taşkın riski ile birlikte potansiyel kaya düşmesi riski mutlaka dikkate alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi Riski, Kent Planlanması, Çoruh Havzası

ABSTRACT

Geological and geomorphological hazards in settlements on deep valley bottoms restrict urban planning. Population increases in these settlement areas has led to demand for new construction of urban settlement and planning has returned to the agenda. Rockfalls affecting slope stability also pose significant risks in some settlements in our country. This study discusses rockfall risks affecting urban planning in the Çoruh basin and Artvin province settlement areas. Erosion by the river in the Çoruh basin has shaped the steep valley slopes. In addition to heterogeneous lithology, tectonism in the region has increased discontinuities, along with atmospheric degradation of geological units. Morphological, geological and climatic characteristics are the main reasons for the frequent occurrence of rockfall events in the Çoruh basin, Artvin and immediate surroundings. The narrowness of the valley bottoms also restricts settlement in these areas. Generally, settlements are located on slopes where the slope is relatively low. However, many of these areas are affected by rockfalls due to steepness at higher elevations. In these settlements, the existing building stock should be checked, the urban plan should be reconsidered, and the

potential risk of rockfalls along with the risk of flooding should definitely be taken into consideration when planning new settlement areas.

Keywords: *Rockfall Risk, Urban Planning, Çoruh Basin*

GİRİŞ

Ülkemizin üzerinde bulunduğu coğrafya gerek jeolojik ve jeomorfolojik gerekse iklimsel özelliklere bağlı olarak birçok doğal afete karşı duyarlı özellikler taşımaktadır. Doğal afetlere karşı duyarlı sahalardan ve yakın çevresinde yapılacak kent planlamaları da yerleşim yerlerinin doğal afet tehlike ve risk olasılıklarını arttırmaktadır. Bilindiği üzere kaya düşmeleri, yamaç veya şevlerde kaya bloklarının yer çekimi etkisiyle eğim yönü boyunca hareket kazanması olarak tanımlanır. Doğu Karadeniz Bölgesinde Çoruh Vadisi de özellikle kaya düşmeleri açısından yüksek duyarlılığa sahip sahalardan temsil etmektedir.

Çoruh vadisi boyunca gözlemlenen jeolojik formasyonlar, tektonik anlamda Doğu Anadolu Yığılma Kuşağının kuzey kenarı boyunca meydana gelmiş KD-GB doğrultulu bindirme zonları ve buna bağlı gelişen süreksizlik sistemleri nedeniyle kırıklı bir yapı sunarlar. Çoruh Nehri ve yan kollarındaki akarsuların aşındırmış olduğu dik/dike yakın yamaç yüzeylerinde vadi güzergahları boyunca kırıklı yapıya sahip formasyonlar nedeniyle çok sayıda kaya düşmesi kaynak alanları mevcuttur. Çoruh vadisi ve yan kollarının dar vadi tipi özellikleri gösteriyor oluşu nedeniyle vadi tabanlarında yerleşim alanları bakımından topografik anlamda uygun genişlikte düzlük alanlar bulabilmek neredeyse olanaksızdır. Vadi tabanlarının eğim miktarları, akarsu debileri ve iklimsel şartlar göz önüne alındığında vadi tabanları aynı zamanda su baskını riskini de taşıdığından, yerleşim alanı bakımından vadilerin düşük/orta derecede topografik eğime sahip yamaçlarının tercih edilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

Kaya düşmelerine konu incelemeler, önlemler ve modellemeleriyle ilgili çalışmalara baktığımızda Dünya'da genelde ABD, Çin, Kanada, İtalya gibi iklimsel ve jeolojik faktörlerin kaya düşmesi olaylarını tetikleyici rol oynadığı bölgelerde yoğunlaştığı görülür. Ritchie (1963), kaya düşmelerinin topografik özelliklere bağlı olarak hareket türlerini belirlemiş olmakla birlikte aynı zamanda önlem projeleri üretme adına hendek tasarımları üzerine çalışmalar yapmıştır. ABD'de, Oregon Ulaştırma Dairesi (ODOT) tarafından karayolu güzergahı üzerindeki kaya düşmesi olaylarına konu bir sınıflama yapılmıştır (Pierson and Vickle, 1993). Bu sınıflama daha sonraki yıllarda revize edilerek Amerika Birleşik Devletleri'nin pek çok bölgesinde uygulamaya konulmuştur. Çin'de, Chau vd. (2002) tarafından Hong Kong'ta kaya düşmesi modellemeleri için normal ve teğetsel katsayılarının kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. İtalya'da ise Wasowski ve DelGaudio (2000) tarafından sismik olayların kaya düşmelerine olan etkileri kullanılarak modellemeler geliştirilmiştir. Agliardi ve Crosta (2003) dağlık bölgelerdeki kaya düşmesi olaylarının doğru tahmin edilebilmesi için 3 boyutlu sayısal modellemeler yapmışlardır. Güney İtalya'daki karayolunu etkileyen şevde Schweigl vd. (2003) tarafından kaya ortamının jeoteknik özellikleri kullanılarak kaya düşmelerinin analizleri yapılmıştır. Wang ve Lee (2012), kaya bloğu geometrisinin ve yüzey pürüzlülüğünün kaya düşmelerine olan etkilerini sayısal simülasyonlara dayalı istatistiksel analiz yöntemleriyle incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre topografik eğim ne kadar düzensiz olursa, kaya düşmesinin hareket davranışı da yuvarlanmadan sıçramaya varan değişkenlikler gösterecektir.

Kaya bloğunun şekli ise düşen kaya bloğunun hareket yolunu etkileyen bir faktör olarak görülmüştür ve bu da eklem pürüzlülük katsayısına bağlıdır. Wyllie (2014), Kanada'da British Columbia Üniversite'sinde karayolu ve demiryolu güzergahları üzerindeki şevlerde oluşan kaya düşmeleri için modellemeler yapmıştır. Türkiye'de de 1970'li yıllardan sonra Kapadokya bölgesindeki kaya düşmelerine konu çalışmaların akademik anlamda ele alınmaya başladığı anlaşılmaktadır. Örneğin Doyuran (1976) Kapadokya bölgesindeki kaya düşmesi olaylarının çevreye olan olumsuz etkilerini ele almıştır. Topal vd. (2007) Afyonkarahisar kalesindeki kaya düşmelerini olaylarını incelemiş, volkanik birimlerdeki süreksizlik denetimindeki kaya düşmesi olaylarının çevreye olan etkilerini araştırmıştır. Tunusluoğlu ve Zorlu (2009) Kapadokya bölgesinde farklı profillerdeki kaya düşmeleri sayısal anlamda modellenmiş, kaya düşmesi olaylarının çevreye olan etkilerinin hangi ölçekte gerçekleşebileceği araştırılmıştır. Zorlu vd. (2011) tarafından yine Kapadokya bölgesindeki beş farklı alanda kaya düşmesi olayları üzerine farklı modelleme ve yaklaşımlarla çevresel etki değerlendirmesi yapılmıştır. Düzgün vd. (2012) kaya düşmeleri ve kaya şev kaymaları risk analizine dayalı mühendislik çözümlerinin değerlendirildiği Amasya ili Harşena dağında detay çalışmalar yapmışlardır. Polat vd. (2016) çalışmasında Sivas ili Gürün ilçesi Sarıca köyündeki kaya düşmeleri modellenmiş ve modelleme sonucunda çözüm önerileri olarak sunulan çelik bariyerlerinin verimliliği incelenmiştir. Nasery ve Çelik (2020) Trabzon İli Ortahisar ilçesine bağlı Kaymaklı mahallesindeki kaya düşmesi olayını incelemiş ve farklı ıslah çalışmalarında birleşik çözümlere yönelik modellemeler üzerine çalışma yapmışlardır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2020) kaya düşmelerinden

kaynaklı afetlerin değerlendirilmesine yönelik teknik kılavuz geliştirerek yayınlamıştır. Akın vd. (2021) 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde TLS ve İHA ile oluşturulan sayısal yüzey modellerinin kullanımı konusunda çalışma yapmışlardır. Varol vd. (2023) kaya düşmelerinin değerlendirilmesinde 3 boyutlu olasılıksal analizler ve ampirik yöntemleri birlikte kullanmışlardır.

ÇORUH HAVZASINDA YERLEŞİM DURUMU

Artvin İl sınırları içerisinde Çoruh vadisi boyunca Borçka ve Yusufeli ilçe merkezleri ile Artvin il merkezi önemli yerleşim alanlarıdır. Bu alanlar dışında Çoruh vadisi sağ ve sol sahili boyunca çok sayıda köy yerleşkeleri mevcuttur. Artvin İl sınırları içerisinde Çoruh vadisi sağ ve sol sahillerinde toplamda 37 adet köy yerleşkesi mevcuttur. Bu çalışmada, Çoruh vadisi üzerinde kurulu olup kaya düşmesinden etkilenmiş olan 3 ayrı köy yerleşkesi örneği üzerine durulmuştur (Şekil 1).

İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ

Eroskay (1970) tarafından bölgede yapılan çalışmalarda Eosen yaşlı kalkalkalen volkanizma tanımlanmış olup bu volkanitler, Laleli Volkanitleri olarak isimlendirilmiştir.

Mülga Elektrik İşleri Etüt İdaresinin Çoruh havzasındaki olası baraj yerlerinin, göl alanlarının ve tünel güzergahlarının mühendislik jeolojisi incelemeleri kapsamında Ertunç (1980) tarafından yapılan incelemelerde; Çoruh havzası kuzeydoğusunda kıvrımlanma, faylanma, metamorfizma ve genç granit intrüzyonlarının gözlemlendiği serpantinleşmiş gabro, split ve metalav, yeşil şist, grovak, kayrak ve fillattan

oluşan Liyas yaşlı Yusufeli formasyonu ile Üst Kretase yaşlı Pügey formasyonu ile Berta formasyonları ve en üstte Eosen yaşlı Borçka volkanitlerini ayırtlamıştır. Ertunç (1980)'a göre Çoruh vadisi kuzey kesiminde yer alan neredeyse tüm jeolojik birimler zaman zaman granit sokulumları ile kesilmiştir. Çoruh vadisinin güney batısında temelde Üst Kretase Pügey formasyonu üzerine Geç Kretase'de ofiyolit yerleşimi söz konusudur. Eosen'de, bölgede andezit ve piroklastiklerden oluşan kalkalkalen bir volkanizma söz konusudur. Bu çalışmada MTA (1998) çalışmasında kullanılan formasyon adlaması jeolojik haritalarda esas alınmıştır. MTA tarafından 1998 yılında bölgede yapılan çalışmalarda Paleozoyik yaşlı metamorfik bir temel üzerinde bazalt-andezit-lav ve piroklastlarının kumtaşı, çamurtaşı, siltaşı, radyolarit ve şeyl aratabakalarıyla birlikte ardalanmasından oluşan Jura yaşlı Hamurkesen formasyonu ayırtlanmıştır. Formasyonun dokanakları çoğunlukla tektoniktir. Bölgede, bu formasyonu uyumlu olarak üzerleyen Jura yaşlı siyah sleyt, kumlu-killi türbidit ve toleyitik bazaltlardan oluşan Çataksu formasyonu ile resifal kireçtaşı aratabakalı, bazalt lav ve piroklastların yanı sıra, konglomera ve kumtaşlarından oluşan Madenler formasyonu izlenir. Bu formasyonlar, Kretase yaşlı Çatak, Kızılkaya, Çağlayan ve Çayırbağı formasyonları tarafından üzerlenmiştir. Havzanın kuzey-kuzeydoğusunda Kretase yaşlı birimler üzerinde Eosen yaşlı Bakırköy, Kızılcık, Ağıllar ve Kabaköy formasyonları yer alır. MTA (1998) tarafından yapılan bu çalışmada da, Ertunç (1980) çalışmasında belirtildiği üzere, bölgedeki neredeyse tüm jeolojik birimlerin granit sokulumları ile kesilmiş olduğu belirtilmektedir. Çoruh havzası, kaya düşmelerine karşı duyarlılık durumları ve karmaşık litolojisi dikkate alındığında KD ve GB olmak üzere iki ayrı kısımda incelenmesinde fayda vardır.

ÇORUH HAVZASI JEOMORFOLOJİSİ

Bölge jeomorfolojisinde, Çoruh vadisi boyunca bölgeye etkiyen tektonizma ile litolojinin kontrolünde akarsu proseslerinin etkin rolü vardır. Kuvaterner'deki epirojenik yükselmeler sonucu Çoruh Nehri'nin yatağını aşındırmasına bağlı olarak nehir tabanı yüzlerce metreye ulaşan derinliğe sahip ve her iki yamacında da yüksek eğimli vadi konumu kazanmıştır (MTA, 1998). Bu nedenle vadi boyunca özellikle bazalt ve granitlerin yüzeylendiği vadi yamaçlarında sarp bir topografya söz konusudur. Havza jeomorfolojisi göz önüne alındığında, vadi eteği ve yamaçlarına konuşlandırılmış yerleşkelerin, potansiyel kaya düşmesi riskli alanlar içerisinde olabileceğini belirtmek mümkündür (Şekil 2).

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Artvin İl sınırları içerisinde Çoruh vadisi boyunca konuşlandırılmış yerleşim yerlerinden 3 farklı sahanın geçmiş yıllardaki kaya düşmesi olayları için Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü arşivi incelenmiştir. Söz konusu alanların jeolojik ve topografik özelliklerine göre kaya düşmesi potansiyeli, tehlike ve risk değerlendirmeleri ortaya konulmuş olup kaya düşmesi riski yüksek alanlarda yapılan ıslah çalışmalarının sonuçları da değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kaya düşme potansiyeli olan sahaların duyarlılık durumları Conefall yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Bu programın çalışma prensibi, belirli bir topografik eğim açısı (kritik eğim açısı) üzerindeki alanların (ya da sahada belirlenen kaynak alanların) alt kotlarında kalan yamaçların topografik özelliklerine göre kaya düşmesine karşı duyarlı olan alanların belirlenmesidir. Programın çalışmasında sayısal topografik haritaları ve sayısal kaynak alan harita parametreleriyle analiz yapıldığından duyarlılık haritaları bu parametreler sayesinde elde edilmiştir.

Çalışmada, 3 ayrı yerleşim yerinin kaya düşmesi tehlike ve risk değerlendirmeleri yapılırken hem arşiv ve saha verilerinden faydalanılmış, hem de CBS ortamında 1/25.000 ölçekli 25x25 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli haritalarından faydalanılarak oluşturulan topografik eğim haritalarından faydalanılmıştır. İlk aşamada inceleme alanlarında gerçekte kaya düşmelerinin meydana geldiği kaynak alanların bulunduğu yamaçların Conefall yazılımı ile kaya düşmesi duyarlılık durumları incelenmiştir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın <https://aras.afad.gov.tr> adresindeki "Afet Risk Analiz Sisteminde (ARAS)" de kaya düşmesi duyarlılık haritaları için aynı veri ve çözünürlük değerleriyle Conefall yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada, ARAS ekran görüntüleri alınmıştır.

$$\alpha = 55 \times \text{RES}^{-0.075} \quad (1)$$

Formül 1 kullanılarak topografik eğim haritasında kaya düşmesi için kritik açı belirlenmiştir. Burada;

α : Kritik eğim açısı,

RES: Çözünürlük değeridir.

Uygulamada Sayısal Yükseklik Modeli çözünürlüğü 25 m olduğundan RES değeri 25 olarak alınmıştır. Buradan kritik eğim açısı (α) değeri, 43° olarak seçilmiştir.

Conefall yazılımı üzerinde 32-35-38°'lik konik açı değerleri kullanılarak yapılan analizlerde Çizelge 1'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Yerleşim alanlarındaki kaya düşmesi etütlerinde, sahada daha önce düşmüş olan kaya bloklarının ulaştığı noktalar da haritalanarak Conefall yazılımından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Düşen blokların konumları ile Conefall yazılımı arasında belirli bir uyum gözleniyor olsa da, çalışmaların sonraki aşamalarında daha büyük ölçekte (1/1.000)

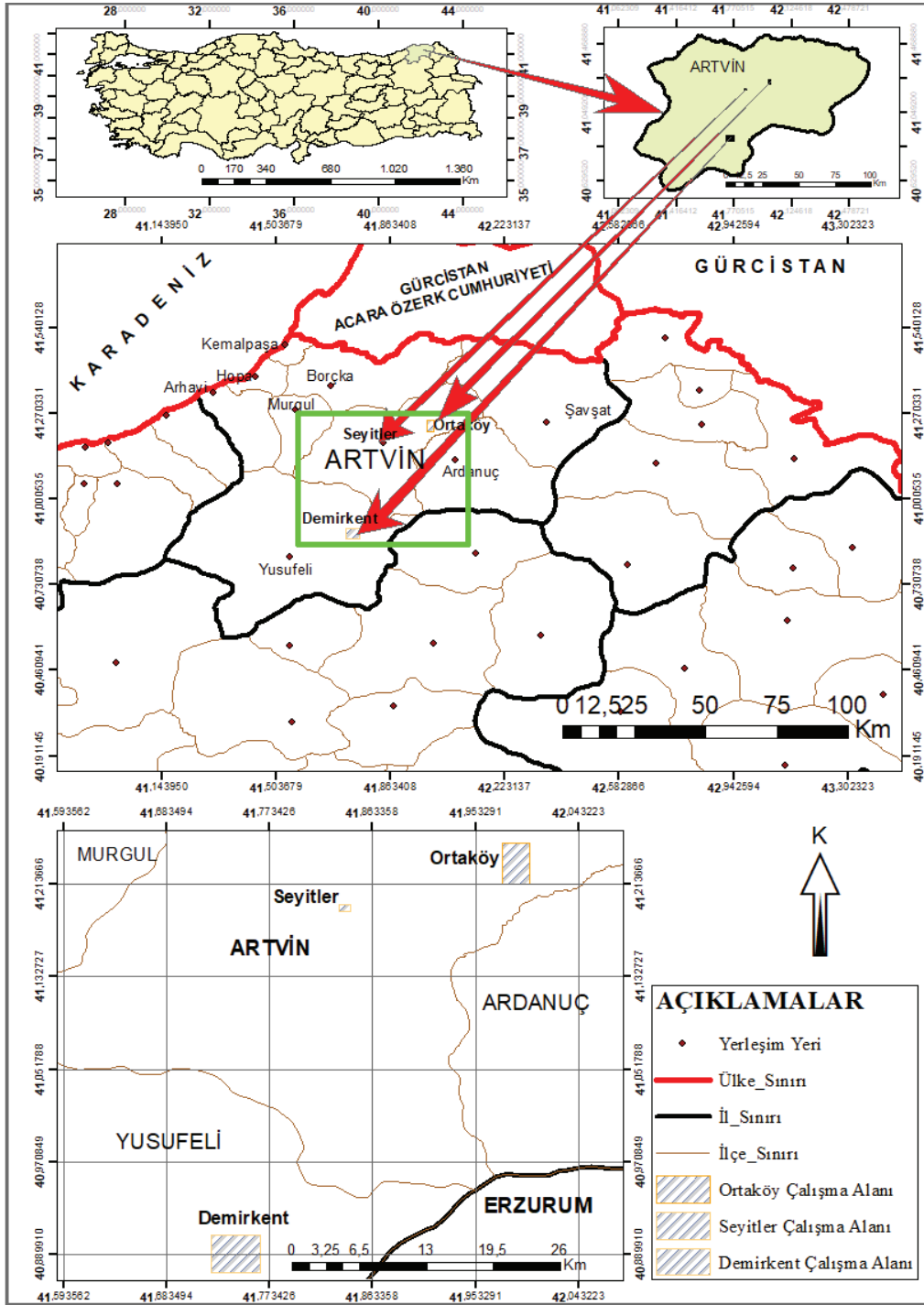
halihazır harita çalışmaları yapılmış, düşmesi muhtemel kaya bloklarının konumları, hacim ve şekilleri sayısal haritalara işlenerek kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Düşen kaya bloklarının ulaştığı en uzak mesafeler, Conefall duyarlılık sonuçları ve düşme analizi sonuçları birlikte değerlendirilerek meskûn alanlarda kaya düşmesine bağlı yapı ve ikamete yasaklı alan sınırları belirlenmiştir. Bu çalışmada, incelemesi yapılan alanlardaki Conefall yazılım sonuçları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının Afet Risk Azaltma Sisteminden (ARAS) alınmıştır.

Sahada elde edilen jeolojik ve topografik verilere göre, havzanın kuzeydoğusundaki jeolojik formasyonların özellikleri ile havzanın güneydoğusundaki jeolojik formasyon özellikleri gereği kaya düşmelerine karşı duyarlılık durumları incelenmiştir.

KAYA DÜŞMELERİNDE TEHLİKE ve RİSK DEĞERLENDİRMESİ

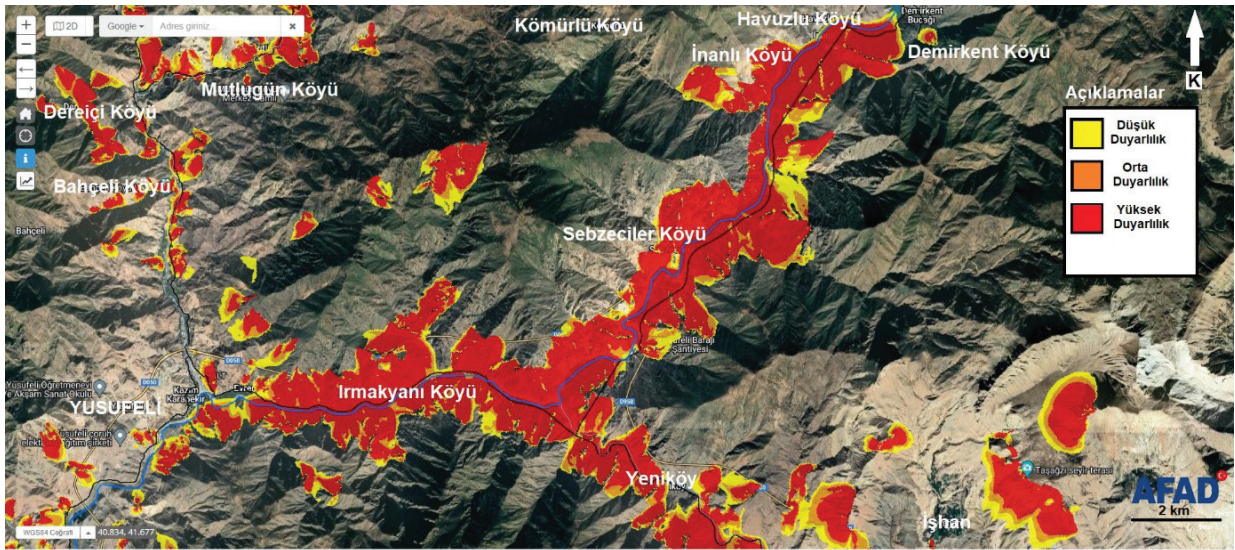
Kaya düşmeleri, süreksizlikler veya zayıflık zonları ile sınırlandırılmış kaya bloklarının doğal veya yapay nedenlere bağlı olarak belirli bir eğime sahip yamaç ya da şev yüzeyinden koparak/ ayrılarak hareket etmesi olarak tanımlanır. Kaya düşmeleri sırasında topografik eğime bağlı olarak serbest düşme, sıçrama ve yuvarlanma şeklinde hareket türlerine rastlayabilmekteyiz (Ritchie, 1963). Dik/dike yakın yamaçların alt kotlarındaki alanlar, yamaçtaki kaya ortamının mühendislik jeolojisi ve yamacın jeomorfolojik özelliklerine bağlı olarak "kaya düşmesi tehlikesi" altında olabilirler. Kaya düşmesi tehlikesi olan alanlarda imarı tamamlanmış yerleşim alanları için ise, "kaya düşmesi riskinden" bahsedilir. Bu tür yamaçlarda yapılacak analizler sonucunda yerleşkelerin kaya düşmesi afetinden zarar görebilirliğini azaltacak önlemler geliştirilmeli; kaya düşmesi afetine karşı dirençli yerleşim alanları oluşturulmalıdır.

Durmuş, Coruk, Karakaş



Şekil 1. Çoruh vadisi boyunca kaya düşmelerinden etkilenmiş yerleşkeleri gösteren yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map showing settlements affected by rockfalls along the Çoruh valley.



Şekil 2. AFAD Afet Risk Analiz Sistemi (ARAS) üzerinde kaynak alanların girilmesinden sonra Conefall yazılımı sonucu Çoruh havzasındaki kaya düşmesi olası etki alanlarının dağılımı. (AFAD-ARAS, 2024).

Figure 2. Distribution of possible rockfall impact areas in the Çoruh basin based on Conefall software after entering source areas on the AFAD Disaster Risk Analysis Systems (AFAD-ARAS, 2024).

Çizelge 1. Konik yayılım açısına göre kaya düşmesi duyarlılıkları.

Table 1. Rockfall susceptibility classes according to conical spreading angle.

Konik Yayılım açısı β (°)	Duyarlılık Sınıfı
$38 \geq \beta$	Yüksek
$35 \leq \beta < 38$	Orta
$32 \leq \beta < 35$	Düşük

Ülkemizde de özellikle Doğu Karadeniz, Doğu Anadolu ve Orta Anadolu gibi jeomorfolojik açıdan sarp topografyaya sahip, jeolojik bakımdan yapısal unsurların denetimindeki kaya düşmesi kaynak alanlarının etki alanında çok sayıda yerleşke mevcuttur. Bu sahalara en iyi örneklerden biri de Çoruh havzası üzerindeki yerleşkelerdir.

Çoruh havzası, bölgenin geçirmiş olduğu tektonizma ve litolojinin kontrolünde günümüzdeki jeomorfolojisini kazanmıştır.

Havza boyunca oluşan sarp bir topografya ve kıvrımlı, kırıklı bir yapıya sahip heterojen bir litoloji söz konusudur. Havza içerisinde, yamaçlarda kurulu yerleşim alanlarının birçoğu dik/dike yakın yamaçları oluşturan kırıklı litolojik birimlerin alt kotlarında yer aldığından, kaya düşmesi riski altında bulunurlar.

Çalışmaya konu 3 farklı yerleşim alanının inşasında kaya düşmesi tehlike ve risklerinin yeteri kadar araştırılmadığı anlaşılmaktadır. Yerleşkelerde günümüze kadar muhtelif zamanlarda kaya düşmesi olayları meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak 3 yerleşim yeri geçen süre zarfında gerekli gelişimi gösterememiş, yapılaşmalar kısıtlı alanlar içerisinde kalmıştır.

Yusufuli İlçesi, Demirkent Köyü

Demirkent köyü Yusufuli ilçe merkezine yaklaşık 29 km kuzeydoğu mesafededir.

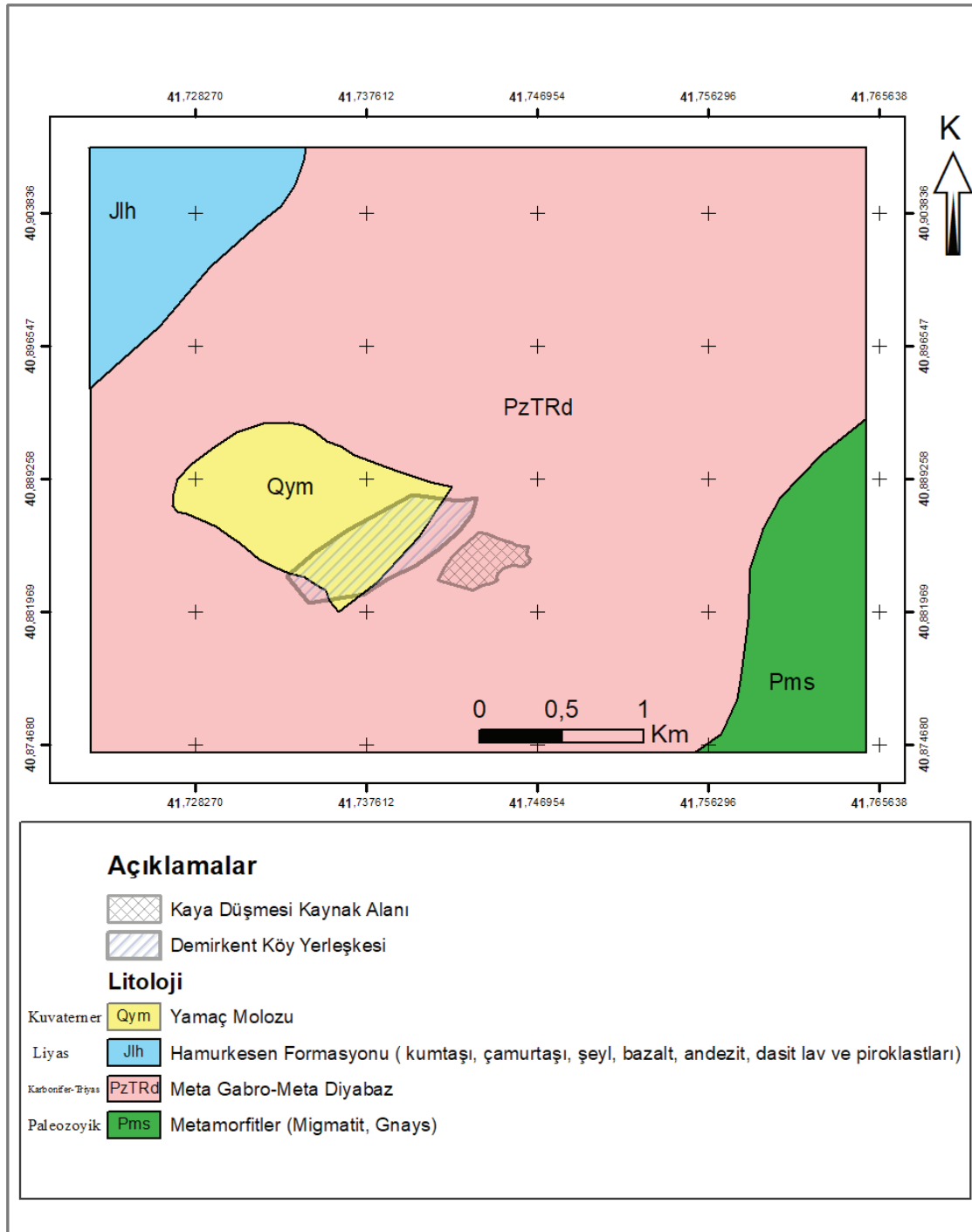
Demirkent Köyü ve yakın çevresinde Hamurkesen formasyonuna ait volkanitler, Karbonifer-Triyas yaşlı Meta Gabro - Meta Diyabaz ve Paleozoyik yaşlı Metamorfitletler gözlenir. Birimler genelde Orta-sık çatlaklı bir yapıya sahiptir. Doğrultuları Çoruh vadi doğrultusuna kısmen paralel diyabaz daykları izlenmektedir (Şekil 3).

Demirkent köy yerleşkesinin bulunduğu alanlar düşük eğimli alanları temsil ediyor olmasına rağmen, köy yerleşkesinin doğu yamaçlarında kaynak alan-köy yerleşkesi arasındaki eğim 35°'nin üzerine çıkar (Şekil 4). Orta-sık çatlaklı yapıya sahip kaya ortamı içerisindeki süreksizlikler genelde açık (nadiren kalsit dolgulu), az pürüzlü, dik/dike yakın açılı olup eğim yönleri ve doğrultuları bakımından çeşitlilik göstermektedir. Ancak sahada devamlılığı en fazla izlenebilen süreksizlikler, diyabaz dayk dokanakları boyunca vadi doğrultusuyla uyumlu olanlardır.

Süreksizlik ara uzaklığının 2 metrenin altına düştüğü zonlar boyunca açıklıklarının 0,5 cm ve üzerinde olan süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya bloklarının bulunduğu alanlar, kaya düşmesi kaynak alan niteliği taşımaktadır (Şekil 5). Yakın geçmişte de söz konusu kaynak alandan sıklıkla (yılıda 2 ve 3 defa) yaşanan kaya düşmesi olayları, köy yerleşkesinin kuzey doğusundaki kısmen düzlük/düşük eğimli topografyaya sahip alanlara doğru gelişmesini engellemektedir. Daha önceki yıllarda düşmüş olan kaya blokları incelendiğinde, düşmüş blok hacimlerinin 0,5 ile 2 m³ arasında değişen hacimlerde olduğu görülmektedir. Muhtemel kaya düşmesi olayı nedeniyle 2018 yılında Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne yapılan çalışmada, toplamda 260 haneli köy yerleşkesinde muhtemel kaya düşmesi etki alan sınırları içerisinde 66

konut, 1 okul ve 9 ahır tespit edilmiştir. Conefall yazılımı kullanılarak elde edilen yayılım zonu ile, daha önce düşmüş olan kaya bloklarının ulaştığı noktalar karşılaştırıldığında, yayılım sonucunda elde edilen yayılma zonunun gerçekte daha önce düşmüş olan kaya bloklarının ulaştığı en uzak mesafelerin birbiriyle uyumluluk gösterdiği görülmektedir (Şekil 6 ve Şekil 7). Mevcut durum itibariyle Demirkent köyünün kaya düşmesi afetine karşı dirençli bir yerleşke olmadığı tespiti ve sonrasında ilgili mevzuat gereği köy sakinlerinden kaya düşmesi riski altında olan konut maliklerinin daha güvenli bir alana nakli öngörülmüştür. Ancak Demirkent köyünde kaya düşmesi riskli alanlar içerisinde bulunan konutlar kaya düşmesi riski altında olmasına rağmen, köy sakinleri başka bir alana taşınmak istememişlerdir. Bu durumda Demirkent köy yerleşkesinin afete dirençli hale getirebilmek adına önlem projeleri geliştirilmiş ve sahada uygulanmıştır (Şekil 8).

Uygulanan imalatlar öncesinde kaynak alan ve yerleşim yeri arasındaki sahanın halihazır harita çalışmaları yapılmış, düşmesi muhtemel kaya bloklarının hacim ve konumları sayısal halihazır haritalar üzerine işlenmiştir. Düşmesi muhtemel blokların hacmi, geometrisi, buldukları konum, topografik veriler, kaynak alan-yerleşim alanı arasındaki yamaç özellikleri değerleri kullanılarak düşme analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonrasında hem güçlendirilmiş tel ağlar ile stabilizasyon, hem de koruma tip önlemler (çelik kaya bariyerleri) önerilmiş olup öneriler doğrultusunda saha imatları gerçekleştirilmiştir. Çelik kaya bariyerinin yüksekliği, kaya düşmesi analizlerinde belirlenen blok sıçrama yüksekliklerine göre; enerji kapasitesi ise bariyer imalatının bulunduğu hat üzerinde kaynak alandan düşen kaya bloğunun kazandığı toplam kinetik enerjiye göre belirlenmiştir.



Şekil 3. Yusufeli ilçesi Demirkent Köyü ve yakın çevresi jeoloji haritası (MTA, 2012).

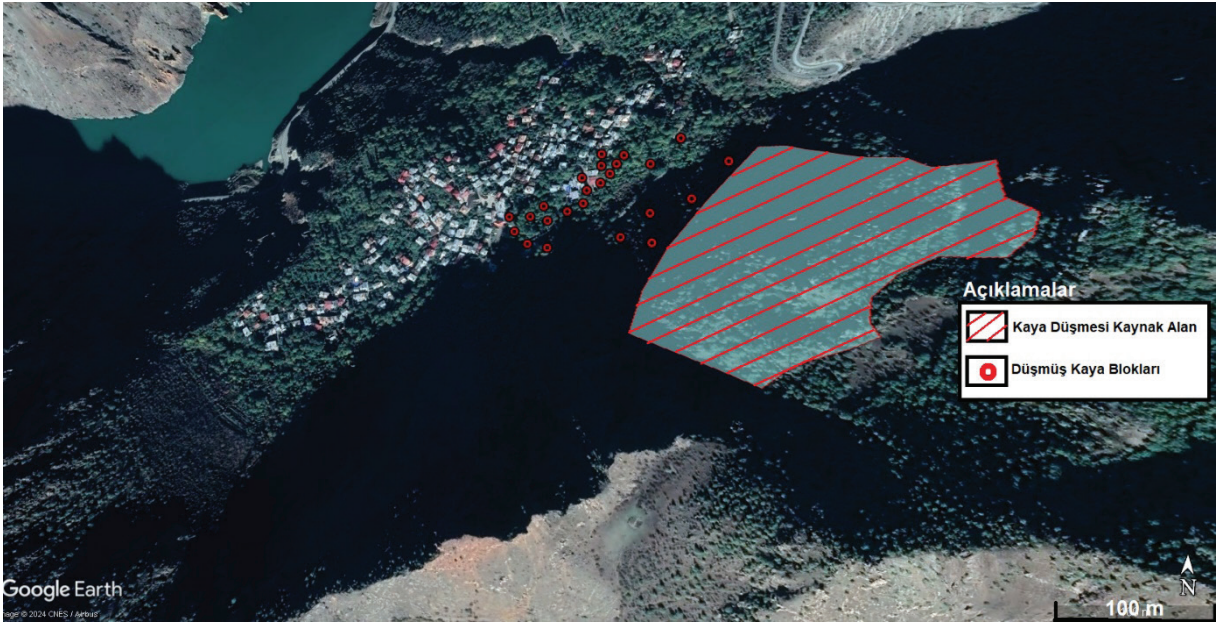
Figure 3. Geological map of Demirkent village and immediate surroundings in Yusufeli (MTA, 2012).

Durmuş, Coruk, Karakaş



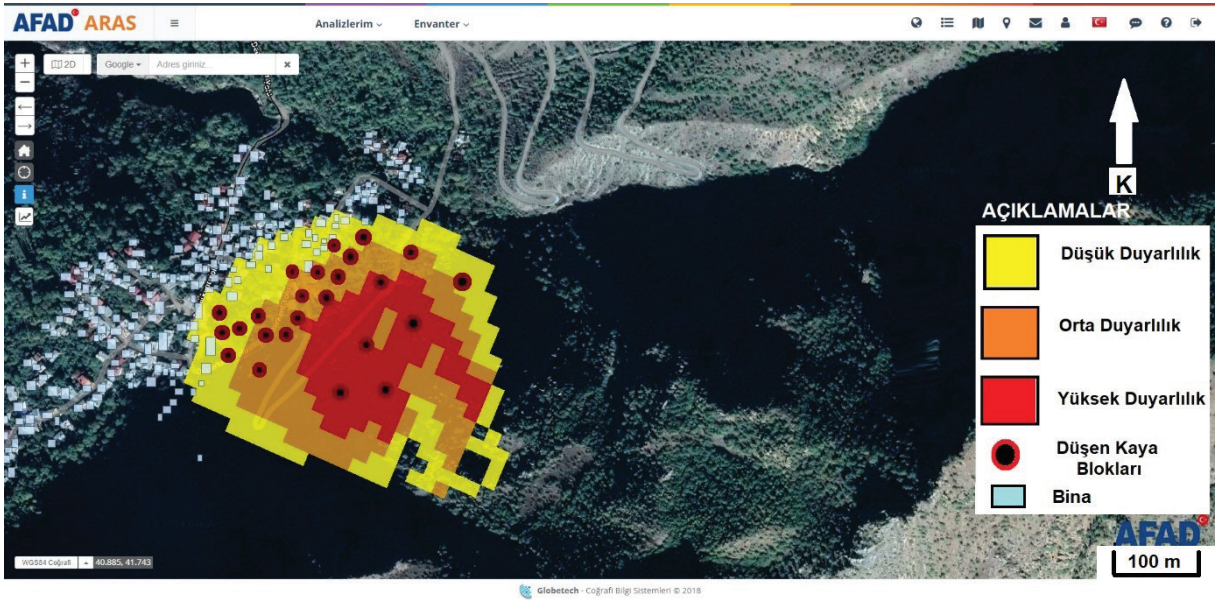
Şekil 4. Demirkent köyünün Google Earth görüntüsü.

Figure 4. Google Earth view of Demirkent village.



Şekil 5. Demirkent köyü yerleşkesi, kaynak alan ve değişik zamanlarda düşmüş 24 adet kaya bloğu konumlarının Google Earth görüntüsü.

Figure 5. Google Earth view of Demirkent village, source area and locations of 24 rock blocks that fell at different times.



Şekil 6. Demirkent Köyü yerleşkesi için Conefall yazılımı kullanılarak elde edilen kaya düşmesi etki alan sınırları (AFAD-ARAS, 2024).

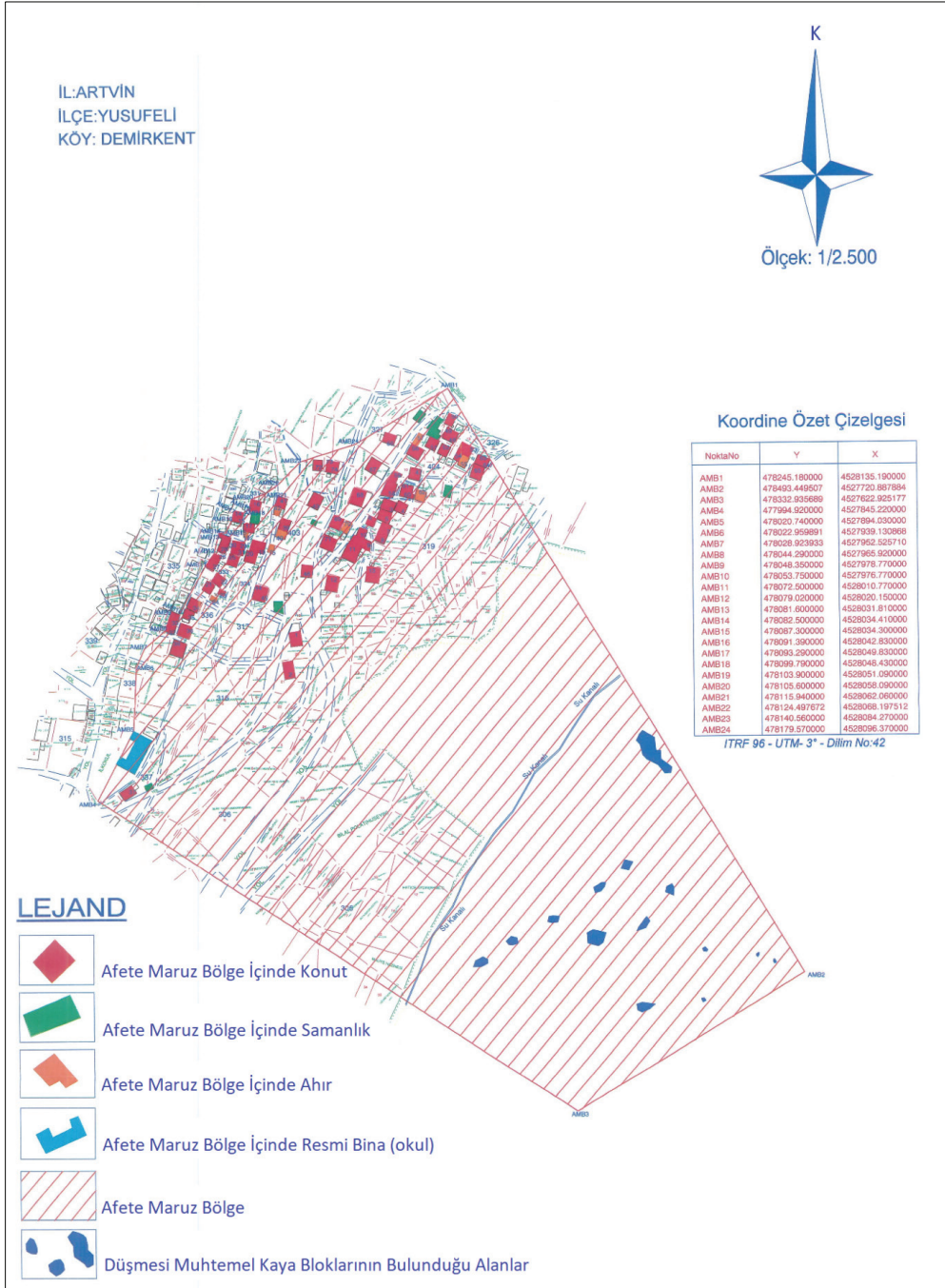
Figure 6. Rockfall impact area boundaries obtained by using Conefall software for Demirkent village (AFAD-ARAS, 2024).

Demirkent köyünde kaya ıslahı çalışmalarının yapıldığı tarihten (2018) günümüze kadar herhangi bir kaya düşmesi olayı görülmemiştir; Kaya düşmesi kaynak alanda çelik halatlarla güçlendirilmiş tel ağlar ile yapılan yüzey örtülemeleri (stabilizasyon türü önlem) ve alt kotlarda çelik kaya bariyerleri (koruma türü önlem) imatları yapılmıştır. Analizler sonucu elde edilen blok sıçrama yükseklikleri ve kazandıkları toplam kinetik enerji değerlerine göre bariyerlerin yükseklik ve

enerji kapasiteleri belirlenmiştir. Stabilizasyon türü önlem imatları sayesinde günümüze kadar çelik kaya bariyerlerinin enerjilerine eş (2000 Kj ve 1000 Kj) bir kaya düşmesi olayı bariyerlere ulaşmamıştır. Sahada, ıslaha yönelik yapılmış tüm uygulamalar, periyodik olarak sahada kontrol edilmekte olup buna bağlı olarak bakım çalışmaları da yapılmaktadır.

Böylelikle Demirkent Köyü'ne, kaya düşmesi afetine karşı dirençli bir yerleşke özelliği kazandırılmıştır.

Durmuş, Coruk, Karakaş



Şekil 7. Demirkent Köyünde düzenlenen jeolojik etüt sonucunda muhtemel kaya düşmesinden etkilenebilecek sahalara (Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 2018).

Figure 7. Areas that may be affected by possible rockfalls as a result of the geological investigations carried out in Demirkent village (Artvin Provincial Disaster and Emergency Directorate, 2018).



Şekil 8. Demirkent köyündeki kaya ıslahı çalışmalarının görünümü.

Figure 8. View of the rock reclamation works in Demirkent village.

Artvin Merkez İlçesi, Seyitler Köyü

Seyitler Köyü Artvin ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alır. Seyitler Köyü ve Artvin İl Merkezi birbirlerinden Çoruh Vadisiyle ayrılırlar (Şekil 11). Seyitler Köyü Carbiyet mahallesi üst kotlarında (doğusu) dik bir yamaç yüzeyine sahip, gri, koyu gri renkli, az-orta derecede dayanımlı ve orta-sık çatlaklı volkanitlerin oluşturduğu kaynak alan nedeniyle kaya düşmesi tehlikesi altında bulunur. Kaynak alan, bölgedeki tektonizma sonucu yanal yönlü yer değiştirme sonucu oluşan ütü altı yapısını temsil eder. Kaya ortamı içerisindeki süreksizliklerin geneli dik açılı olup doğrultuları

majör faya diktir (Şekil 12). Süreksizlik açıklıkları 20 cm'yi bulur. Eğim miktarları 45-70° arasında değişen diğer süreksizliklerin eğim yönleri KB-GD şeklindedir. Süreksizliklerin eğim yönleri ve açıları ile kaynak alan yamacının doğrultusu/eğim miktarı göz önüne alındığında devrilme, kamalanma şeklinde duraysızlıklar için duyarlı bir yamaç olduğu anlaşılmaktadır. Artvin şehir merkezinin kuzeydoğusundaki Seyitler köyüne doğru gelişmesi düşünülmüş, ancak Carbiyet mahallesindeki mevcut kaya düşmesi kaynak alanın kaya düşmesi bakımından duyarlı olması nedeniyle şehir, Çoruh vadisinin sağ sahili üzerindeki Carbiyet mahallesine doğru

Durmuş, Coruk, Karakaş

gelişim gösterememiştir. 1989 yılında Mülga Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğüne yapılan jeolojik etüt çalışması sonucunda 240 haneli Seyitler köyünde 19 konutun muhtemel kaya düşmesi etki alan sınırları içerisinde kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 13 ve Şekil 14).

Artvin Merkez İlçesi, Ortaköy Köyü, Yenice Mahallesi

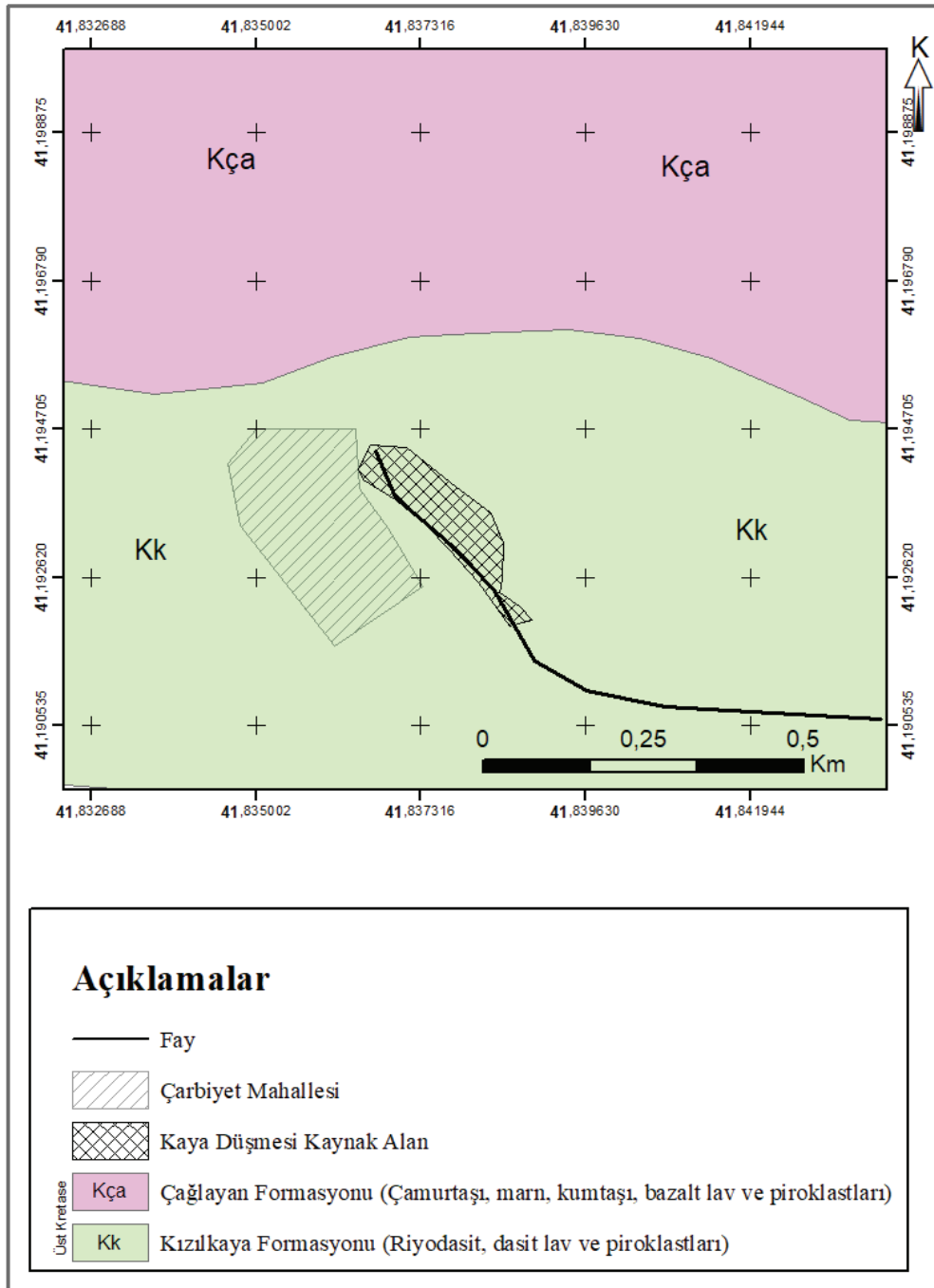
Ortaköy Köyü Yenice Mahallesi Artvin yerleşimi batısında yer alır (Şekil 13). Yenice mahallesi ve yakın çevresinde bazalt, andezit ve riyolitlerin izlendiği Üst Kretase yaşlı Çağlayan formasyonuna ait volkanitler yer almaktadır. Birimin kuzeyinde Kaçkar Granitoyidi sokulumları izlenmektedir (Şekil 14). Yaklaşık batı/güneybatıya 35-40°'lik bir topografik açıyla eğimli, konveks şekilli bir yamaç üzerinde dik/dike yakın açılı, orta-sık çatlaklı, orta derecede dayanımlı özellikler gösteren andezit, bazalt lav

ve piroklastikler gözlenmektedir. Süreksizliklerin açıklığı 15 cm'ye varmaktadır. Süreksizlik düzlemleri genelde pürüzlü, devamlılıkları 10-12 m civarındadır. Süreksizlik ara uzaklıkları 50 cm ile 5 m arasında değişmektedir. Geçmiş dönemlerde, 4-5 yılda 1-2 defa olmak üzere muhtelif defalar söz konusu alandan kaya düşmesi olayları yaşanmıştır. Volkanitlerin bulunduğu bu bölge, topografik eğimi ve süreksizlik özellikleri gereği kaya düşmesi kaynak alan olarak nitelenebilecek bir alandır. Kaya düşmesine karşı duyarlı bir yamaç yüzeyi altında bulunan Yenice Mahallesinde bu nedenle uzun yıllar yeni yapılaşmalar yapılamamakta ve mahalle gelişmemektedir. 2011 yılında Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından yapılan çalışmalarda 480 haneye sahip Ortaköy köyünde muhtemel kaya düşmesi etki alan sınırları içerisinde Yenice mahallesinde 31 adet konut tespit edilmiştir.



Şekil 9. Seyitler Köyü Carbiyet Mahallesi ve yakın çevresinin Google Earth görüntüsü.

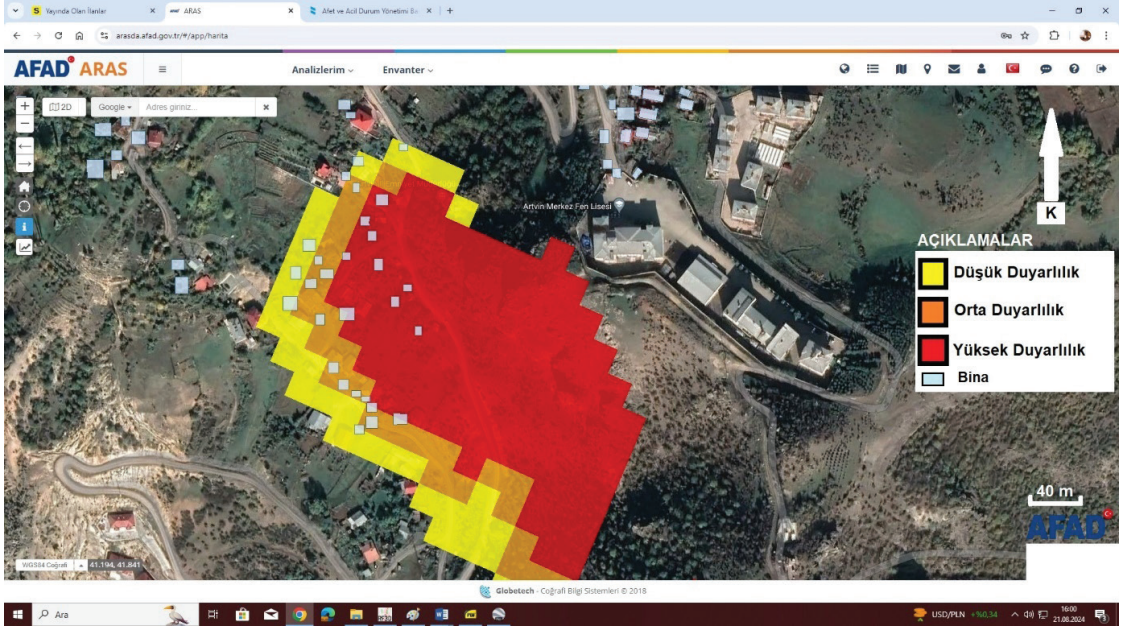
Figure 9. Google Earth view of Seyitler village Carbiyet neighborhood and immediate surroundings.



Şekil 10. Seyitler Köyü Carbiyet Mahallesi ve yakın çevresinin jeoloji haritası (MTA, 2012).

Figure 10. Geological map of Seyitler village Carbiyet neighborhood and immediate surroundings (MTA, 2012).

Durmuş, Coruk, Karakaş



Şekil 11. Seyitler Köyü yerleşkesi için Conefall yazılımı kullanılarak elde edilen kaya düşmesi etki alan sınırları (AFAD-ARAS, 2024).

Figure 11. Rockfall impact area boundaries obtained by using Conefall software for Seyitler village (AFAD-ARAS, 2024).



Şekil 12. Artvin şehir merkezinden Seyitler Köyü Carbiyet Mahallesi ve kaya düşmesi kaynak alanının görünümü.

Figure 12. View of Seyitler village Carbiyet neighborhood and rockfall source area from Artvin city center.



Şekil 13. Ortaköy köyü ve yakın civarının Google Earth görüntüsü.

Figure 13. Google Earth view of Ortaköy village and near surroundings.

Sahada, kaynak alan ve yerleşim yeri (Yenice mahallesi) arasındaki alanın halihazır haritaları çıkarılmıştır. Düşmesi muhtemel kaya bloklarının konumları, geometrileri ve hacimleri sayısal haritalar üzerine aktarılmıştır. Düşmesi muhtemel bloklara dair veriler (hacim, şekil, konum) ve topografik veriler (eğim, yamaç yüzeyindeki malzeme niteliği vb.) kullanılarak yapılan düşme analizleri sonucunda kaynak alan yamaç yüzeyinde çelik halatlar ve pasif ankrajlarla stabilizasyon ile birlikte daha alt kotlarda çelik kaya bariyeri uygulaması önerilmiştir. Önerilen imalatların tamamlandığı 2015 yılından günümüze kadar Ortaköy köyü Yenice mahallesi yerleşkesini etkileyen herhangi bir kaya düşmesi olayı meydana gelmemiştir. İmalat sonrası yapılan aylık rutin kontrollerde 16. ayda kaynak alan alt kotlarından 3000 Kj enerji sönmüleme kapasiteli kaya bariyerine gelen 1 adet kaya bloğunun daha düşük kinetik enerjiyle (150-200 Kj) bariyere ulaşmış olduğu tespit edilmiş olup sahada ıslah imalatlarının tamamının rutin kontrolleri ve bakımları yapılmaktadır. Yapılan ıslah çalışmalarıyla Ortaköy köyü Yenice

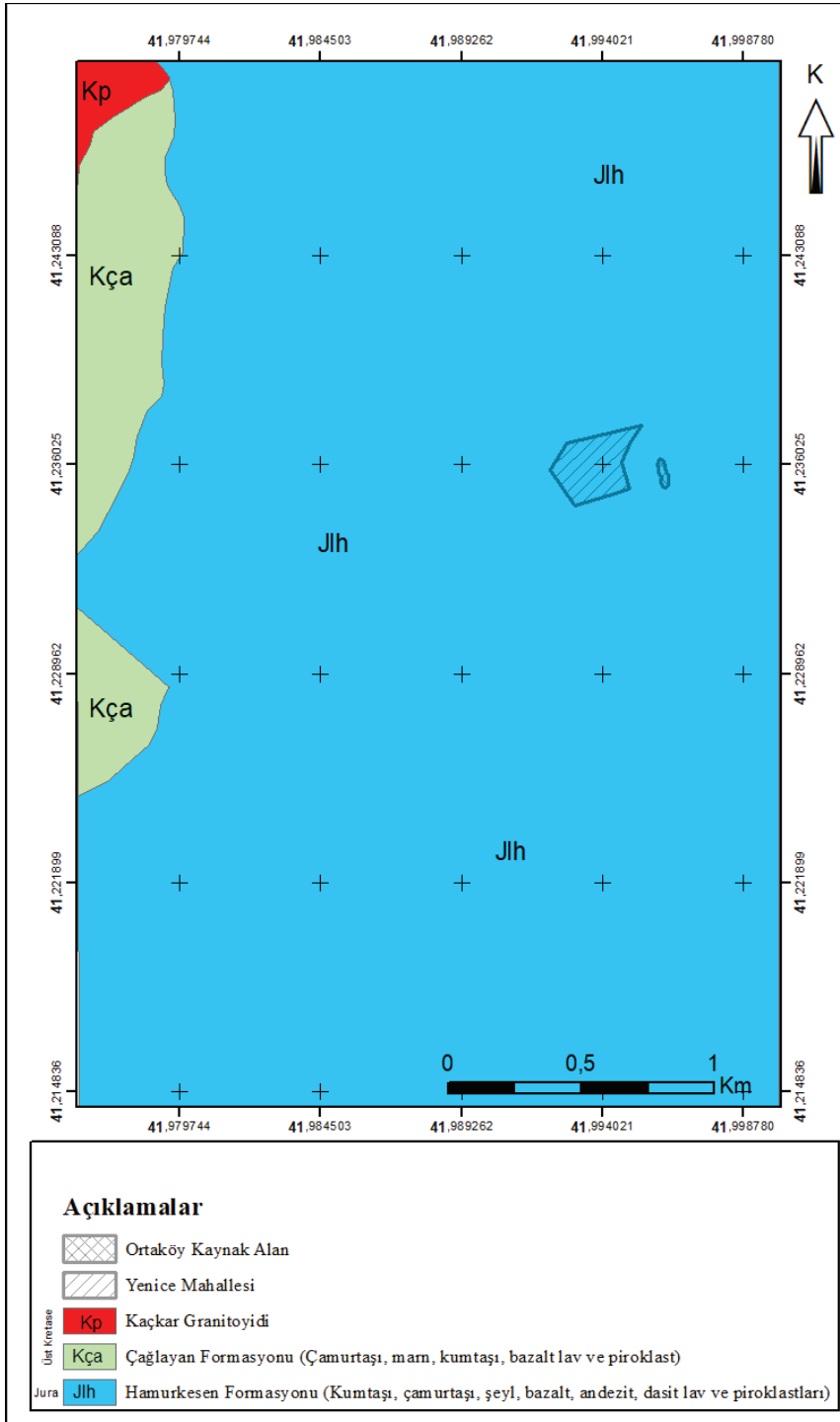
mahallesine kaya düşmesi afetine karşı dirençli bir yerleşke özelliği kazandırılmıştır (Şekil 16).

SONUÇLAR

Bu çalışma ile Artvin İl sınırları dahilinde, Çoruh havzası boyunca konuşlanmış olan yerleşkelerin kaya düşmesi sorunları ve kaya düşmelerinin mevcut yerleşkelerin planlama ve gelişmesine etkileri değerlendirmiştir.

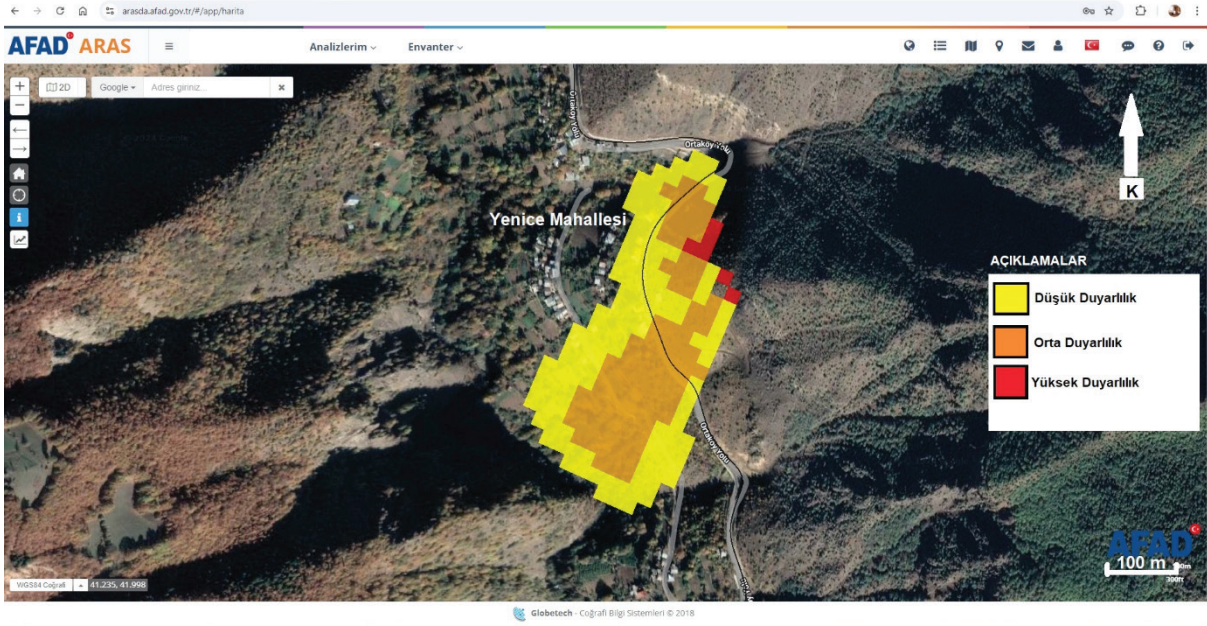
Yapılan duyarlılık analizleri sonucunda, Çoruh havzasındaki yerleşkelerin bulunduğu alanların ve yerleşkeler arasındaki ulaşım yol güzergahlarının büyük bir bölümünün topografik anlamda konik yayılım açılarının 38° ve üzerinde olduğu, kaynak alanlar ile yerleşkeler arasındaki topografik eğim değerlerinin de 35° 'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, Çoruh havzası genelindeki jeomorfolojinin kaya düşmeleri üzerine olan etkilerini de içerdiğinden, havza tamamının kaya düşmesi duyarlılık durumlarının görülebileceği 1/25.000 ölçekli sayısal haritalara işlenmiş kaynak alanlara göre duyarlılık analizi yapan Conefall yazılım sonuçları kullanılmıştır.

Durmuş, Coruk, Karakaş



Şekil 14. Ortaköy Köyü Yenice Mahallesi ve yakın çevresi jeoloji haritası (MTA, 2012).

Figure 14. Geological map of Ortaköy village Yenice neighborhood and immediate surroundings (MTA, 2012).



Şekil 15. Ortaköy Köyü yerleşkesi için Conefall yazılımı kullanılarak elde edilen kaya düşmesi etki alan sınırları (AFAD-ARAS, 2024).

Figure 15. Rockfall impact area boundaries obtained by using Conefall software for Ortaköy village (AFAD-ARAS, 2024).



Şekil 16. Ortaköy köyündeki kaya ıslahının görünümü.

Figure 16. View of rock reclamation in Ortaköy village.

Kaynak alanları oluşturan jeolojik formasyonlar içerisindeki kırık ve çatlak süreksizliklerine sahip litolojinin varlığı da dikkate alındığında, Çoruh havzası içerisindeki

yerleşkelerin bulunduğu alanların kaya düşmesi riski bakımından yüksek riskli alanlar oldukları sonucu elde edilmiştir.

Durmuş, Coruk, Karakaş

İnceleme alanı litolojileri jeoloji-mühendislik jeolojisi özellikleri dikkate alındığında, havza KD kesiminin kaya düşmelerine karşı havza GB kesimine göre daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir.

Kaya düşmesi riski altındaki köy yerleşkelerinde, köy sakinleri mevcut risklere rağmen yerlerini terk etmemektedirler. Bu durum, mevcut yerleşkelerin kaya düşmesi afetine karşı dirençli hale getirilebilmesi için önlem projelerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Mevcut yerleşkelerin kaya düşmesi afetine karşı korunaklı, güvenli hale getirilebilmesi için önerilen projelerin uygulanabilirliği aşamalarında çalışma alanlarının kısıtlılığı ve çalışma alanı alt kotlarında mevcutta yerleşkenin oluşu nedeniyle dikkat ve hassasiyet gerektiren, maliyetli uygulamalardır.

Mevcut yerleşkelerde tespit edilen kaya düşmesi tehlike ve risklerine karşı afet önleyici tedbirler bakımından önerilen mühendislik çözümleri sahanın topografik ve jeolojik özelliklerine uygun, uygulanabilir önlemler olmalıdır. Önlem yapılarının projelendirme aşamalarında sahada daha önceki dönemlerde meydana gelmiş kaya düşmesi olayları, düşme sonrası hareket yönleri ve senaryoları, hareket yönü boyunca yamaç yüzeyinin fiziksel özellikleri (yamacı oluşturan jeolojik birimlerin özellikleri, taze kaya yüzeyi olması durumunda yüzey pürüzlülüğü, bitki örtüsü vb.) ile kaynak alandaki süreksizliklerin mühendislik özellikleri, düşmesi muhtemel blokların şekli, hacmi ve kütleleri, coğrafi konumları ve de kaynak alan ile yamacın sayısal topografik verileri ayrıntılı olarak çalışılmalıdır. Bir kaya düşmesi kaynak alandan itibaren düşmesi muhtemel bir kaya bloğunun ulaşabileceği en uzak mesafenin ve düşme sırasında alabileceği yol güzergâhlarının tespiti için yukarıda belirtilen verilerin eksiksiz

elde edilmesi gerekir; koruma önlemi olarak konulabilecek bir enerji sönümleyici bariyerin doğru hat üzerine yerleştirilmesi, veya stabilizasyon önlemi için pasif ankraj ve çelik halatlarla ve de ağlarla yapılacak imalatlar için ya da güvenli düşürme işlemleri için bu verilerden yararlanılmalıdır. Söz konusu verilerin elde edilebilmesi de kuşkusuz süreç gerektirmektedir.

Çoruh havzası içerisinde kurulacak yeni yerleşkeler veya gelişim sahaları için yapılacak mikrobölgeleme etütlerinde bölgenin heterojen bir litolojiye sahip olduğu unutulmamalı, kaya düşmeleri konusunda yapılacak detay analizlerin sonuçları planlamada görev alan diğer mühendislik disiplinleriyle paylaşılmalı, planlama aşamasında ortak bir dil kullanılabilmelidir.

Yerleşkelerin planlanması aşamalarında kaya düşmelerine yönelik mevcut duyarlılık ve tehlikenin tespiti sonrasında kaya düşmesi tehlikesinin ortadan kaldırılması için yapılacak yatırım maliyetleri, yapılaşma süreci tamamlanmış bir yerleşkenin kaya düşmesi tehlike ve risklerinin bertaraf edilmesi için harcanan ıslah maliyetlerinin daha altında olacağı gibi, planlama aşamasında yapılacak çözümler mühendislik açısından daha verimli ve daha uzun ömürlü olacaktır.

Çoruh havzası gibi heterojen litolojiye ve sarp topografik yamaçlara sahip sahalar için planlanabilecek yerleşkelere dair yapılacak yeni bir planlamada, kaya düşmelerine karşı kaynak alan envanterleri oluşturularak gerekli analizler sonuçlandıktan sonra geleceğe dönük planlamalar yapılmalıdır.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, çalışmada kullanılan verileri sağlayan İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum

Yönetimi Başkanlığına ve Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2024). Afet risk analiz sistemleri. Ankara, Türkiye: AFAD Yayınları.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020). Kaya düşmelerinden kaynaklı afetlerin değerlendirilmesine yönelik kaynak kılavuz. Ankara, Türkiye: AFAD Yayınları.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (Mülga Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü). (1989). Artvin İli Merkez ilçesi Seyitler Köyü jeolojik etüt raporu. Ankara, Türkiye: AFAD Yayınları.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü. (2012). Artvin İli, Merkez ilçesi, Ortaköy Köyü jeolojik etüt raporu. Ankara, Türkiye: AFAD Yayınları.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü. (2018). Artvin İli Yusufeli ilçesi Demirkent Köyü jeolojik etüt raporu. Ankara, Türkiye: AFAD Yayınları.
- Agliardi, F., & Crosta, G. (2003). High-resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 455–471. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2)
- Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K., & Topal, T. (2021). 3-Boyutlu kaya düşme analizlerinde TLS ve İHA ile oluşturulan sayısal yüzey modellerinin kullanımı. *Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu*, 455–462.
- Baltzer, A. (1875). On a recent rockfall on Rossberg with a few observations on these phenomena in the Alps. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, 914–924.
- Bozzolo, D., & Pamini, R. (1986). Simulation of rockfalls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63(1), 113–130. <https://doi.org/10.1007/BF01182518>
- Dorren, K. A. L. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Doyuran, V. (1976). Environmental geology problems of Ortahisar. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 19, 83–88.
- Wyllie, D. C. (2014). *Rockfall engineering: Development and calibration of an improved model for analysis of rockfall hazards on highways and railways*. Vancouver, Canada: University of British Columbia.
- Düzgün, H., Akgün, A., & Gheibie, S. (2012). Kaya düşmeleri ve kaya şev kaymaları için risk analizine dayalı mühendislik çözümlerinin değerlendirilmesi (Proje No: 110M796). Ankara, Türkiye: ODTÜ Yayınları.
- Eroskay, O. (1970). Laleli-Taşköy derivasyon tüneli jeoloji raporu. Ankara, Türkiye: EİE Yayınları.
- Ertunç, A. (1980). Çoruh Havzası olası baraj yerleri, göl alanları ve tünel güzergahlarının mühendislik jeolojisi incelemesi. Ankara, Türkiye: EİE Yayınları.
- Wang, I.-T., & Lee, C.-Y. (2012). Simulation and statistical analysis of motion behavior of a single rockfall. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 1–10.
- Hoek, E. (2023). *Practical rock engineering*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
- Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü. (1998). Artvin ilinin çevre jeolojisi. Ankara, Türkiye: MTA Yayınları.
- Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü. (2012). Artvin F47-F48-G46-G48 paftaları sayısal jeoloji haritaları. Ankara, Türkiye: MTA Yayınları.
- Nasery, M., & Çelik, M. (2020). Kaya ıslahı çalışmalarında birleşik çözümlerin incelenmesi: Trabzon Kaymaklı örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 539–554.
- Pierson, L. A., & Van Vickie, R. (1993). *Rockfall hazard rating system: Participant's manual*

Durmuş, Coruk, Karakaş

- (Publication No. SA-93-057). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Polat, A., Keskin, İ., & Denizli, İ. (2016). Kaya düşmesi önleme yöntemlerine bir örnek: Çelik bariyer uygulaması (Gürün - Sarıca). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 40(1), 81–96.
- Quanterra. (2016). Conefall (v1.0.). Retrieved from <https://quanterra.ch/resources/software/>
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 1–35.
- Schweigl, J., Ferretti, C., & Nossing, L. (2003). Geotechnical characterization and rockfall simulation of slope: A practical case study from South Tyrol, Italy. *Engineering Geology*, 67(3), 281–296. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00210-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00210-8)
- Tunusluoğlu, C., & Zorlu, K. (2009). Rockfall hazard assessment in cultural and natural heritage: Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey. *Environmental Geology*, 56(5), 963–972. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1197-y>
- Varol, O., Akın, M., Orhan, A., & Dinçer, İ. (2023). Kaya düşmelerinin 3 boyutlu olasılıksal analizlerle ve ampirik yöntemlerle değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 47(1), 1–28. <https://doi.org/10.24232/jmd.1267107>
- Zorlu, K., Tunusluoğlu, C., Görüm, T., Nefeslioğlu, H. A., Yalçın, A., & Gökçeoğlu, C. (2011). Landform effect on rockfall and hazard mapping in Cappadocia, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 62(8), 1685–1693. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0636-7>



Araştırma Makalesi / Research Article

EnMAP Hiperspektral Uydusunun Batimetri Kabiliyeti *Bathymetry Capability of EnMAP Hyperspectral Satellite*

Mehmet Ali AKGÜL 

DSİ 6. Bölge Müdürlüğü, Bilgi Teknolojileri Şube Müdürlüğü,
Coğrafi Bilgi Sistemleri Başmühendisliği, Adana, Türkiye

Geliş (Received): 16.10.2024 / Düzeltme (Revised): 06.11.2024 / Kabul (Accepted): 02.12.2024

ÖZ

Rezervuardaki su miktarı göl gözlem istasyonları vasıtasıyla anında tespit edilebilirken, bu değer en son üretilen batimetrik haritaya dayalı olarak hesaplanan miktarı temsil etmektedir. Rezervuara su girişi beraberinde sedimantasyonu da getirmekte, bu da rezervuarda su hacmini azaltmaktadır. Batimetrik haritaların periyodik olarak üretilmesi bu tür değişikliklerin tespiti için gereklidir. Çalışma alanı olarak seçilen Seyhan Barajı, Türkiye'nin güneyinde Çukurova bölgesinde yer almakta olup sulama, taşkın kontrolü ve enerji üretimi amacıyla inşa edilmiştir.

Bu çalışmada, hiperspektral EnMAP uydu verisi ile bağımsız bileşen analizi (ICA), temel bileşen analizi (PCA) ve log oran dönüşümü (LRT) olmak üzere üç yöntem kullanılarak uydu-kaynaklı batimetri (SDB) haritaları üretilmiştir. Ağustos-Eylül 2019 tarihleri arasında sonar yöntemiyle ölçülen batimetrik harita ile 2024 tarihli uydu görüntüsü kullanılarak üretilen SDB haritaları arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonucunda, Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçları açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ortalama hata (ME) sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, yüzde yanlılık (PB) istatistikleri sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği görülmüştür. Tahminlerin standart hataları da hesaplanmış, en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın bulguları, hiperspektral EnMAP uydu verilerine dayalı olarak SDB haritalarının üretilmesi aşamasında en uygun analiz yönteminin seçilmesini sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Uydu Kaynaklı Batimetri, Hiperspektral uydu, EnMAP

ABSTRACT

The quantity of water present within a reservoir can be ascertained with immediate effect through the utilization of lake observation stations. However, it should be noted that this figure represents a value derived from the most recently produced bathymetric map. The influx of water into the reservoir is accompanied by sedimentation, which results in a reduction in the volume of water within the reservoir. The periodic production of bathymetric maps is essential for the detection of these changes. The Seyhan Dam, which was selected as the study area, is situated in the Çukurova region of southern Turkey and was constructed for the purposes of irrigation, flood control and power generation. In this study, satellite-derived bathymetry (SDB) maps were produced using hyperspectral EnMAP satellite data, employing three methods: independent component analysis (ICA), principal component analysis (PCA) and log ratio transformation (LRT). The relationship between the bathymetric map, which was measured by the sonar method between August and September 2019, and the SDB maps, which were produced using satellite images dated 2024, was examined. The results of the study indicated that PCA1 with 0.811 and LRT with 0.790 yielded the most optimal outcomes in terms of Pearson correlation coefficient (r) results. In terms of mean error (ME) results,

ICA2 was -11.822 and LRT was -12.027, while in terms of percentage bias (PB) ICA2 and LRT yielded -113.907 and -96.640, respectively. Additionally, the standard errors of the estimates were calculated, and the LRT method yielded the most optimal result with a value of 0.102. The findings of this study will facilitate the selection of the most appropriate analysis method for the production of SDB maps based on hyperspectral EnMAP satellite data.

Keywords: *Satellite-Derived Bathymetry, Hyperspectral satellite, EnMAP*

GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği, nüfus artışı ve sanayileşme nedeniyle temiz suya olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu sebeple, su kaynaklarını korumak için yeni su depolama yapıları inşa edilmekte ve mevcut yapılar gözden geçirilmektedir. Su depolama yapılarında biriken sediman, su hacmini azaltmaktadır ve bu değişim, batimetrik haritalar ile izlenmektedir. Teknolojik gelişmelerle sonar gibi çağdaş yöntemlerin yanı sıra, uzaktan algılama teknikleri de kullanılmaktadır. Bu haritalar, su depolama kapasitesindeki değişiklikleri ve sediman birikim oranlarını belirlemede önemli rol oynamaktadır ve baraj yönetim birimlerine fayda sağlamayı amaçlamaktadır.

Tang vd. (2015) Malezya'nın Langkawi Adası'nda Landsat 8 uydu verilerini kullanarak korelasyon katsayısını 0.90, ortalama kare hatasını (MSE) ise 1.52 m olarak bulmuşlardır. Pacheco vd. (2015) ise Portekiz'in Ria Formosa kıyı şeridinde Landsat 8 kullanarak derinliği 0-12 m arasında değişen bölgelerde MSE'yi 0.89 m olarak rapor etmişlerdir. Bu çalışma, optik algılama sistemlerinin hassasiyetinin derinlikle azaldığını ve özellikle koy gibi bulanıklığın yüksek olduğu yerlerde doğruluğun düştüğünü ortaya koymuştur. Snyder vd. (2016) Haiti açıklarında askıda tortu nedeniyle su derinliğinin optimum seviyeye ulaşmadığını gözlemlemiş ve bu tür alanların uydu batimetrik haritalarından hariç tutulması gerektiğini önermiştir. Bu nedenle, çok zamanlı uydu verileri kullanarak mevsimsel ve bölgesel değişikliklere dikkat etmişlerdir.

Smith vd. (2017) iki farklı yöntem olan log lineer dönüşüm (LLT) ve log oran dönüşümü (LRT) metodlarını karşılaştırmış ve LRT'nin daha etkili olduğunu bulmuştur. Mateo-Pérez vd. (2020) İspanya'daki iki limanda Sentinel-2 verilerini kullanarak destek vektör makinesi (SVM) ile batimetrik haritalar oluşturmuş ve bu haritaları sonar verileriyle kıyaslamışlardır. Sonuçlar tutarlıdır ve bu yöntemin kirli ve bulanık sular için maliyet etkin ve pratik olduğunu belirtmişlerdir. Tang vd. (2021) Malezya'nın Tanjung Kupang bölgesinde Landsat 8 verileri ile Dierssen ve Stumpf modellerini kullanarak batimetrik haritalar üretmişlerdir. Sonuçlar, her iki modelin de başarılı olduğunu ve potansiyel uygulama alanlarına işaret etmiştir. Le Quilleuc vd. (2022) Mayotte adasında Pleiades-1 ve ICESat-2 uydu verileri ile 15 m derinliğe kadar 89 cm hassasiyet elde etmiştir. Mudiyansele vd., (2022) Florida kıyılarında Sentinel-2 uydu verilerini kullanarak lidar batimetri verileri ile karşılaştırmalar yapmış ve 0-13.5 m derinlikte %8 RMS değeri elde etmişlerdir. Son olarak, Kwon vd. (2024) Kore Yarımadası çevresinde Sentinel-2 verilerini kullanarak rastgele orman algoritması ile batimetrik haritalar üretmiş ve sonar verileriyle karşılaştırmıştır. En doğru sonuçların, en berrak suyun bulunduğu Samcheok bölgesinde elde edildiği görülmüştür.

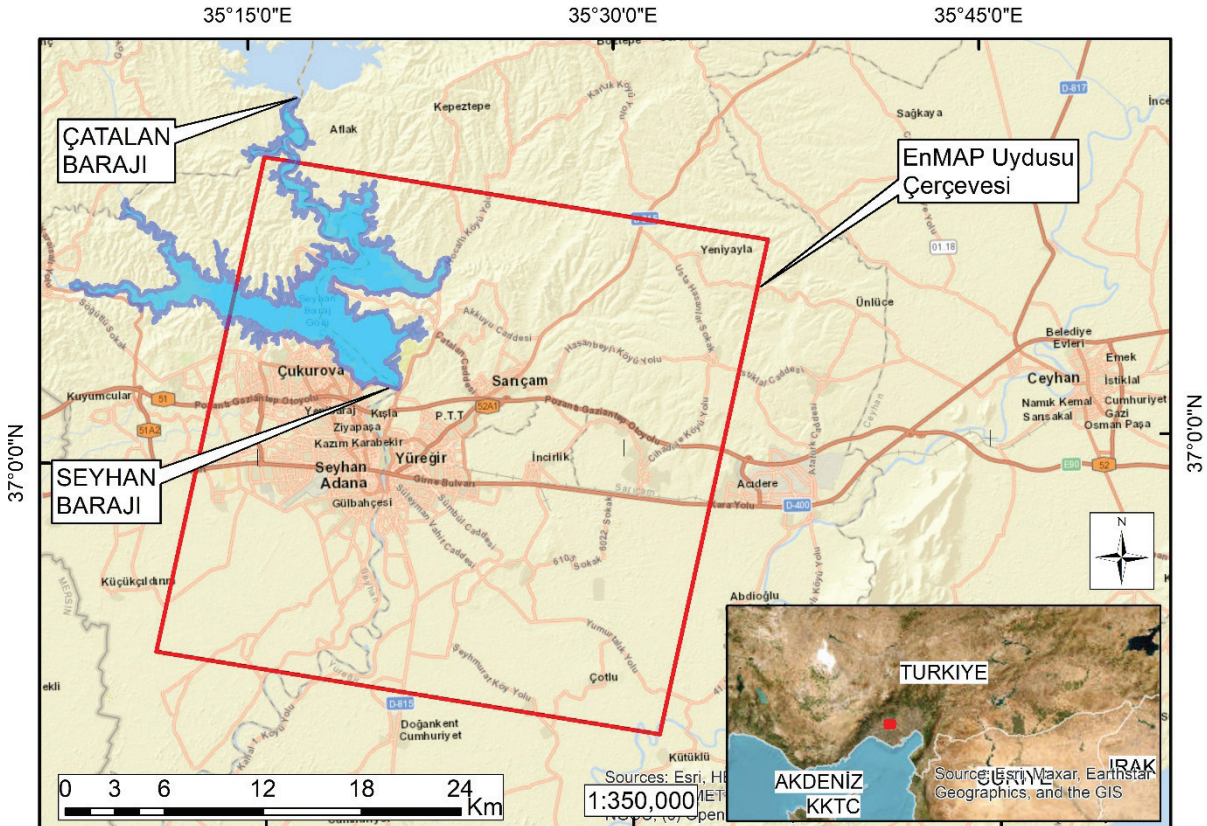
Bu çalışmanın amacı, görevde ikinci yılını dolduran EnMAP hiperspektral uydusunun uydu-kaynaklı batimetri (Satellite-Derived Bathymetry, SDB) kabiliyetini araştırmaktır. Bunun için bağımsız bileşen analizi (Independent

Component Analysis, ICA), temel bileşen analizi (Principal Component Analysis, PCA) ve log oran dönüşümü (Log Ratio transformation, LRT) yöntemleriyle göreceli su derinliği (Relative Water Depth, RWD) haritaları üretilip bu veriler sonar ile ölçülen derinlikler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada istatistiksel analiz olarak Pearson korelasyon katsayısı (r), ortalama hata (ME) ve yüzde yanlışlık (PB) istatistikleri kullanılmış olup noktaların tamamı analiz edilmiş, ayrıca beşer metre derinlik farklı ile çalışma altı ayrı sınıfa ayrılarak tekrar analiz edilmiştir.

ÇALIŞMA ALANI VE MATERYAL

Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak seçilen Seyhan Barajı, Türkiye'nin güney bölgesinde Seyhan Nehri üzerinde yer almaktadır. Sulama, enerji ve taşkın koruma gibi kritik işlevleri yerine getirmek üzere 1956 yılında işletmeye alınmıştır. Baraj şu anda Aşağı Seyhan Ovası'nın sulanması için ana su kaynağıdır (IECO, 1966; DSİ, 2014). Çalışma alanının konumu Şekil 1'de verilmiştir.



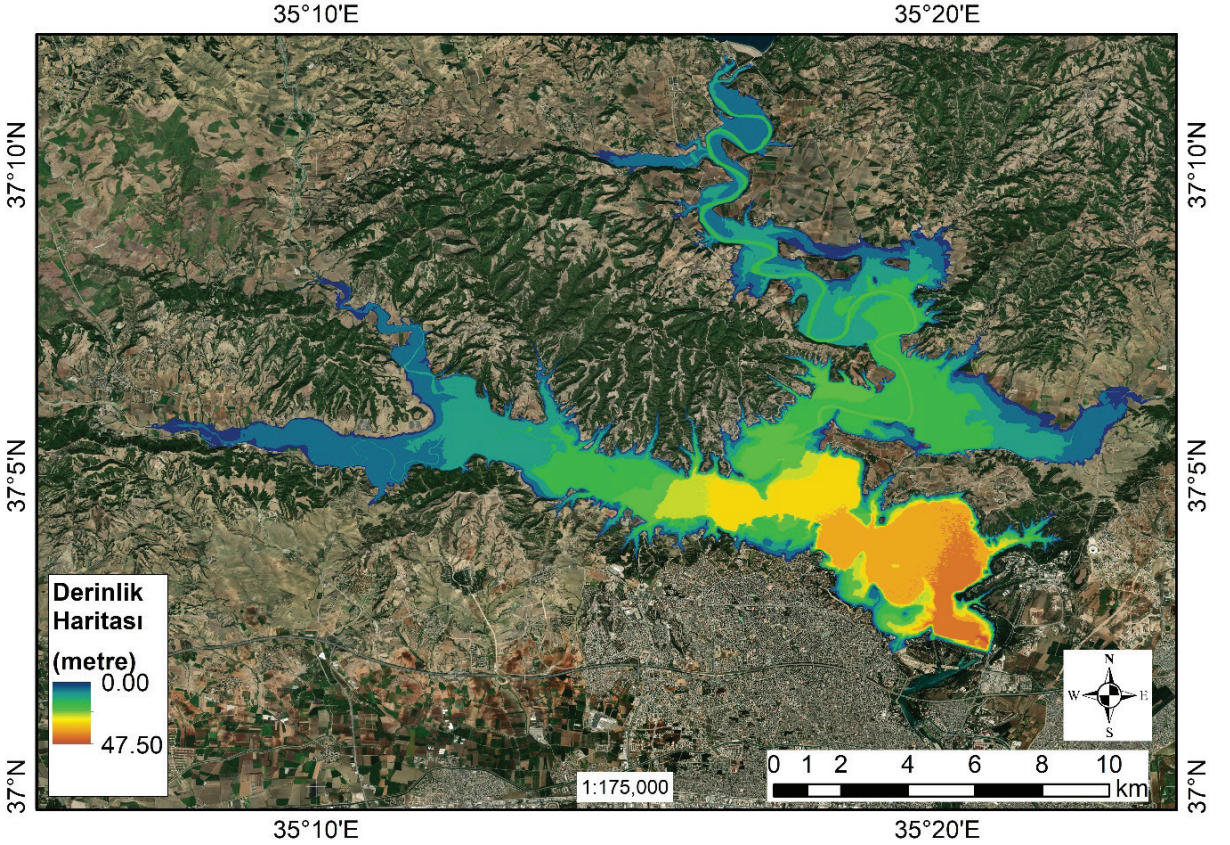
Şekil 1. Çalışma alanı.

Figure 1. Study area.

Batimetrik harita

Seyhan Barajı'nın batimetrik haritası sonar kullanılarak üretilmiş ve araştırmalar Ağustos-Eylül 2019'da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1 Adet Zodiac Bot ve 1 Adet Kontra 4.50 m polietilen bot (190EN) kullanılmıştır. Batimetrik ölçümler, 0.2-1000 m ölçüm aralığına sahip bir Hydrostar Elac 4300 Çift Frekanslı Echo Sounder (33 kHz ve 210 kHz), çift frekanslı bir Ashtech Promark 800 GPS ve Leica Sistem 1200 GPS entegre sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sudaki ses hızının ölçülmesi ve kaydedilmesi için

AML Base X kullanılmış, ölçüler baraj rezervuar tabanından her metre derinlik için ölçülmüştür. Hesaplarda her metre derinlik için o derinliğe karşılık gelen ses hızı dikkate alınmış ortalama değer kullanılmamıştır (DSİ, 2019). Seyhan Barajı batimetrik harita çalışmaları 41 gün sürmüş olup toplam 553461 nokta ölçülmüştür. Seyhan Barajı kreti baz alınarak hazırlanan batimetrik haritası Şekil 2'de verilmiştir. Rezervuarın en derin noktasının baraj kretinden 47.50 m kadar derin olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Seyhan Barajı batimetrik haritası.

Figure 2. Bathymetric map of Seyhan Dam.

Seyhan Barajı batimetrik haritaları 1966, 1971, 1976, 1980, 1986 ve 1991 yıllarında klasik yöntemlerle, 2005 ve 2019 yıllarında ise sonar ile ölçülmüştür (Fakıoğlu, 2005; Akgül vd., 2024). Akgül vd. (2024) Seyhan Barajının inşaatından önce yersel olarak yapılan karasal harita ile 1966-2019 yılları arasında yapılan 8 adet batimetrik haritayı kullanarak yaptıkları çalışma sonucunda, rezervuardaki su hacminin 1956-1980 yılları arasında %1.22/yıl, 1980-2019 yılları arasında ise %0.074/yıl oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Baraj rezervuarındaki su miktarındaki azalmanın yani sediman birikim miktarının 1980 yılından itibaren durağan bir döneme girdiği görüldüğünden çalışmada 2019 batimetrik haritasına karşılık 2024 yılı uydu verisinin kullanılabileceği düşünülmüştür.

Uzaktan algılama verisi

Hiperspektral uydu verilerine erişebilmek, geniş bir arşive sahip olan multispektral uydu verilerine göre daha zor olup teknolojik gelişmelere paralel olarak giderek kolaylaşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan *Çevresel Haritalama ve Analiz Programı* (The Environmental Mapping and Analysis Program, EnMAP), sık aralıklarla yüksek kaliteli hiperspektral görüntü verileri sağlayan bir Alman hiperspektral uydu misyonudur. Misyonun temel amacı, tarım ve ormancılık, jeoloji ve toprak, kentsel alanlar, kıyı ve iç sular gibi çeşitli alanlarda araştırma ve uygulama için karasal ve sucul ekosistemlerin durumu ve gelişimi hakkında doğru ve teşhis edici bilgiler sağlamaktır. EnMAP, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) tarafından başarılı görev operasyonları sağlamak için ilgili tüm yönleri kapsayacak şekilde işletilmektedir. Bu, çoklu görev altyapılarını kullanarak uydunun kontrol edilmesi ve komuta edilmesinin yanı sıra veri

alımı, kalibrasyon dahil hiperspektral veri işleme, veri arşivleme, veri dağıtımı ve uluslararası kullanıcı topluluğuna web arayüzleri sağlamayı içerir (DLR, 2023). ABD’de Cape Canaveral uzay üssünden Falcon 9 roketiyle 01.04.2022 tarihinde fırlatılan EnMAP uydusu ve üzerinde bulunan hiperspektral görüntüleme algılayıcısı Alman uzay şirketi OHB tarafından üretilmiştir (NASA, 2024).

EnMAP üzerinde VNIR (Görünür/Yakın Kızılötesi) ve SWIR (Kısa Dalga Kızılötesi) olmak üzere iki adet algılayıcı bulunmaktadır. VNIR algılayıcısı, 91 bant üzerinde 4.7 nm ile 8.2 nm (ortalama 6.4 nm) arasında spektral örnekleme mesafesi ile 418.2 nm ile 993.0 nm arasındaki spektral aralıkta algılama yapmaktadır. SWIR algılayıcısı ise 902.2 nm ile 2445.5 nm arasındaki spektral aralıkta algılama yapmakta olup 155 bant üzerinde 7.5 nm ile 12.0 nm (ortalama 10.0 nm) arasında spektral örnekleme mesafesine sahiptir fakat güçlü atmosferik emilimin olduğu aralıklardan kaçınmak için sadece 133 bant aktarılmaktadır (Storch vd., 2023).

Çalışmada kullanılacak EnMAP uydu verisinin özellikleri *Çizelge 1’de*, çerçevesi ise *Şekil 1’de* görülmektedir.

EnMAP uydu verileri, Seviye-1B, Seviye-1C ve Seviye-2A olmak üzere üç farklı ürün seviyesinde sunulmaktadır. Seviye-1B ürününde sistematik ve radyometrik düzeltme ile ham görüntü piksel değerlerinin sensör içi radyans fiziksel değerlerine dönüştürmesi yapılır. Seviye-1C ürününde ise geometrik düzeltme ve farklı yöntemler kullanarak görüntülerin ortorektifiye edilmesi gerçekleştirilir (Bachmann vd., 2021). Seviye-2A ürününde, Seviye-1C ürünlerinin kara ve su uygulamaları için ayrı ayrı yansımalara dönüştürülmesi yapılmaktadır. Bu iki farklı veri seti kullanıcıya ilgi alanına göre (kara, su veya her ikisi) en uygun görüntüyü seçme

imkânı vermektedir. Seviye-2A ürünüde ayrıca atmosferik düzeltme işlemi de yapılmıştır. Bu işlem, su yüzeyleri için güneş yansıması haritalarının oluşturulması, pus ve bulut tespiti, aerosol optik kalınlığının ve su buharı sütunun tahmin edilmesi ile bu düzeltmelerin uygulanması ile yapılmaktadır (Storch vd., 2023).

Çizelge 1. EnMAP uydusu özellikleri (DLR, 2023).

Table 1. EnMAP satellite features (DLR, 2023).

Yörünge özellikleri		
Yörünge/Eğim	Güneş eşzamanlı / 97.96°	
Zamansal	27 gün (Zenit Açısı<5°) / 4 gün	
Çözünürlük	(Zenit Açısı<30°)	
Ekvator Geçiş saati	11:00 s. ± 18 dak. (yerel saat)	
Cihaz özellikleri	VNIR (görünür / yakın kızılötesi)	SWIR (kısa dalga kızılötesi)
Spektral aralık	420 -1000 nm	900 - 2450 nm
Spektral örnekleme aralığı	6.5 nm	10 nm
Spektral bant genişliği (FWHM)	8.1 ± 1.0 nm	12.5 ± 1.5 nm
Sinyal-gürültü oranı (SNR)	> 400:1 @495 nm	> 170:1 @2200 nm
Spektral kalibrasyon hassasiyeti	0.5 nm	1 nm
Yersel Çözünürlük	30 m (deniz seviyesinde)	
Tarama genişliği	30 km (görüş açısı= 2.63° şerit boyunca)	
Alım uzunluğu	1000 km/yörünge - 5000 km/gün	

Bu çalışmada, <https://eoweb.dlr.de> sitesinden temin edilen 14 Ağustos 2024 tarihine ait L2A- DT0000089572 isimli EnMAP uydu görüntüsü kullanılmış olup veri en gelişmiş ürün olan Seviye-2A ürünüdür.

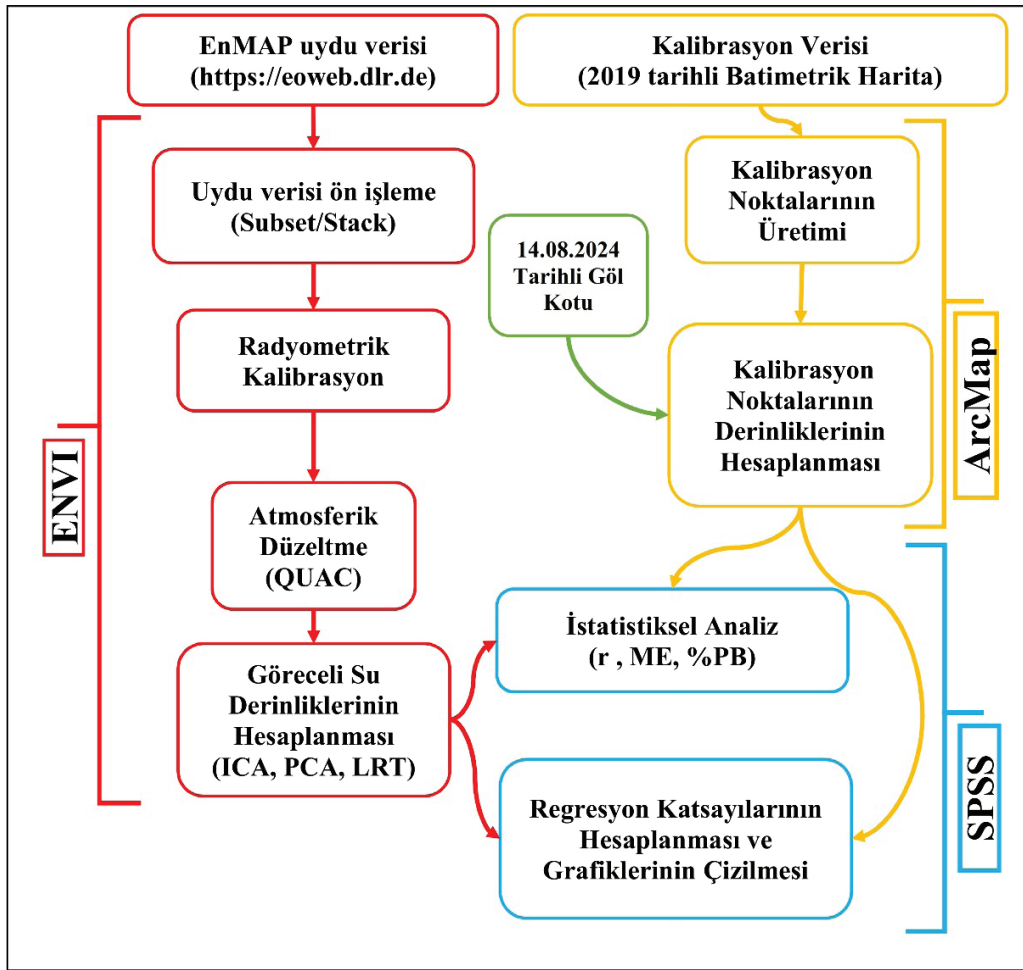
YÖNTEM

EnMAP uydu verisi <https://eoweb.dlr.de> adresinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılmadan önce görüntülerin radyometrik kalibrasyonu (Canty, 2014) ve atmosferik düzeltmeleri yapılmıştır (Bernstein vd. 2005). Ön işleme aşamalarının tamamlanmasının ardından görüntüler kullanılarak RWD haritaları üretilmiştir. Bu, ENVI yazılımının SPEAR RWD modülüne entegre edilen Bağımsız bileşen analizi (ICA), Temel bileşen analizi (PCA) ve Log Oran Dönüşümü (LRT) yöntemlerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma Şekil 3'de gösterilen akış diyagramına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Uydu Kaynaklı Batimetri (SDB) yöntemleri Bağımsız Bileşen Analizi yöntemi

Bağımsız bileşen analizi (ICA), karıştırma hakkında önceden bilgi gerektirmeyen bir kör kaynak ayırma yöntemidir (Tharwat, 2021) ve Gauss olmayan bağımsız kaynakların varsayımına dayanarak hiperspektral veri kümelerindeki ayırt edici özellikleri tanımlar (Hyvarinen, 1999; Hyvarinen vd., 2000). Uzaktan algılamada ICA, boyut azaltma görüntü özelliklerinin çıkarılması, anomali ve hedef tespiti, sınıflandırma, gürültü azaltma ve haritalama gibi çeşitli tekniklerde kullanılır (NV5, 2024a).

ICA, PCA tekniğinin bir ileri adımı olarak kabul edilir ve orijinal verilerden kaynak sinyalleri veya faydalı bilgileri çıkarmak için güçlü bir araç olarak kabul edilir. PCA, ikinci dereceden istatistikleri temsil eden verilerin kovaryans matrisini optimize etme ilkesini izlerken, ICA basıklık gibi daha yüksek dereceli istatistikleri optimize etme ilkesini izler. Bu nedenle, PCA'nın ilişkisiz bileşenler, ICA'nın ise bağımsız bileşenler ürettiği söylenebilir (Raschka ve Mirjalili, 2017; Saha vd., 2021).



Şekil 3. Çalışmanın akış şeması.

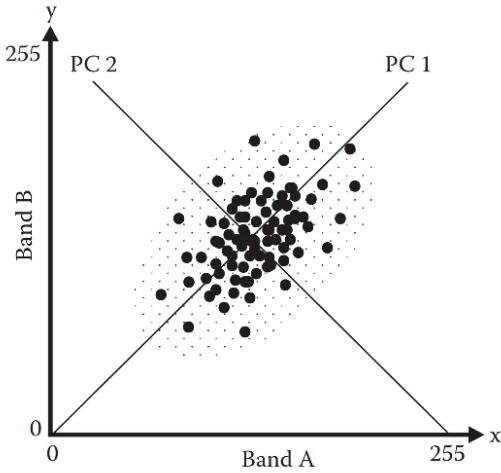
Figure 3. Flowchart for the study.

Temel Bileşen Analizi yöntemi

Temel bileşen analizi (PCA), çok bantlı görüntülerdeki veri varyansını yeni, ilişkisiz bantlara düzenleyen doğrusal bir dönüşümdür (NV5, 2024b). PCA, veri boyutunun azaltılması ve özellik çıkarımı gibi amaçlarla yaygın olarak kullanılır (Richards, 1993; Schowengerdt, 1997). PCA, veri koordinatlarını döndürerek veri setindeki en önemli bilgileri, kovaryans matrisinden elde edilen öz değerlerin büyüklüğüne göre önceliklendirir (Chang, 2003).

Birbiriyle ilişkili değişkenlerden oluşan çok değişkenli bir veri kümesini, orijinal değişkenlerin yeni ilişkisiz doğrusal kombinasyonlarından oluşan ortogonal olan yeni bir eksen kümesine dönüştürür. Üçten fazla bant eklendiğinde, elipsin boyutu bir hiperelipsoide dönüşür. Temel bileşenler fikri artık elipsin/elipsoidin ana eksenlerine paralel yeni spektral veri eksenleri oluşturmaktır. Bu şekilde, ortaya çıkan ilk temel bileşen PCA1, elipsin en uzun olan ana eksenine karşılık gelmekte olup sonraki tüm bileşenler ilk

bileşene diktir (Pohl vd., 2016). İki boyutlu bir durum için PCA1 ve PCA2'yi gösteren grafik Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. PCA1 ve PCA2'yi temsil eden yeni koordinat sistemi (Pohl vd., 2016).

Figure 4. New coordinate system representing PCA1 and PCA2 (Pohl et al., 2016).

PCA, öngörücü modellerin oluşturulmasından önce keşifsel veri analizi için bir kaynak araç olarak kullanılmakta olup temel avantajı, yüksek boyutlu bir uzaydan düşük boyutlu bir uzay üretirken varyansı mümkün olan en büyük ölçüde korumak ve böylece modeli boyutsallıktan korumaktır (Saha vd., 2021). PCA'nın güçlü yönleri hiperspektral verileri kullanarak sınıflandırma modelleri oluşturmada en yaygın kullanılan boyutsallık azaltma tekniği haline getirmektedir (Rojas-Moraleda vd., 2017; Erkinbaev vd., 2019).

Log Oran Dönüşümü yöntemi

Log Oran Dönüşümü (LRT) yaklaşımı ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından geliştirilmiştir ve su derinliğini taban albedodan bağımsız bir şekilde hesaplamak için Formül 1'de verilen ampirik bir denklem kullanmaktadır (Stumpf vd. 2003).

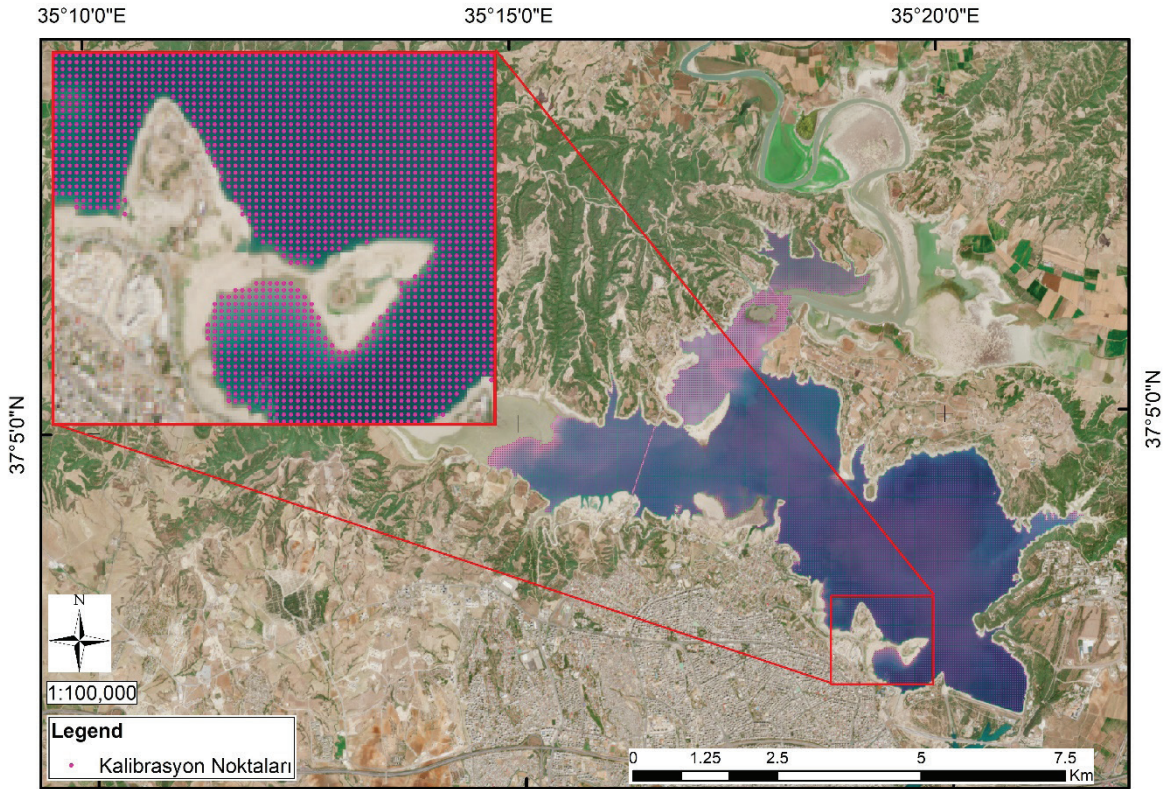
$$Z = m_1 \left(\frac{\ln(nL(\lambda_i))}{\ln(nL(\lambda_j))} \right) - m_0 \quad (1)$$

n, m1, m0 değerleri sabit katsayılar, Z derinlik, L(λ_i) mavi bandın radyans değeri ve L(λ_j) yeşil bandın radyans değeridir.

LRT yaklaşımı, suyun farklı bantlar tarafından emiliminin değiştiği varsayımına dayanır ve bu nedenle, her bant için soğurulma oranının derinliğe göre değişmesi beklenir. Derinliğin bu oran doğrultusunda artması öngörülmektedir (Stumpf vd., 2003). LRT, yansıtıcılığın zayıf olduğu sığ denizlerde, diğer modellere göre derinlik tahmininde daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Said vd., 2017).

Kalibrasyon noktalarının üretimi

Kalibrasyon noktaları ESRI (2011)'de açıklanan metodoloji kullanılarak ArcMap'te oluşturulmuştur (Şekil 5). Her pikselin merkezine bir adet nokta olacak şekilde üretilen noktalar toplamda 26935 adettir. Ayrıca çalışmada EnMAP uydusunun farklı derinliklerde de kabiliyeti test edilmiş olup kalibrasyon noktaları 6 ayrı gruba ayrılmıştır. Derinlik olarak 0-5 metre arasında 6578 nokta, 5-10 metre arasında 3015 nokta, 10-15 metre arasında 6312 nokta, 15-20 metre arasında 4878 nokta, 20-25 metre arasında 6076 nokta ve 25-31 metre arasında 76 nokta kalibrasyonda kullanılmıştır. Rezervuar su kotu, EnMAP uydusunun geçtiği 14 Ağustos 2024 tarihinde göl gözlem istasyonundan 56.047 metre olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. Kalibrasyon noktalarının konumu.
Figure 5. Location of calibration points.

İstatistikler

EnMAP uyduları tarafından üretilen batimetrik haritalar ile sonar ile oluşturulan haritalar arasındaki ilişki, istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Korelasyon verileri, Pearson korelasyon katsayısı (r), ortalama hata (ME) ve yüzde sapma (PB) gibi karşılaştırmalı istatistiklerle analiz edilmiştir. Bu istatistiklerin nasıl hesaplandığı Formül (2), (3) ve (4) 'de gösterilmiştir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(C_i - \bar{C})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2) \cdot (\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2)}} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - G_i) \quad (3)$$

$$PB = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (4)$$

Bu formüllerde: G = Sonar derinliği, \bar{G} = Sonar derinlik ortalaması, C = RWD değeri, \bar{C} = RWD değerlerinin ortalaması, N = Veri sayısıdır.

Gözlenen ve beklenen değerler arasındaki ilişkiyi ölçen r istatistiği -1 ile 1 arasında bir değere sahiptir; sifıra yakın değerler ilişki olmadığını, bire yakın değerler ise güçlü bir ilişkiyi gösterir. İstatistik, 0.5'ten büyükse kabul edilebilir olarak değerlendirilir (Van Liew vd., 2003). Ortalama hata (ME) istatistiği, aşırı (pozitif) veya düşük (negatif) tahminleri tespit ederken, yüzde sapma (PB) istatistiği tahmin

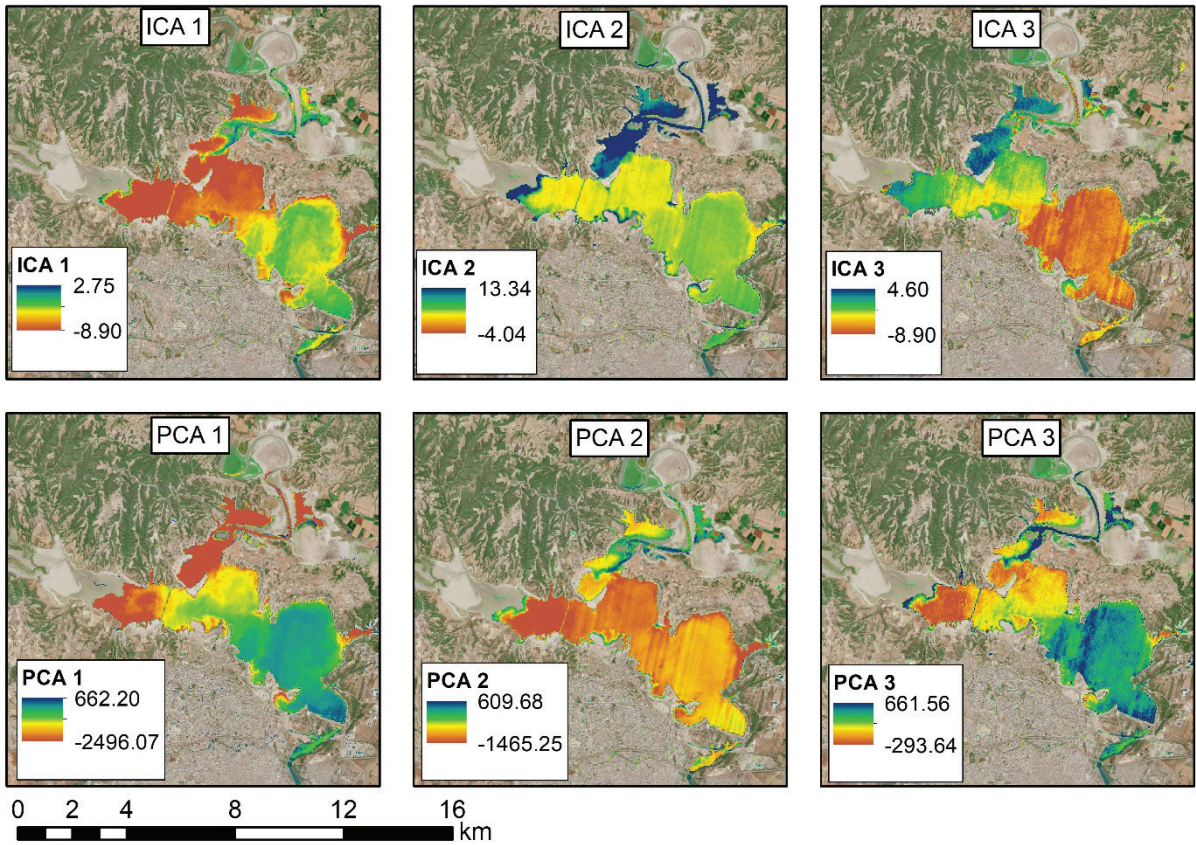
ve gözlem verileri arasındaki eğilimi hesaplar. PB değeri sıfıra yakınsa, tahmin ve gözlemler arasındaki bağlantı güçlüdür; pozitif değerler düşük, negatif değerler ise yüksek tahmini gösterir (Gupta vd., 1999).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular

Hiperspektral EnMAP uydu görüntüleri kullanılarak RWD haritaları oluşturulmuştur. Görüntüler, SPEAR RWD modülü ile ICA, PCA

ve LRT yöntemleri kullanılarak üretilmiş olup ICA ve PCA RWD haritaları Şekil 6'da LRT RWD haritası Şekil 7'de verilmiştir. Özellikle ICA2, ICA3 ve PCA2 RWD haritalarında derin bölgelerin negatif, sığ bölgelerin pozitif değerler aldığı görülmüştür. Bu sonuç Çizelge 2'de verilen r istatistik sonuçlarına negatif korelasyon olarak yansıdığı gibi Şekil 8'de verilen regresyon grafiklerinde de regresyon doğrusunun yönünü aşağı yönlü olmasına sebep olmuştur.



Şekil 6. ICA ve PCA RWD haritaları.

Figure 6. ICA and PCA RWD maps.

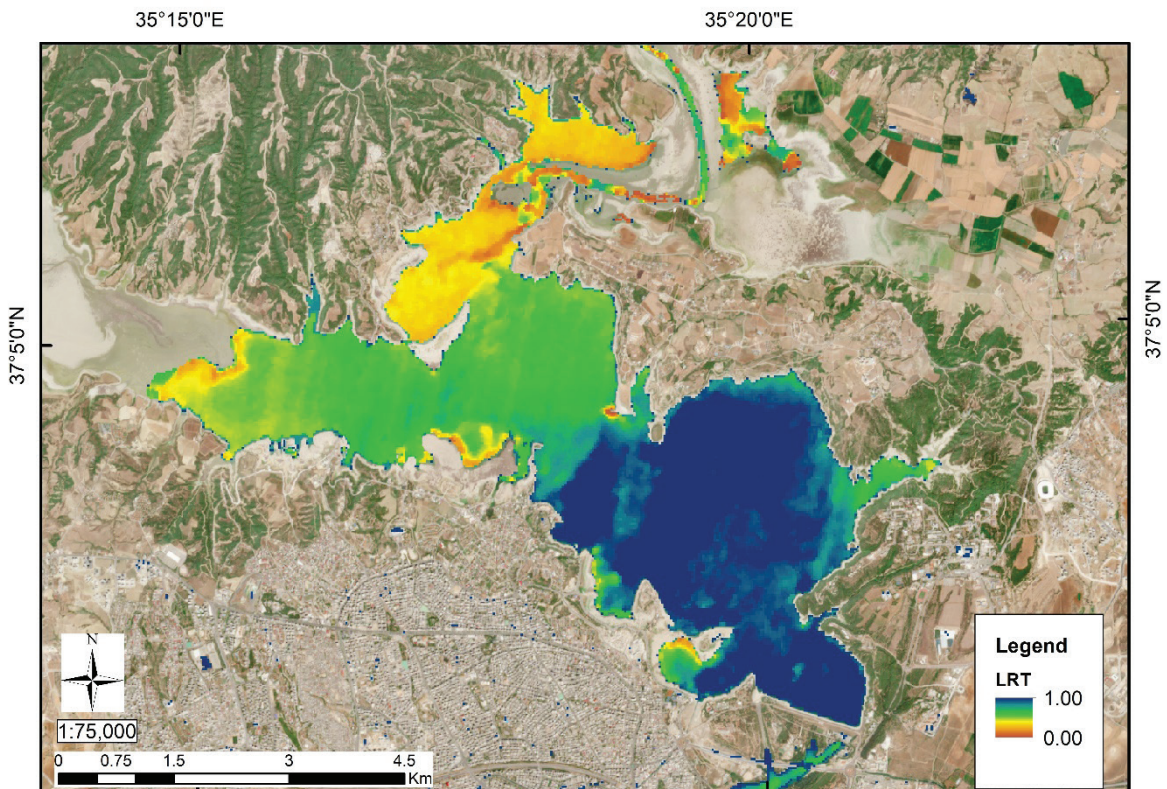
ICA1, PCA1, PCA3 ve LRT RWD haritalarında da rezervuarın derin bölgelerinden sıg bölgelere doğru haritadaki piksel değerlerinin düştüğü görülmüş olup bu sonucun Çizelge 2'deki r istatistiği sonuçlarına yansıdığı ve Şekil 8'de gösterilen regresyon grafiklerinden de anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, üç ICA, üç PCA ve LRT yöntemleri kullanılarak yedi farklı RWD haritası üretilmiştir. Bu haritalar daha sonra 2019 yılında sonar kullanılarak üretilen gerçek batimetrik harita ile karşılaştırılmıştır.

İstatistiksel analizlerde, SPSS programı (Huizingh, 2007) yardımıyla Formül (1), (2) ve (3)'de verilen formüller kullanılmış ve r, ME

ve PB istatistiklerinin sonuçları ile tahminin standart hatası (Std. Err. of Est.) elde edilmiştir (Çizelge 2).

Analiz sonucunda, Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçları açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ortalama hata (ME) sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, yüzde yanlışlık (PB) istatistikleri sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği, tahminlerin standart hataları incelendiğinde ise en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. Her üç istatistik sonucu ve tahminin standart hataları incelendiğinde LRT sonucunun öne çıktığı görülmüştür.



Şekil 7. LRT RWD haritası.

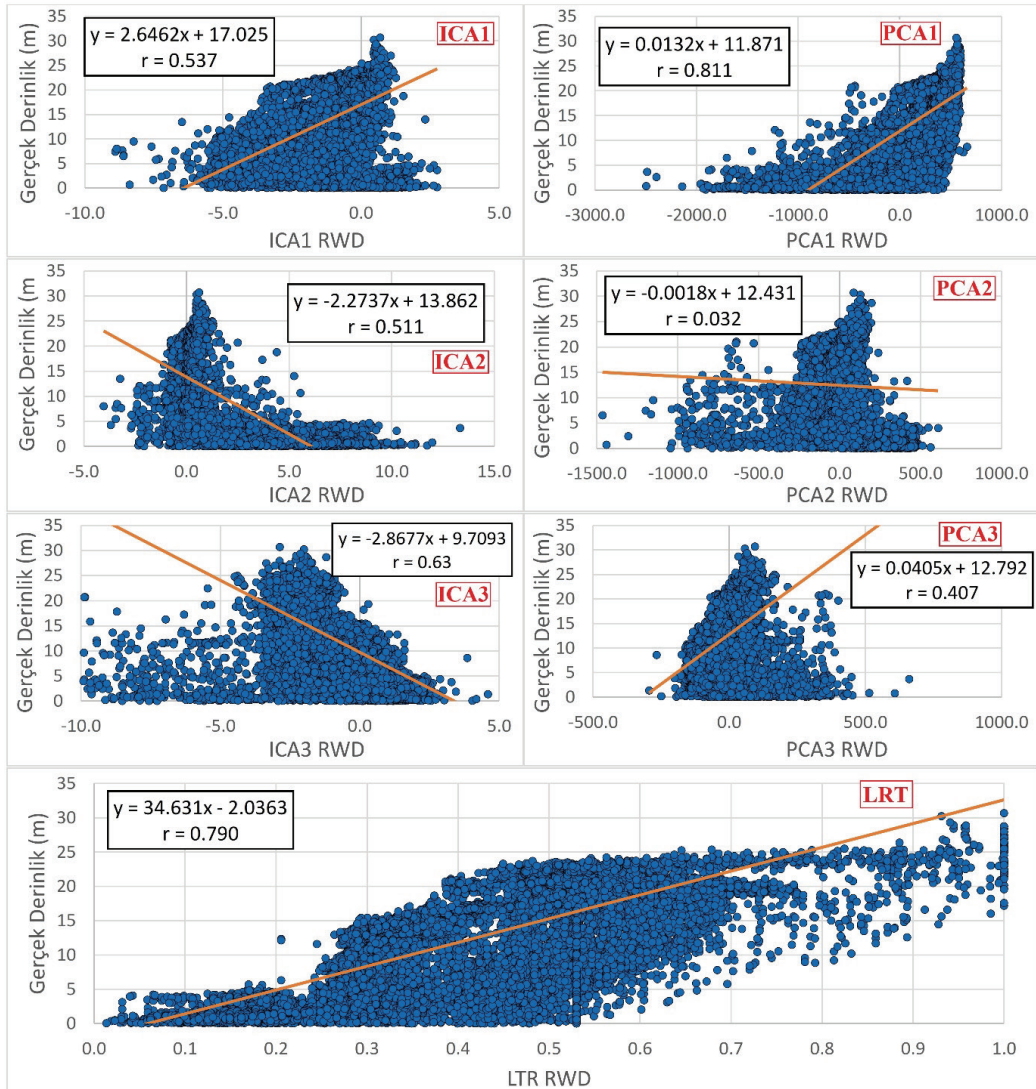
Figure 7. LRT RWD map.

Akgül

Çizelge 2. Analiz sonuçları.

Table 2. Analysis results.

Sta.	ICA1	ICA2	ICA3	PCA1	PCA2	PCA3	LRT
r	0.537	-0.511	-0.630	0.811	-0.032	0.407	0.790
ME	-14.176	-11.822	-13.399	31.190	-20.037	-21.012	-12.027
PB	-113.907	-94.993	-107.665	250.623	-161.008	-168.840	-96.640
Std. Err	1.251	1.412	1.247	263.478	133.150	67.006	0.102

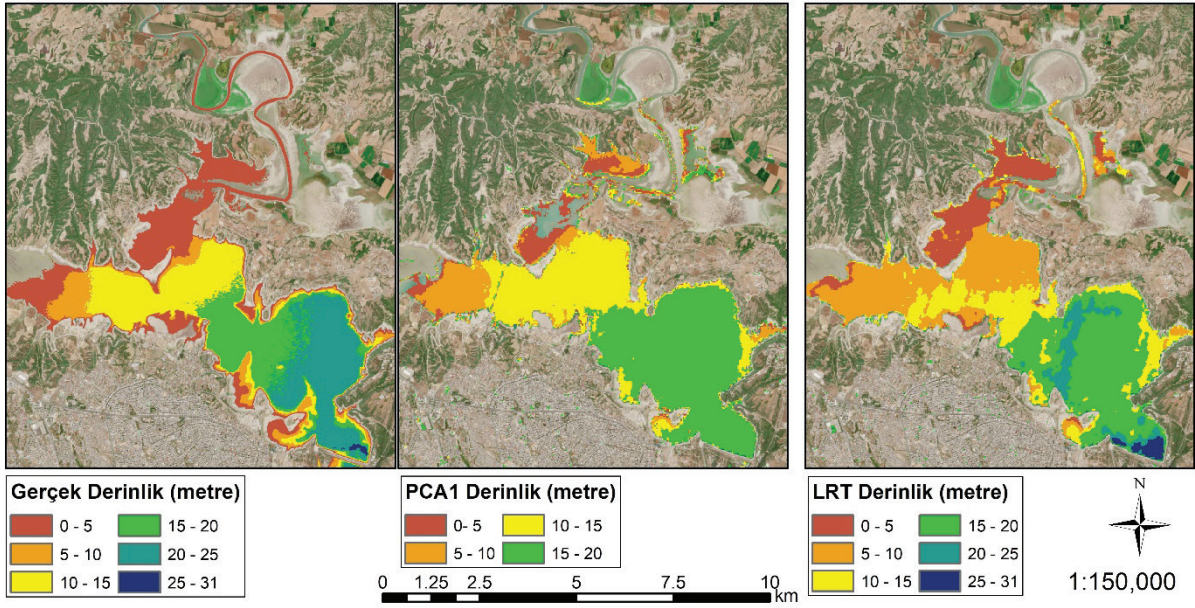


Şekil 8. Gerçek su derinliği ile ICA, PCA, LRT RWD arasındaki regresyon katsayıları ve grafiği.

Figure 8. Regression plot between actual water depth and ICA, PCA and LRT RWD.

Analiz sonuçları Çizelge 2’de verilen, gerçek derinlik ve ICA, PCA ve LRT yöntemleriyle hesaplanan RWD değerleri arasındaki korelasyonun regresyon katsayıları ve grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçlarında negatif korelasyon olarak görülen ICA2, ICA3 ve PCA2 analizlerine ait Şekil 8’de verilen regresyon grafiklerinde regresyon doğrusunun yönünün aşağı yönlü olduğu, ters orantılı olarak derinlik arttıkça bu üç analiz sonucunda elde edilen değerlerin azaldığı görülmüştür. Ayrıca en iyi sonuçları veren PCA1 ve LRT analizlerinin regresyon doğrularının yukarı yönlü olduğu, analizler sonucunda bulunan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür.

Pearson korelasyon katsayısı (r) istatistiği baz alındığında en iyi sonucu veren PCA1 ve LRT analizlerine ait Şekil 8’de verilen regresyon katsayılarının Şekil 6’da verilen PCA1 RWD ve Şekil 7’de verilen LRT RWD haritalarına uygulanmasıyla PCA1 ve LRT derinlik haritaları üretilmiştir (Şekil 9). PCA1 analizinin, r istatistiği açısından LRT analizinden daha iyi sonuç vermesine rağmen derinlik dağılımı açısından LRT derinlik haritasının gerçek derinlik haritasına daha çok uyumlu olduğu görülmüştür. ME ve PB istatistikleri açısından LRT yönteminin PCA1 yönteminden daha iyi çıkmasının ve tahminin standart hatası açısından LRT yönteminin diğer altı yöntemden daha iyi olmasının sebebinin bu uyum olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Gerçek su derinliği, PCA1 derinlik ve LRT derinlik haritaları.

Figure 9. Maps of actual water depth, PCA1 depth and LRT depth.

Akgül

Çizelge 3. Derinlikler için r istatistik sonuçları.

Table 3. *r* statistic results for depths.

Derinlik (metre)	ICA1	ICA2	ICA3	PCA1	PCA2	PCA3	LRT
0-5	-0.435	-0.521	-0.050	0.342	-0.413	-0.354	0.296
5-10	-0.032	-0.094	0.042	0.015	-0.003	-0.055	0.000
10-15	0.312	0.134	-0.106	0.348	0.295	0.187	0.085
15-20	0.611	0.441	-0.486	0.600	0.360	0.560	0.591
20-25	0.254	0.347	0.102	0.191	0.313	0.079	0.261
25-31	0.130	0.068	0.049	0.146	0.141	-0.015	0.306

Ayrıca, çalışma altı farklı sınıfta (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 ve 25-31 m), her bir sınıfta 5 m derinlik farkı ile yeniden analize tabi tutulmuştur. En iyi sonuçların 15 ila 20 m arasındaki derinliklerde, en az zayıf sonuçların ise 0 ila 5 m arasındaki derinliklerde olduğu görülmüştür. Sığ sulardaki düşük sonuçların, SDB haritalarının önemli bir sınırlamasını temsil eden bulanıklık olduğu düşünülmektedir. Analiz sonuçları altı farklı derinlikte en etkili yöntemlerin sırasıyla PCA1 ve LRT olduğunu, en az etkili yöntemin ise ICA3 olduğunu ortaya koymuştur (Çizelge 3).

Tartışma

SDB yöntemiyle batimetrik haritalar daha hızlı, daha ekonomik ve belirli hassasiyette üretilebilmesine karşın bu yöntemin bazı limitleri bulunmaktadır. Özellikle optik uyduların en büyük dezavantajı olan bulutluluk, atmosferik düzeltme algoritmaları ile giderilebilen su yüzeyindeki güneş parıltısı ve suyun bulanıklığıdır. Bulanıklık, SDB yöntemleriyle harita üretiminde su derinliğinin olduğundan daha az tahmin edilmesine neden olmaktadır (Stumpf vd., 2003). Suda bulanıklığa ise renkli çözülmüş organik madde (Coloured Dissolved

Organic Matter, CDOM) ve toplam askıda sediment (Total Suspended Sediment, TSS) sebep olmaktadır (Wenzl, 2018; Caballero vd., 2023).

Akgül vd. (2018) Seyhan Baraj rezervuarında çok zamanlı uydu verileri ile sonar batimetrik haritasını karşılaştırarak, TSS değerinin SDB yöntemiyle üretilen batimetrik haritaya etkisini araştırmışlardır. Landsat 8 uydusuna ait 2017 yılının 8 farklı ayındaki SDB haritalarını analiz ettikleri çalışmada, rezervuara giren akımların debilerinin ve TSS miktarlarının en az olduğu yaz aylarında SDB haritalarının daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma sonunda, rezervuara giren akımlar biliniyorsa görüntü seçilirken debilerin düşük olduğu tarihlerin kullanılmasının daha uygun olacağını, rezervuara giren akımlar bilinmiyorsa su derinliğini doğrudan etkileyen TSS'den kaynaklı hataların çok zamanlı uydu verileri yardımıyla elemine edilebileceği sonucuna varmışlardır. Darama vd. (2019) Türkiye'nin kuzey-batısında yer alan Hasanlar Barajı rezervuarında 2014 yılında sonar ile ölçülmüş batimetrik haritayla 2 Temmuz 2017 tarihli Landsat 8 uydu verisinden üretilen SDB haritasını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda iki harita arasındaki korelasyonun determinasyon katsayısını (R^2)

0.833 olarak hesaplamışlardır. Güvel vd. (2021) Seyhan Barajının 40 km batısında yer alan Berdan Barajı rezervuarında sonar yöntemiyle Temmuz 2019 tarihinde ölçülmüş batimetrik haritayla 28 Temmuz 2019 tarihli Sentinel-2 uydu verisinden üretilen SDB haritasını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda iki harita arasındaki korelasyonun R^2 değerini 0.9442 olarak bulmuşlardır. Akgül ve Yurtal (2023) Seyhan Baraj rezervuarındaki TSS'nin alansal dağılımı ve zamansal değişimini tespit edebilmek için Ocak 2020 ile Ağustos 2021 tarihleri arasında 20 adet Sentinel-2 uydusunu kullanarak bir çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda TSS değerlerinin rezervuar ortalamasının 2021 yaz aylarında istikrarlı duruma geldiğini tespit etmişlerdir. Akgül (2024) Berdan Barajı rezervuarında Temmuz 2019 tarihinde sonar batimetrik haritası ile 28 Temmuz 2019 tarihli Landsat 8 ve Sentinel-2 uydularından üretilen SDB haritalarını karşılaştırmışlardır. Çalışma alanından aynı gün geçiş yapan iki uydunun SDB kabiliyetini karşılaştırdıkları çalışma sonucunda Landsat 8 uydusuna ait Pearson korelasyon katsayısını (r) 0.67, Sentinel-2 uydusuna ait r istatistiği değerini ise 0.70 olarak hesaplamışlardır.

Örneklerden de görüleceği üzere sadece SDB haritaları değil sonar yöntemiyle ölçülen batimetrik haritalarda yaz aylarında üretilmektedir. Bunun sebebi yaz aylarında akımların debisi dolayısıyla rezervuara taşınan sediment miktarı düşmektedir. Optik bir yöntem kullanan SDB haritaları gibi ses dalgalarını kullanan sonar yöntemi de suyun bulanıklığından etkilenmektedir. Sonar yönteminde bulanıklıktan kaynaklı hataları giderebilmek için her ölçümden önce sudan örnek alınmakta ve ses hızını ölçen aletler yardımıyla bulunan değer sonar aletine girilmektedir. Böylece sonar ölçümleri daha hassas olmaktadır.

Bu çalışmada Ağustos-Eylül 2019 tarihleri arasında sonar yöntemiyle üretilen Seyhan Barajı batimetrik haritası ile 14 Ağustos 2024 tarihli hiperspektral EnMAP uydu verisiyle üretilen SDB haritası karşılaştırılmıştır. İki verinin de yaz aylarında olmasından dolayı çalışma sonuçlarına bulanıklığın etkisinin en az olduğu düşünülmektedir. Ayrıca regresyon katsayılarının üretildiği kalibrasyon noktalarının sayısının 26935 olması, bulanıklıktan kaynaklı olarak derinliği yanlış hesaplanan pikselleri elemine edebilecektir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki yıldır operasyonel olarak görevde olan hiperspektral EnMAP uydu verisi ve yedi farklı yöntem (ICA1, ICA2, ICA3, PCA1, PCA2, PCA3 ve LRT) kullanılarak elde edilen SDB haritaları ile sonar yöntemiyle ölçülen gerçek batimetrik harita arasındaki korelasyon araştırılmıştır. SDB haritaları, üretilmesi tecrübe ve özel ölçüm aletleri gerektiren batimetrik harita yapımına daha hızlı ve ekonomik bir alternatif yaklaşım olarak günümüzde tercih edilmektedir. Uydu teknolojilerindeki gelişmeler ve özellikle uydu üzerinde bulunan sensörlerin gelişmesiyle daha hassas SDB haritaları üretilmektedir.

Seyhan Barajı rezervuarında yapılan çalışma sonucunda, r istatistiği açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ME istatistiği sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, PB istatistiği sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği görülmüştür. Analiz sonucu çıkan değerler r istatistiği açısından anlamlı görülse de ME ve PB istatistikleri sonuçları açısından anlamlı bulunmamıştır. Ayrıca tahminlerin standart hataları hesaplanmış ve en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. ICA, PCA ve LRT analizi sonuçları

ve tahminin standart hataları incelendiğinde LRT yönteminin öne çıktığı görülmüştür.

Ayrıca beşer metre derinlik farkı ile çalışma 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 ve 25-31 m olmak üzere 6 ayrı sınıfta tekrar analiz edilmiş olup en iyi sonuçların 15-20 m arasında, en zayıf sonuçların ise 0-5 m arasında aldığı görülmüştür. Sığ sularda sonuçların zayıf çıkmasının sebebi olarak SDB haritalarının en zayıf noktası olan bulanıklık olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca 6 ayrı derinlikte en başarılı yöntemlerin sırasıyla PCA1 ve LRT yöntemleri olduğu, en zayıf yöntemin ise uzak ara ICA3 yöntemi olduğu görülmüştür.

Çalışma sonucundan hiperspektral EnMAP uydusunun SDB harita üretiminde de kullanılabilmesi düşünülmektedir. Ayrıca SDB haritalarının üretilmesi aşamasında çalışma alanındaki ortalama derinliğe göre en uygun yöntemin seçimi konusunda karar vericileri bilgilendireceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akgül, M.A., Dağdeviren, M., Biroğlu, İ. (2018). Çok Zamanlı Uydu Görüntüleri Kullanılarak Uydu-Kaynaklı Batimetri. DSİ Teknik Bülten, Sayı:127, Ocak 2018, Sayfa:14-27.
- Akgül, M.A., Yurtal, R. (2023). Seyhan Baraj Gölünde Askıda Sedimentin Alansal Dağılımının ve Zamansal Değişiminin Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 47(2), 103-118. <https://doi.org/10.24232/jmd.1311124>.
- Akgül, M.A. (2024). Comparison of Bathymetric Maps of a Dam Reservoir Produced by Empirical Methods from Satellite Images with Different Spatial Resolutions with In-Situ Data. J Indian Soc Remote Sens 52, 257–269. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01824-2>.
- Akgül, M.A., Güvel, Ş.P., Aksu, H. (2024). Sedimentation Analysis on Seyhan Dam Reservoir Using Long Term Bathymetry Data, Journal of Engineering Sciences and Design, 12(1), 16-33. <https://doi.org/10.21923/jesd.1353462>.
- Bachmann, M., Alonso, K., Carmona, E., et al., (2021). Analysis-ready data from hyperspectral sensors—the design of the EnMAP CARD4L-SR data product. Remote Sens. 13, 4536. <https://doi.org/10.3390/RS13224536>.
- Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Sundberg, R.L., Levine, R.Y., Perkins, T.C., Berk, A. (2005). Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. SPIE, Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI. Vol. 5806, pp. 668-678. <https://doi.org/10.1117/12.603359>.
- Caballero, I., Stumpf, R.P. (2023). Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. The Science of the total environment, 870, 161898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161898>.
- Canty, J.M. (2014). Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, with Algorithms for ENVI/IDL and Python, Third Edition. CRC Press.
- Chang, C.I. (2003). Unconstrained Mixed Pixel Classification: Least-Squares Subspace Projection. In: Hyperspectral Imaging. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6_8.
- Darama, Y., Selek, Z., Selek, B., Akgül, M.A., Dağdeviren, M. (2019). Determination of sediment deposition of Hasanlar Dam using bathymetric and remote sensing studies. Nat Hazards 97, 211–227. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03635-y>.
- DSİ (2014). Dams of Turkey, International Commission on Large Dams Turkish National Committee (TRCOLD), Dams of Turkey: Seyhan Dam. State Hydraulic Works (DSİ), Ankara, Türkiye.

- DSİ (2019). Adana-Seyhan Barajı Hidrografik Harita Yapımı İşi. Yağmur Harita –Kaya Mühendislik ortaklığı, Ankara, Türkiye.
- Erkinbaev, C., Derksen, K., Paliwal, J., (2019). Single kernel wheat hardness estimation using near infrared hyperspectral imaging. *Infrared Phys. Technol.* 98, 250–255.
- ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Fakıoğlu, M. (2005). Seyhan Barajı Hidrografik Harita Alımı Değerlendirilmesi ve Sonuçları. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası ve İTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh.Bölümü, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Gupta, H.V., Sorooshian S., and Yapo, P.O. (1999). Status Of Automatic Calibration For Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration, *Journal of Hydrologic Engineering.* 4(2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Güvel, Ş.P., Akgül, M.A., Yurtal, R. (2021). Investigation of sediment accumulation in Berdan Dam Reservoir using bathymetric measurements and Sentinel-2 Data. *Arab J Geosci* 14, 2723. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09089-6>.
- Hyvarinen, A. (1999). Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, no. 3, pp. 626-634.
- Hyvarinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 13 4-5, 411-30 .
- Huizingh, E. (2007). *Applied Statistics with SPSS*. SAGE Publications Ltd, London. <https://doi.org/10.4135/9781446249390>.
- IECO (1966). Water Resources Development Ceyhan Basin Projects, Seyhan Basin Projects, Berdan Project, Develi Project, Amik Project, Master Plan Report. (in Turkish)
- Kwon, J., Shin, H., Kim, D., Lee, H., Bouk, J., Kim, J., & Kim, T. (2024). Estimation of shallow bathymetry using Sentinel-2 satellite data and random forest machine learning: a case study for Cheonsuman, Hallim, and Samcheok Coastal Seas. *Journal of Applied Remote Sensing*, 18, 014522. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.014522>.
- Le Quilleuc, A., Collin, A., Jasinski, M.F., Devillers, R. (2022). Very High-Resolution Satellite-Derived Bathymetry and Habitat Mapping Using Pleiades-1 and ICESat-2. *Remote Sens.* 2022, 14, 133. <https://doi.org/10.3390/rs14010133>.
- Lyzenga, D.R. (1978). Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 17(3), pp.379-383.
- Mateo-Pérez, V., Corral-Bobadilla, M., Ortega-Fernández, F., Vergara-González, E.P. (2020). Port Bathymetry Mapping Using Support Vector Machine Technique and Sentinel-2 Satellite Imagery. *Remote Sens.* 2020, 12, 2069. <https://doi.org/10.3390/rs12132069>.
- Mudiyanselage, S.S.J.D., Abd-Elrahman, A., Wilkinson, B., & Lecours, V. (2022). Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1143–1158. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2100597>.
- NASA, (2024). Catalog of Spaceborne Imaging, NASA Space Science Data Coordinated Archive (NSSDC), NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- NV5 (2024a). Independent Components Analysis, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/IndependentComponentsAnalysis.html>. Date of access: 01.07.2024.

- NV5 (2024b). Principal Components Analysis, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/PrincipalComponentAnalysis.html>, Date of access: 01.07.2024.
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., Ferreira, O. (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*. Volume: 159, Page: 102-116. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.004>.
- Raschka, S., Mirjalili, V. (2017). *Python Machine Learning*. Packt Publishing Ltd, Birmingham, UK.
- Richards, J.A. (1993). *Remote Sensing Digital Image Analysis*, 2nd ed. Springer Verlag, 1993.
- Pohl, C., & van Genderen, J. (2016). *Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315370101>.
- Rojas-Moraleda, R., Valous, N.A., Gowen, et al., (2017). A frame-based ANN for classification of hyperspectral images: assessment of mechanical damage in mushrooms. *Neural Comput. Appl.* 28, 969–981.
- Saha, D., & Manickavasagan, A. (2021). Machine learning techniques for analysis of hyperspectral images to determine quality of food products: A review. *Current research in food science*, 4, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.01.002>.
- Said, N.M., Mahmud, M.R., Hasan, R.C. (2017). Satellite-Derived Bathymetry: Accuracy Assessment on Depths Derivation Algorithm for Shallow Water Area, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W5, 159-164, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-159-2017>.
- Schowengerdt, R.A. (1997). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 2nd ed. Academic Press, 1997.
- Smith, F.G.F., Hess, M.L. (2017). Optimization of Multi-date Strategies for Calculating Bathymetry Using Multispectral Imagery. *Imaging and Geospatial Technology Forum (IGTF 2017)*. Baltimore, Maryland, USA. 12 - 16 March 2017.
- Snyder, L.P., Nyberg, J., Smith, S.M., Pe'eri, S., Madore, B., Rogers, J., Lowell, J., DeAngelis, R. (2016). Chart Adequacy Evaluation of the Coastal Water of Haiti Using Satellite-Derived Bathymetry. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Ocean Survey (NOS), Silver Spring, MD.
- Storch, T., Honold, H.-P., Chabrilat, S., et al. (2023). The EnMAP imaging spectroscopy mission towards operations. *Remote Sensing of Environment*, 294, 113632. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113632>. ISSN 0034-4257.
- Stumpf, R.P., Holderied, K., Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, volume. 48(1, part 2), pages. 547-556.
- Tang, K.K.W., Pradhan, B. (2015). Converting Digital Number into Bathymetric Depth: A Case Study over Coastal and Shallow Water of Langkawi Island, Malaysia. *FIG Working Week 2015*, (May 2015), 14
- Tang, K.K.W., Mahmud, M.R. (2021). The Accuracy of Satellite Derived Bathymetry in Coastal and Shallow Water Zone. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(3), 1–8. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v8.n3.681>.
- Tharwat, A. (2021). “Independent component analysis: An introduction”, *Applied Computing and Informatics*, Vol. 17 No. 2, pp. 222-249. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.006>.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., and Garbrecht, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551.
- Wenzl, M. (2018). Bathymetry estimates and bottom classification using hyperspectral data in the baltic sea. Available at: <https://elib.dlr.de/126033/> (Accessed December 28, 2022).

Araştırma Makalesi / Research Article

3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri ile Birleşik Kaya İslah Uygulamalarının Değerlendirilmesi: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Örneği

Evaluation of Combined Rock Remediation Applications with 3D Rockfall Analyses: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Case

Murat KARAHAN¹ , Muhammet Oğuz SÜNNETÇİ² , Hakan ERSOY² , Ali İPEK³

¹ İnşaat Teknolojisi Bölümü, Trabzon Meslek Yüksekokulu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61300 Trabzon

² Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080 Trabzon

³ İpek Ormancılık ve Mühendislik Hizmetleri, Ortahisar, 61040 Trabzon

Geliş (Received): 04.08.2024 / Düzeltme (Revised): 29.09.2024/ Kabul (Accepted): 04.12.024

ÖZ

Bu çalışmada Trabzon İli Akçaabat İlçesi sınırları içinde meydana gelen kaya duraysızlıkları değerlendirilmiştir. İlk aşamada, analizlere altlık oluşturması için İnsansız Hava Aracı (İHA) ile yapılan uçuşlardan çekilen fotoğraflar kullanılarak çalışma alanı ve çevresinin nokta bulutu verileri üretilmiştir. Sonrasında fotogrametrik yöntemler kullanılarak üretilen bu nokta bulutundan arazinin sayısal yüzey modeli oluşturulmuştur. Çalışma alanı, litolojik özellikler, morfoloji, yerleşim durumu, bitki örtüsü ve alınabilecek önleme ve/veya koruma yöntemleri dikkate alınarak 3 bölgeye ayrılmış, hat etüdü yöntemi ile süreksizlik özellikleri belirlenmiştir. 270/85 duruşlu kaya sevinde, 264/78 duruşlu süreksizlikler boyunca düzlemsel kayma-doğrudan devrilme, 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca kama tipi kayma riski olduğu kinematik analizlerle belirlenmiştir. Yapılan limit denge analizlerinde dinamik durum için en düşük güvenlik sayısı değeri 1,29 olarak hesaplanmış, 3 farklı bölgede de kayma ve devrilme riskinin olmadığı görülmüştür. Ancak, Bölge-1 ve Bölge-2’de arazi çalışmaları sırasında vadi içerisinde gözlenen kaya blokları, bölgede geçmiş dönemde kaya düşmesi olaylarının yaşandığına işaret etmektedir. Öte yandan kaynak zonda bulunan süreksizlikler ile sınırlanmış bloklar kaya düşmesi açısından risk oluşturmaktadır. Kaya kütlelerinin mostra verdiği Bölge-3’te süreksizlikler ile sınırlanmış olan kaya bloklarının ve üst zonlardan gelip bu bölgede duran blokların olası hareketi söz konusudur. Vadi içlerinde biriken bloklar için yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda Bölge-1’deki vadi ağzına 14 metre uzunluğunda, Bölge-2’deki vadi ağzına ise 25 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar yapılarak etkilerinin azaltılacağı belirlenmiştir. Bölge-3’te bulunan riskli blokların hareketini önlemek için ise üst yarıdaki alan için 180 m²’lik çelik ağ kullanılması durumunda, kütle hareketi riskini minimuma indirgeyeceği sonucuna varılmıştır. Böylece çalışma sahasındaki olası duraysızlık riskleri değerlendirilerek farklı ıslah çözümlerleri bir arada efektif bir şekilde kullanılmış olacaktır. Önerilen birleşik kaya ıslah projeleri sayesinde kaya düşme riskleri ortadan kalkacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu kaya düşme analizi, Birleşik kaya ıslahı, Çelik ağ, Kaya düşmesi, RocPro3D, Trabzon

ABSTRACT

In this study, rock instabilities occurring within the boundaries of Akçaabat district in Trabzon province were evaluated. In the first stage, point cloud data for the study area and surroundings were generated using photographs

taken by unmanned aerial vehicle (UAV) flights as a basis for the analysis. Then, a digital terrain model of the area was created from this point cloud using photogrammetric methods. The study area was divided into 3 regions considering lithological features, morphology, settlement status, vegetation cover and prevention and/or protection methods that can be implemented, and discontinuity characteristics were determined by the line survey method. In the kinematic analysis, there was a risk of planar sliding-direct overturning along discontinuities of the rock slope 270/85 and discontinuities of the rock slope 264/78, while wedge-type sliding was a risk along the intersection line of the discontinuities of rock slope 213/71 and 324/68. In the limit equilibrium analyses, the lowest safety factor value for the dynamic case was calculated to be 1.29, and there was no risk of sliding and overturning in 3 different zones. However, the rock blocks observed in the valley during field studies in Zone 1 and Zone 2 indicate that rockfall events have occurred in the region in the past. The blocks bounded by discontinuities in the source zone represent a rockfall hazard. In zone 3, where the rock mass is exposed, there is possible movement of rock blocks bounded by discontinuities and blocks coming from the upper zones and standing in this zone. As a result of the 3D rockfall analyses carried out for blocks accumulated in the valley interior; their effects could be reduced by the construction of a 14-metre long curtain wall at the mouth of the valley in Zone 1 and a 25-metre long and 3-metre high curtain wall at the mouth of the valley in Zone 2. To prevent the movement of the at-risk blocks in Zone 3, it was concluded that the risk of mass movement could be minimised by using a 180 m² steel mesh for the upper half of the area. Thus, by assessing the potential instability risks in the study area, different reclamation solutions will be used together effectively. Rockfall risks will be eliminated by the proposed combined rockfill projects.

Keywords: 3D Rockfall Analysis, Unified Rock Rehabilitation, Steel Mesh, Rockfall, RocPro3D, Trabzon

GİRİŞ

İnsan yaşamını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyerek toplumun sosyo-ekonomik yapısını ve kültürel faaliyetlerini aksatan, can ve mal kayıplarına neden olan, yerel imkân ve kabiliyetlerle engellenmesi ve etkilerinin azaltılması çok mümkün olmayan doğa olayları “doğa kaynaklı afet” olarak tanımlanmaktadır (URL-1) Dünya ölçeğinde meydana gelen doğa kaynaklı afetlerin insan yaşamına olan etkileri geçmişten günümüze kadar sürekli artmış, bu artış son 200 yılda 4 kata ulaşmıştır.

Geçmişten günümüze kadar, meteorolojik kökenli afetler içinde en fazla kuraklık ve taşkınlar, meteorolojik olmayan afetlerin içinde ise depremler can ve mal kaybına neden olmuş sadece 1994 ile 2022 yılları arasında küresel ölçekte meydana gelen 7000’den fazla doğa kaynaklı afette yaklaşık 1.7 milyon insan hayatını kaybetmiştir (URL-2). Türkiye, jeolojik, morfolojik ve iklimsel özellikleri dikkate alındığında bir afet ülkesi olarak bilinmektedir.

Ülkede taşkın, erozyon, çölleşme ve çığ gibi afetler meteorolojik kökenli afetlerin başında gelirken, deprem, heyelan, kaya düşmesi gibi afetler ise meteorolojik olmayan afetlerin en önemlileridir (Şaraldı, 2015). Son 50 yıldır meydana gelen doğa kaynaklı afet dağılımına bakıldığında heyelanlar ve kaya düşmeleri %45’lik oranla ilk sırada, depremler %18’lik oranla ikinci sırada, taşkınlar %14’lük oranla üçüncü sırada yer almaktadır. Sadece 2019 yılında ülke genelinde taşkın ve heyelanların diğer afetler içerisindeki oranı ise %70’lere ulaşmıştır. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi, oluşma sıklığı bakımından heyelanların, etki alanı bakımından ise taşkınların en sık görüldüğü ve buna bağlı olarak can ve mal kaybının en fazla olduğu bir bölgedir. Ülke istatistiklerinden farklı olarak Doğu Karadeniz Bölgesi’nde doğa kaynaklı afetler içinde taşkın, heyelan ve kaya düşmeleri %95’lik oranla ilk sırada yer almaktadır (Gökçe vd., 2008).

Trabzon ili son 50 yıl içerisinde olmuş veya olması muhtemel kaya düşmesi sebebiyle

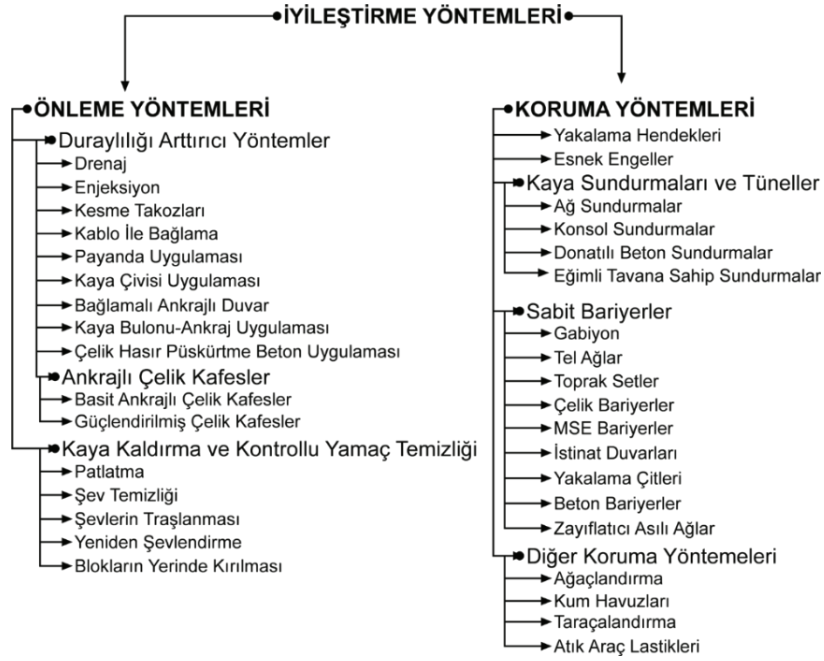
taşınmasına karar verilen konut sayısının en fazla olduğu ildir (URL-4). İilde kaya düşmesi olaylarının sık olarak yaşanmasında bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri, bitki örtüsü, iklim ve buna bağlı olarak kayaların ayrışması önemli rol oynamaktadır. İilde kaya düşme olaylarının ilkbahar sonları ve yaz başları ile sonbahar dönemlerinde meydana gelmesi bu olaylar üzerinde iklimin çok önemli etkileri olduğunu göstermektedir (Akgün, 2011; Dağ vd., 2011; Alemdağ vd., 2019; Ersoy vd., 2019; Ersoy vd., 2020; Karahan vd., 2020; Kaya ve Midilli, 2020). Özellikle ani ve şiddetli yağışlar sonucunda kaya kütlesi içindeki süreksizliklere nüfus eden su, donma ve çözülmenin etkisi ile süreksizlerin büyümesine ve/veya yeni süreksizliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrışmayı arttıran bu süreç ise kaya düşme olaylarının bu denli sık yaşanmasının asıl sebebidir (Kadioğlu, 2005).

Kaya düşme olaylarında gerek can gerekse de mal kaybını önlemek için ilk aşamada riskli alanların tespit edilmesi sonrasında önleme ve koruma projeleri üretilmesi gerekmektedir. Proje aşamasından önce uygulanacak analizlerde öncelikli olarak kütle hareketine neden olacak süreksizliklerin özelliklerinin belirlenmesi, yenilme türünün tespit edilmesi ve hareket mekanizmasının doğru bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir (Altay, 2015; San, 2017; Çapar, 2018; Keskin, 2019; Koçyiğit, 2019; Buz, 2019; Kırbaş, 2019; Alizadeh, 2021; Arslantürk, 2022; Caymaz, 2023). Farklı tip kütle hareketlerinin oluşum mekanizmaları farklı olacağı için, önerilecek önlemlerin başarısı da yenilme türünün doğru olarak tespit edilmesine bağlıdır. Doğal yamaç veya kazı şevinde meydana gelebilecek kütle hareketi türünün

kaya düşmesi olacağı tespit edildikten sonra hareket etmesi muhtemel blok veya blokların izleyeceği güzergâh, farklı güzergâhlar boyunca hareket edecek blokların kinetik enerjisi, sıçrama yüksekliği, çarpma hızı ve önerilen ıslah yöntemlerinin uygun olup olmadığı 2 ve 3 boyutlu yaklaşımlarla analiz edilmelidir (Akın vd., 2019). Buna ek olarak, analizlerde kullanılmak üzere gerekli jeolojik verilerin temininde, uygulanacak yöntem seçilmesinde ve uygun ıslah yönteminin tasarlanmasında arazi ve laboratuvar çalışmaları oldukça önemli yer tutmaktadır. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri, kaya kütlesindeki süreksizlik özellikleri, kütle hareketi nedenleri, hareket türleri, düşen/düşmesi muhtemel blokların boyutları, hareket eden blokların sıçrama yükseklikleri ve izledikleri yollar tespit edilebilmektedir (Polat vd., 2020; Wang vd., 2020)

Kaya ıslah projelerinde aktif ve/veya pasif yöntemler uygulanmaktadır (Lambert ve Bourrier, 2013). Aktif yöntemde bloğun harekete geçmesini önlemek amaçlanırken pasif yöntemde ise harekete geçen bloğu kontrollü şekilde durdurmak veya tehlikesiz alana nakletmek amaçlanmaktadır (Grosic vd., 2009). Bu nedenle aktif yöntemler önleme yöntemi, pasif yöntemler koruma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Önleme ve koruma yöntemleri ayrı ayrı uygulandığı gibi bütünleşik bir şekilde de uygulanabilmektedir (Volkwein, 2011). Şekil 1’de kaya düşmesi önleme ve koruma yöntemleri detaylı olarak verilmiştir.

Bu çalışmada Türkiye’de kaya düşme olaylarının sıklıkla yaşandığı Trabzon’un Akçaabat ilçesinde yer alan Işıklar Mahallesinde meydana gelen kaya düşme olayları incelenmiştir.



Şekil 1. Kaya düşmelerinde iyileştirme (önleme ve koruma) yöntemleri.

Figure 1. Remediation (prevention and protection) methods for rock falls.

Çalışma kapsamında kaya düşme olaylarının etkilerini en aza indirmek için; (1) arazi gözlemleri ve ölçümleri (hat etüdü) yapılmış, (2) süreksizlik özellikleri belirlenmiş, (3) laboratuvar deneyleri ile kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş, (4) insansız hava aracından alınan görüntülerden fotogrametrik yöntem ile nokta bulutu oluşturulmuş ve haritalama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin bir bütün halinde değerlendirilmesi sonucunda; (1) kaynak zonları tespit edilmiş, (2) meydana gelmiş ve gelebilecek kaya duraysızlık türleri arazide belirlenmiş, (3) kinematik analiz ve limit denge analizleri uygulanmış, (4) 3 boyutlu kaya düşme analizleri yapılmış (5) yapılan tüm çalışmalar sonucunda bölge için en uygun önleme ve koruma yöntemleri tespit edilmiş ve projelendirilmiştir.

ÇALIŞMA ALANININ KONUMU VE JEOLJİSİ

Doğu Karadeniz Bölgesi'nde gelişen kaya düşmeleri en az heyelanlar kadar etkili olmaktadır. Özellikle Trabzon ilinde ilkbahar ve kış mevsiminde görülen kaya düşme olayları lokal olarak can ve mal güvenliği açısından büyük riskler oluşturmaktadır (Gelişli vd., 2011).

Bu çalışma kapsamında da Türkiye'de kaya düşme olaylarının en sık meydana geldiği Trabzon ili pilot bölge olarak seçilmiştir. Akçaabat ilçesi sınırları içerisinde bulunan çalışma alanı Trabzon il merkezine 33 km, Düzköy ilçe merkezine ise 5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Çalışma alanında mevsimsel koşullara bağlı olarak yerel kaya düşmeleri, moloz akmaları meydana gelmiş ve halen meydana gelmektedir. Çalışma sahası dik bir topoğrafyaya sahip olup bu haliyle Doğu

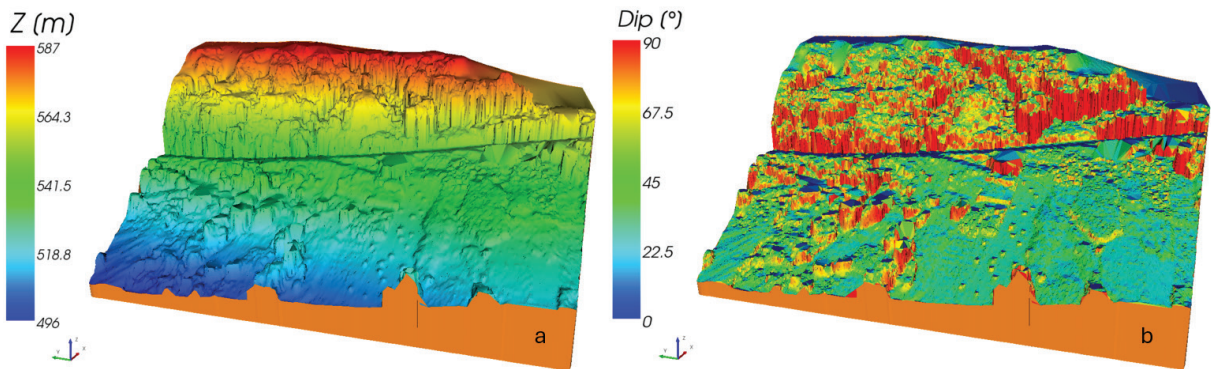
Karadeniz topoğrafyasının tipik özelliklerini taşımaktadır (Şekil 2).

Bölgede genel olarak volkanik birimler hâkimdir (Şekil 3). Kaya düşme olaylarının sık olarak yaşandığı alanda kırıntılı çökellerle başlayıp üst zonlara doğru volkanik karakterde olan volkanotortul istif yüzeylenmektedir. Birim, ilk olarak Güven (1993) tarafından Kabaköy Formasyonu olarak tanımlanmış olup kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn arakatlı andezit, bazalt ve piroklastitlerden oluşmaktadır. Birim çalışma alanında sahile kadar (yaklaşık 20 km) boyunca geniş yayılımlar göstermektedir. Genellikle koyu renkli olan volkaniklerin tabanında yer alan sarımsı renkli bol fosilli tortul kayalar bir kılavuz seviye niteliğindedir. Bu seviye sayesinde formasyonun yaşı Erken-Orta Eosen olarak belirlenmiştir (Güven, 1993). Ancak bu volkanitlerin yaşının daha genç olduğu (Orta Eosen-Neojen) radyometrik yaş tayinleriyle detaylı olarak ortaya koyulmuştur (Aydın, 2003; Arslan ve Aslan, 2006). Çalışma alanında kaya düşme olayının meydana geldiği şev yüzeylerinde yapılan gözlemler kaya kütlelerinin genel olarak bazalt, andezit ve piroklastiklerden oluştuğunu

göstermektedir. Çalışma alanı ve çevresinin, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Türkiye Deprem Tehlikesi Haritasındaki konumu dikkate alındığında, maksimum yer ivmesi değerinin (PGA) 0.201g olduğu görülmüştür (URL-3).

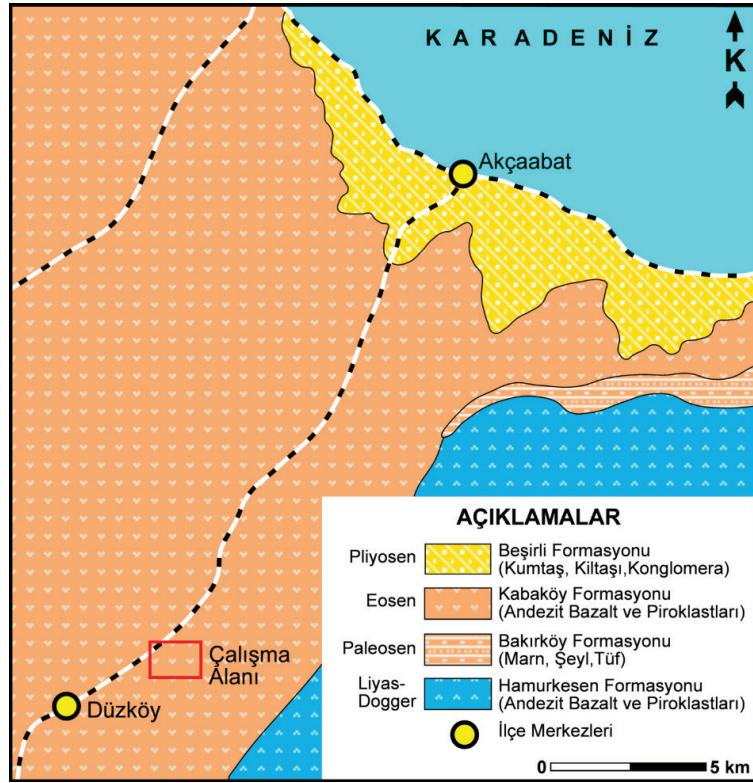
SAYISAL YÜZEY VE YÜKSEKLİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Bu çalışma kapsamında gerek dik yamaçların gerekse yoğun bitki örtüsünün varlığı nedeniyle analizlerde ve projelendirme aşamasında kullanılmak üzere gerekli olan haritaların topoğrafik çalışmalar yardımıyla üretilmesi oldukça güç olduğu için haritalandırma işlemlerinde fotogrametrik yöntemler tercih edilmiştir. Fotogrametrik yöntemde otonom uçuş yapabilen DJI Phantom 4 Pro insansız hava aracı kullanılmıştır. İnsansız hava aracı yardımıyla 100 metre yükseklikte %80 bindirme oranına sahip olan 52 adet oblik hava fotoğrafı çekilmiş, bu fotoğraflar Agisoft PhotoScan 2.1.0 (2023) yazılımı ile işlenerek çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü (2,65 cm/pix) ortofoto görüntüsü, sayısal yüzey modeli ve nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 4a ve b).



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin yükseklik (a) ve eğim (b) haritaları

Figure 2. Elevation (a) and slope (b) maps of the study area and its surroundings



Şekil 3. Çalışma sahası ve çevresinin jeoloji haritası (Güven, 1993).

Figure 3. Geological map of the study area and its surroundings (Güven, 1993).

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

Akçaabat ilçesi sınırları içerisinde bulunan Işıklar mevkiindeki kaya şev duraysızlıkları için önleme ve koruma yöntemlerinin tespiti amacıyla arazide kaya kütlelerinin içerdiği eklemlerin mühendislik özellikleri ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre belirlenmiştir. Ayrıca jeolojik (litoloji) ve morfolojik özellikler, yerleşim durumu, bitki örtüsü, alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemi dikkate alınmış ve riskli bölge jeoteknik birimlere ayrılmıştır. Bu birimler dikkate alınarak hat etüdü yöntemi ile süreksizlik özellikleri tayin edilmiş, araziden elde edilen örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak kayaçların indeks ve dayanım özellikleri belirlenmiştir.

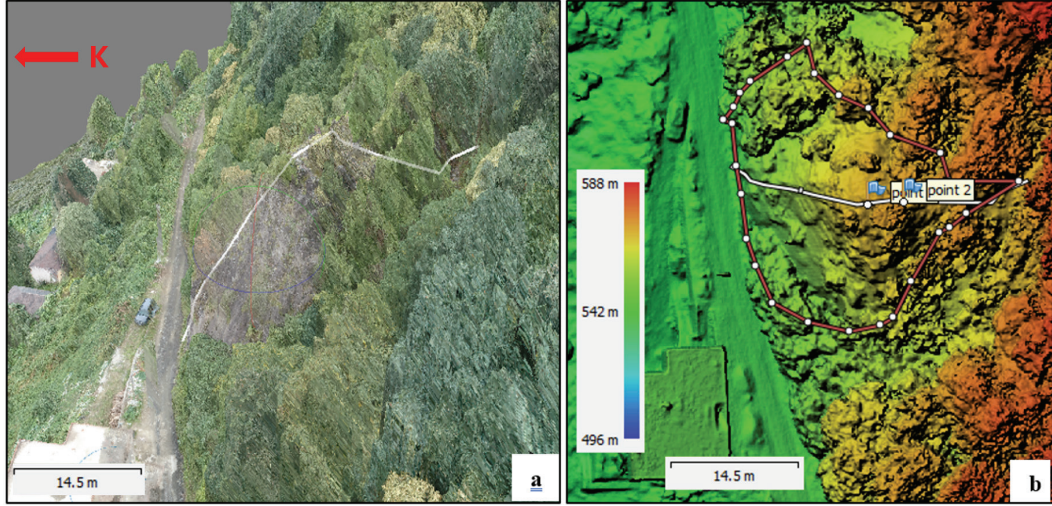
Yapılan çalışmalar ve elde edilen verilen sonucunda; yamaçta stabilite analizleri gerçekleştirilmiş, kaya düşme potansiyeli değerlendirilerek çeşitli önleme ve koruma yöntemleri önerilmiştir.

Jeoteknik Birimlerin/Bölgelerin Tanımlanması

Mühendislik jeolojisi çalışmalarında, 1/5000-1/10000 ölçekleri arasında tanımlanabilen, mineralojik bileşim ve yapısal anlamda homojen, ancak jeoteknik özellikler açısından uniform olmayan birimler “*litolojik tür*” olarak ifade edilir. Bu sınıflamada, birimin jeoteknik özellikleri için gerçek anlamda ve temsil edici ortalama değerlerin verilmesi mümkün olmayıp, mühendislik özellikleri belirli aralıkları temsil

eden değerler şeklinde verilebilir. 1/5000 veya daha büyük ölçeklerde tanımlanabilen ve fiziksel anlamda en yüksek homojenlik derecesine sahip

birimler ise “jeoteknik birim” olarak ifade edilir (IAEG, 1976; Dearman vd., 1987).



Şekil 4. (a) Kaya kütleinin bulunduğu alana ait ortofoto ve (b) yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli.

Figure 4. (a) Orthophoto and (b) high-resolution digital surface model of the area where the rock mass is located.



Şekil 5. Çalışma alanının Dearman vd. (1987) sınıflama sistemine göre 3 farklı jeoteknik bölgeye ayrılması.

Figure 5. Division of the study area into 3 different geotechnical zones according to the classification system of Dearman et al. (1987).

Bu çalışmada tüm bunlar dikkate alınarak ISRM (1976) tarafından önerilen ve Dearman vd. (1987) tarafından modifiye edilen sınıflama dikkate alınmış ve çalışma alanı Kuzey-Orta ve Güney bölge olmak üzere 3 farklı jeoteknik bölgeye ayrılmıştır (Şekil 5). Bu değerlendirme yapılırken litolojik değişim (1), morfoloji (2), yerleşim durumu (3), bitki örtüsü (4) ve alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemleri (5) dikkate alınmıştır.

Kuzey bölge (Bölge-1)

Bazaltik kaya kütlelerinin kuzeyinde bulunan bölge genel olarak orta derecede ayrılmış, kırıklı ve çatlaklı bir kaya kütlelerinden oluşmaktadır. Eğimi ortalama 50-60 derece arasında değişen kuru bir vadiden oluşan bölgede üst kotlara doğru eğim 80 dereceyi bulmaktadır. Ayrışma ve süreksizliklerin etkisi ile bu bölgede kopan farklı boyuttaki bloklar vadi boyunca yayılmış durumdadır.

Süreksizlikler ve ayrışmanın etkisi ile üst kotlardan kopan 20-30 cm boyutunda kaya parçaları alt kotlarda birikmiş iken, birkaç metre boyutundaki bloklar ise asılı halde durmaktadır. Bu bölgede üst kotlarda askıda duran blokların ve vadi içinde yığılmış olan farklı boyutlardaki kaya parçalarının yağışa ve/veya sismik aktiviteye bağlı olarak vadi boyunca hareket etmesi söz konusudur. Böyle bir hareket sonucu bölgedeki yapılar için tehlikeli bir durum oluşturmaktadır (Şekil 6a).

Güney Bölge (Bölge-2)

Bazaltik kaya kütlelerinin güney kesiminde bulunan vadinin oluşturduğu bölgede santimetre boyutundan metre boyutuna kadar farklı boyutlarda kaya parçaları ve blokları bulunmaktadır. Kaynak bölgesinden kopan bloklar vadi boyunca hareket ederek vadiyi

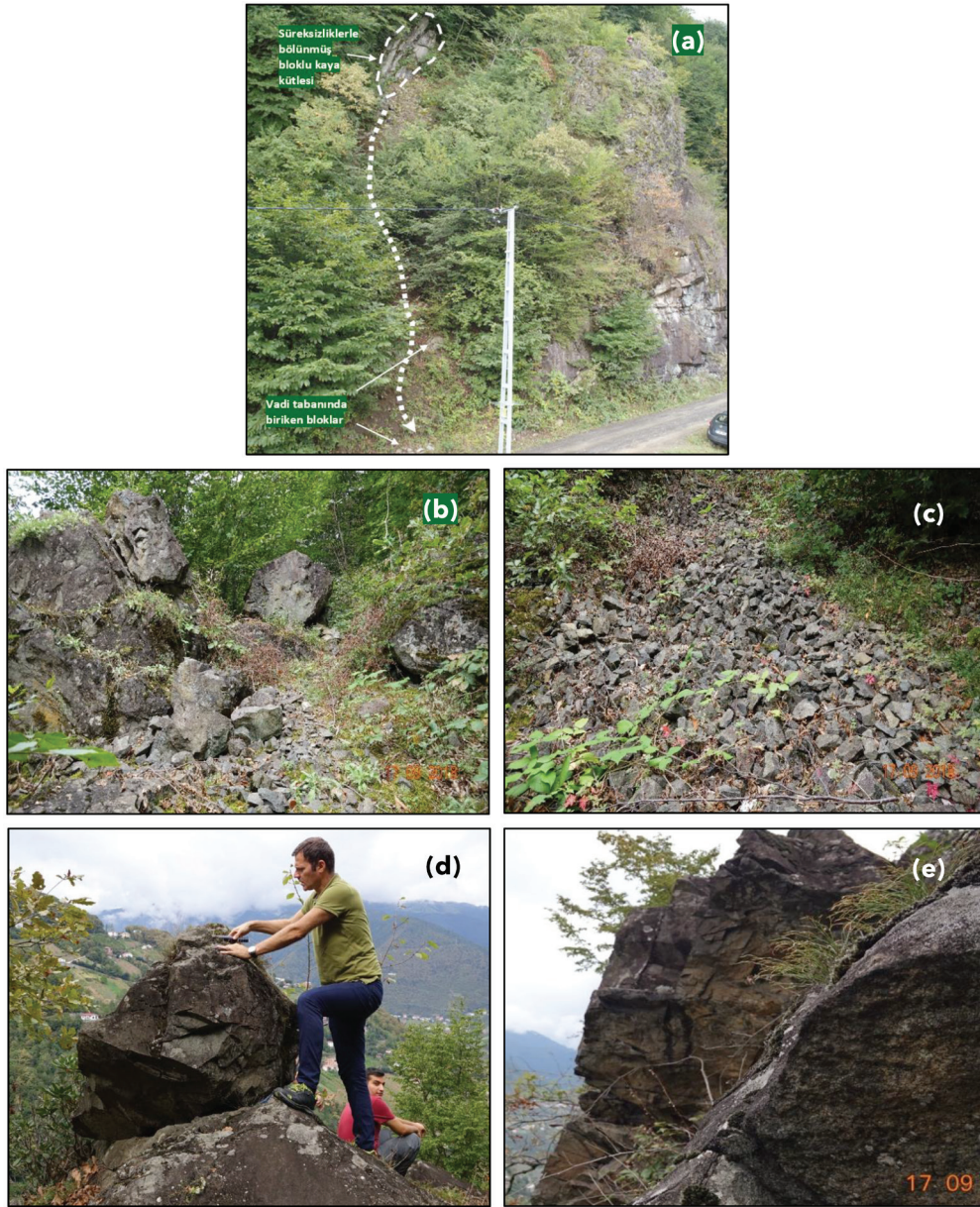
doldurmuştur. Vadiyi dolduran bloklar daha küçük boyutlu iken kaynak bölgede hareket etmemiş serbest halde birkaç metre boyutunda bloklar bulunmaktadır. Aşırı yağışlara bağlı olarak üst zonlardaki serbest blokların yuvarlanma, vadi içindeki kaya parçalarının ise moloz akıntısı şeklinde hareketi söz konusudur. Serbest blokların ve vadi içindeki kaya parçalarının olası hareketi yamaç altındaki evlerde büyük ölçekli hasarlara neden olabilir (Şekil 6b ve c).

Orta bölge (Bölge-3)

Dört ayrı süreksizlik takımı içeren kaya kütleleri bazalttan oluşmaktadır. Yüksekliği maksimum 30 metre olan kaya kütleleri, yatayda kuzey yönünde 30 m, doğu yönünde 40 metre takip edilebilmektedir. Özellikle ilk 15 metreye kadar masif bir yapı sunan kaya kütleleri 15 metreden sonra kırıklı bir yapı sunmaktadır. Üst bölgelerde bulunan bloklar süreksizlikler boyunca ayrılmış durumdadır. Bu bölgede 270/85 duruşlu kaya şevi boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme riskleri mevcut iken şevin tepesinde bulunan üst zonlardan yuvarlanıp durmuş serbest bloklarda ise düşme riski mevcuttur (Şekil 6d ve e). Kuzey ve Güney Bölgede bulunan vadi içlerindeki bitki örtüsü daha çok kaya düşmeleri üzerinde çok önemli bir etkisi olmayan orman gülünden oluşurken bölgenin üst zonlarında kalın gövdeli ağaçlar bulunmaktadır.

Kaya Kütleleri ve Kaya Malzemesinin Özellikleri

Çalışma kapsamında araziden alınan kaya bloklarından ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre NX çaplı karot örnekleri (boy/çap oranı 2.5) temin edilmiş, örnekler üzerinde yoğunluk, nokta yük dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Kaya malzemesinin indeks ve dayanım özelliklerine ait değerler ise Çizelge 1'de özetlenmiştir.



Şekil 6. (a) Bölge-1'deki çok kırıklı kaya kütlesi, (b) Bölge 2'de üst kesimlerdeki 1-2 m çapındaki bloklar, (c) alt kesimde birikmiş kaya parçaları ve (d, e) Bölge 3'ün üst kesimlerinde serbest halde bulunan bloklar.

Figure 6. (a) Very fractured rock mass in Zone-1, (b) 1-2 m diameter blocks in the upper parts of Zone-2, (c) accumulated rock fragments in the lower parts and (d, e) free blocks in the upper parts of Zone-3.

Karahan, Sünnetçi, Ersoy, İpek

Çizelge 1. Kaya malzemesinin indeks ve dayanım özellikleri.

Table 1. Index and strength properties of the rock material.

Örnek No	Yoğunluk (gr/cm ³)	BHA* (kN/m ³)	TESD** (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)
1	2.55	25.01	109	4.1
2	2.69	26.39	115	4.7
3	2.65	26.00	110	4.5
4	2.60	25.51	95	3.8
5	2.58	23.31	88	3.8

* birim hacim ağırlık, **tek eksenli sıkışma dayanımı

Süreksizliklerin, dolayısıyla kaya kütlelerinin özellikleriyle ilgili veri toplanmasında istatistiksel anlamda en tatmin edici sonuçların alındığı yöntem, hat etüdü yöntemidir (ISRM, 1978). Geniş bir alanda kaya kütlelerinin incelenmesine ve süreksizliklerden doğrudan ölçüm alınmasına olanak kılan bu yöntemin ilk olarak süreksizlik ara uzaklığı ve devamlılığına bağlı olarak uygun uzunlukta mostra yüzeyleri seçilmiş, ölçümler 270/85 duruşlu kaya kütlesi üzerinde açılan tek hat üzerinde yapılmış, ölçümlerde süreksizlik aralıkları ve süreksizliklerin eğim/eğim yönleri tespit edilmiştir. Çalışmada toplam 120 adet süreksizlik ölçümü yapılmış, ana eklem setlerinin yönelimini belirlemek için DIPS 8.023 (Rocscience, 2023) programı kullanılmıştır (Şekil 7). Süreksizlik türleri ve duruşları ise Çizelge 2'de özetlenmiştir. Kuzey ve Güney bölgede kaya kütlesi yüzeylenme vermediği için bu iki bölgede kinematik analiz yapılmamıştır. Sadece orta bölgede yüzeyleme veren kaya kütlelerinde kinematik analiz yapılmıştır. Kuzey ve güney bölgelerde üst kotlardan yuvarlanıp gelen ve yamaçtan kopup vadi içinde biriken bloklar risk teşkil etmektedir.

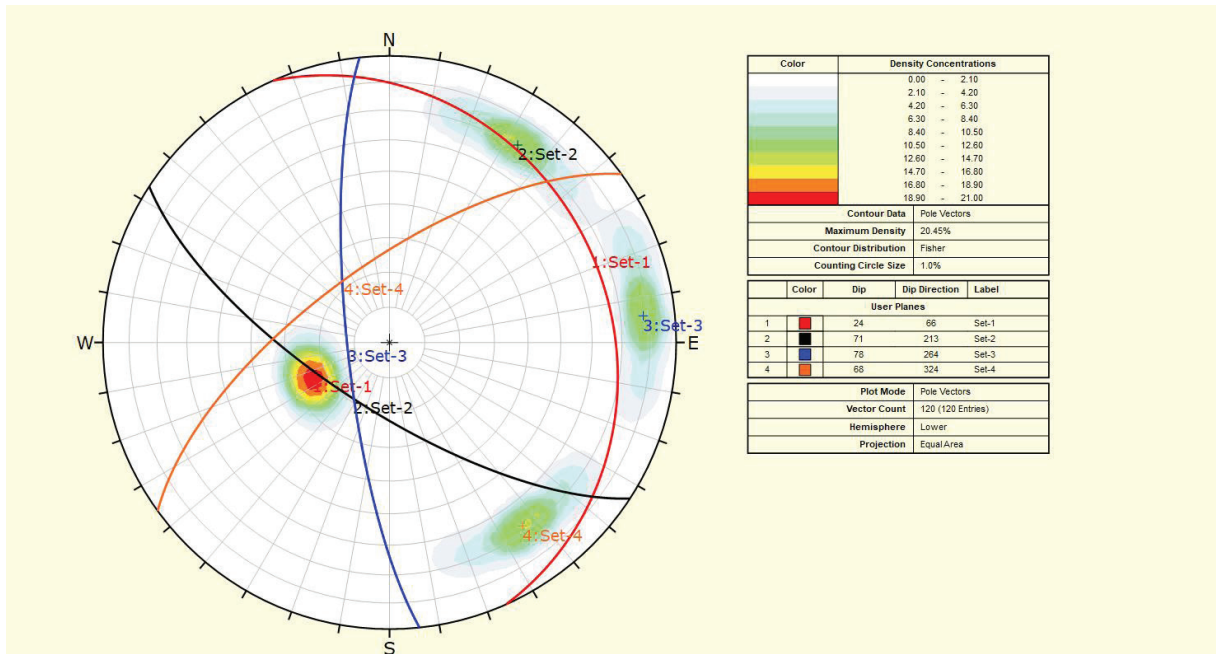
Şev Stabilite Analizleri

Kaya şevlerinin ekonomik ve güvenli bir şekilde projelendirilebilmesi için şevde meydana gelmesi muhtemel hareket türlerinin ve harekete neden olacak faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Olası hareket türleri ve faktörler dikkate alınarak kaya şevi tasarlanır. Tasarlanan kaya şevinde olası riskler için gerekli koruma ve/veya önleme yöntemlerinin belirlenmesi de gerekmektedir. Bunlar dikkate alınarak kaya şevi tasarımlarında; kinematik analiz, limit denge ve nümerik analiz yöntemleri gerçekleştirilmiştir.

Kinematik analizler

Kinematik analiz yöntemi, süreksizliklerin kontrolünde bir duraylılık probleminin denetlendiği bir yöntemdir. Kaya kütlelerinde duraylı ve duraysız olabilecek şevlerin ayırt edilmesi amacıyla, ayrıntılı analizlere başlanmadan önce yararlanılan pratik bir yöntemdir.

Bu çalışma kapsamında yaklaşık 270/85 duruşlu kaya şevi boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma, bükülme devrilmesi ve doğrudan devrilme türü hareketleri için kinematik analizler yapılmıştır.



Şekil 7. Volkanik kaya kütesine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) ve ana süreksizlik takımlarının konumları.

Figure 7. Contour diagram for the volcanic rock mass (lower hemisphere) and orientation of main discontinuity sets.

Çizelge 2. 270/85 duruşlu kaya kütesinde ölçülen süreksizlik takımlarının özellikleri.

Table 2. Characteristics of discontinuity sets measured in the 270/85 oriented rock mass.

Takım No	Süreksizlik Türü	Eğim Yönü Açısı (derece)	Eğim Açısı (derece)
1	Ekleme	66	24
2	Ekleme	213	71
3	Ekleme	264	78
4	Ekleme	324	68

Analizlerde aşağıda belirtilen iki aşama izlenmiştir; (1) Stereografik izdüşüm tekniğiyle şev büyük daresi ile süreksizliklerin büyük daireleri ve kutup noktaları (yönelim) stereonete işlenmiş, (2) yönelimler ve içsel sürtünme açısı saptanarak duraysızlık türü belirlenmiştir.

270/85 duruşlu kaya şevinde yapılan hat etüdü sonucunda tespit edilen 4 adet süreksizlik seti için kinematik analiz yapılmıştır. Şev

boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme analizleri yapılmıştır. Kinematik analizlerde sadece, süreksizliklerin yönelimi, şev yönelimi, süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısı dikkate alınır. Bunların dışında kalan; kohezyon, dış yükler, yeraltısuyu koşulları, şev geometrisi, kayan kütlelerin ağırlığı ve dinamik yükler gibi faktörler ise gözardı edilir. Bu nedenle, kinematik analiz yöntemi daha çok bir ön değerlendirme yöntemi olarak kabul edilir.

Süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılan eğrisel Barton-Bandis ölçütü için gerekli olan rezidüel sürtünme açısı Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Artık sürtünme açısının hesaplanmasında araziden alınan bloklar üzerinde yapılan tilt deneyinden elde edilen temel sürtünme açısı, ayrışma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri ve ayrışmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değerleri kullanılmıştır.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(\tau/R) \quad (1)$$

ϕ_r = Rezidüel Sürtünme açısı

ϕ_b = Temel Sürtünme açısı

r = ayrışma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri

R = ayrışmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değerleri

$$\phi_r = (32-20)+20(35/47) = 27 \text{ derece}$$

Kinematik analiz ve limit denge analizlerinde kullanılan kohezyon ve içsel sürtünme açısı Barton-Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2).

$$\tau = \sigma_n \tan[\phi_r + JRC \log_{10}(JCS / \sigma_n)] \quad (2)$$

τ = Makaslama dayanımı (MPa)

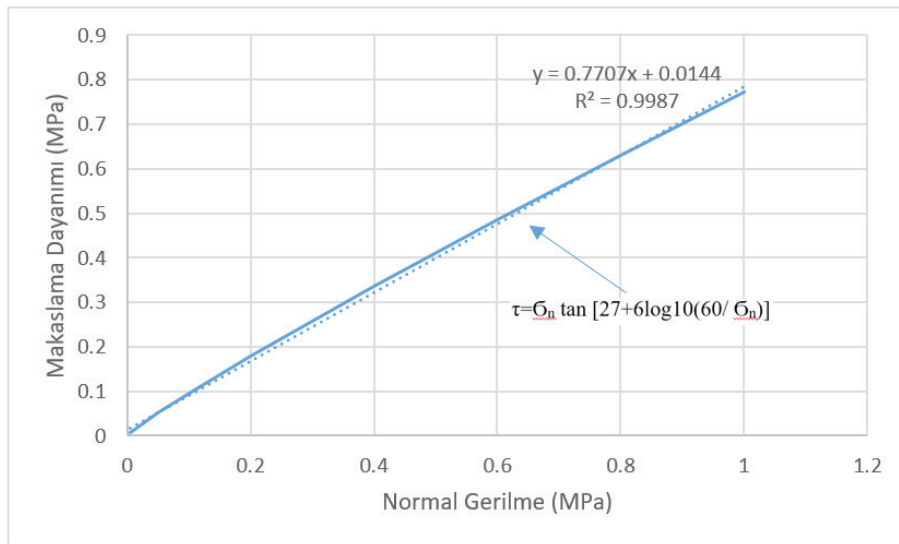
σ_n = Normal gerilme (MPa)

ϕ_r = Rezidüel sürtünme açısı (27)

JRC = Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı (6)

JCS = Süreksizlik yüzeyinin dayanımı (60 MPa)

Barton ve Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak normal gerilmelere karşılık makaslama dayanımları hesaplanmıştır (Şekil 8). Hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan grafikten kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplanmıştır.



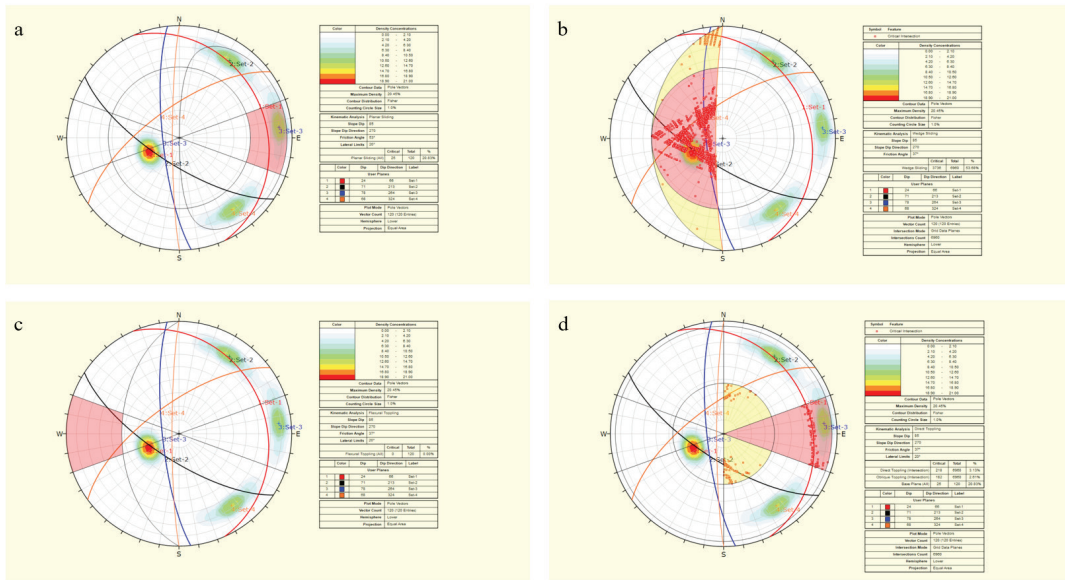
Şekil 8. Bazalt için görgül yenilme ölçütüne göre hazırlanmış süreksizlik yenilme zarfı.

Figure 8. Discontinuity failure envelope prepared according to empirical failure criteria for basalt.

Yapılan hesaplamalar sonucunda kohezyon 14.4 Kpa ve içsel sürtünme açısı ise 37 derece olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler kinematik ve limit denge analizlerinde kullanılmıştır.

Kinematik inceleme ile 264/78 duruşlu süreksizliğin kontrolünde düzlemsel kayma olasılığının (Şekil 9a), 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin kontrolünde kama tipi kayma olasılığının (Şekil 9b) olduğu belirlenmiştir. Düzlemsel ve kama tipi kayma riskinin

bulunduğu şevde süreksizlik konumları dikkate alınarak bükülme ve direk devrilme analizi de gerçekleştirilmiştir (Şekil 9c). Şekil 9c'de görülen ve devrilme riski taşıyan taralı alana hiçbir süreksizliğin kutup noktası düşmediği için bu şevde bükülme devrilmesi riskinin olmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 9d incelendiğinde doğrudan devrilme riskinin de olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3'te 270/85 duruşlu kaya şevi için yapılan kinematik analiz sonuçları özetlenmiştir.



Şekil 9. 270/85 duruşlu kaya şevinde düzlemsel kayma (a), kama tipi kayma (b), bükülme devrilmesi (c) ve doğrudan devrilme kinematik analizi (d).

Figure 9. Planar failure (a), wedge failure (b), flexural toppling (c), and direct toppling (d) kinematic analyses of the 270/85 rock slope.

Çizelge 4. 270/85 duruşlu kaya kütleğinde yapılan kinematik analiz sonuçları.

Table 4. Results of kinematic analyses on the 270/85 oriented rock mass.

Takım No	Süreksizlik Türü	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma	Bükülme Devrilmesi	Doğrudan Devrilme
1	Eklem	66/24°	-	-	-	-
3	Eklem	264/78°	Riskli	-	-	Riskli
2	Eklem	213/71°	-	Riskli	-	-
4	Eklem	324/68°	-	-	-	-

Limit denge analizleri

Kinematik analizleri sonucunda kaya kütlelerinde düzlemsel kayma ve kama tipi kayma olasılığının bulunduğu alanlarda limit denge analizleri yapılarak farklı koşullar duraylılık değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalardan elde edilen sonuç (güvenlik katsayısı, F), sadece incelenen yenilme yüzeyi için geçerlidir. Hesaplanan en küçük F, incelenen duraysızlık türü için o şevin güvenlik katsayısı olarak kabul edilir. Bu yöntemler: (1) kayan kütlelerin ağırlığını, (2) süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımını (c , ϕ), (3) gözenek suyu basıncını, (4) şevin geometrisini, (5) yer ivmesini (sismik koşulları), (6) var ise tansiyon çatlağının konumunu ve (7) dış yükleri dikkate alır.

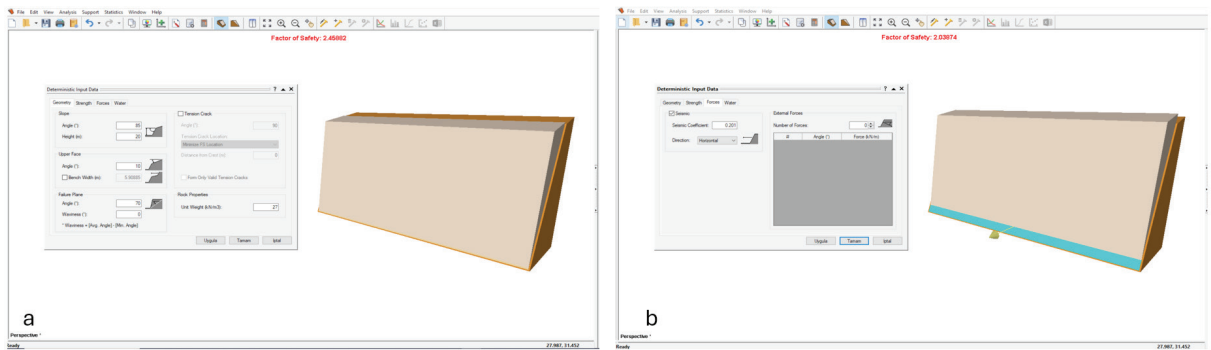
Çalışma kapsamında 264/78 duruşlu süreksizlik düzlemleri boyunca düzlemsel kayma

için ve 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca (271/56) kama tipi kayma için güvenlik sayısı değerleri SWedge 7.017 ve RocPlane 4.010 (Rocscience, 2023) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar depremlili ve depremsiz durumlar için yapılmıştır (Şekil 10a ve b ve 11a ve b). Yağışlı sezona dikkate alınarak analizlerde boşluk suyu basıncı dikkate alınmıştır. Depremlili durum için maksimum yatay yer ivmesi bileşeni 0.201 g alınmıştır (URL-2). Yapılan hesaplamalar sonucunda kohezyon değeri Limit denge analizlerinde kohezyon 14.4 KPa ve içsel sürtünme açısı ise 37 derece olarak kabul alınmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir. Orta Bölge (Bölge-3) için yapılan limit denge analizlerinde düzlemsel kayma ve kama tipi kayma için riskli durum olmadığı bu bölge için sadece devrilme riskinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Kaya şevindeki ters eğim bunun temel nedenidir.

Çizelge 5. Bölge-2'deki kaya şevi için yapılan limit denge analizi sonuçları.

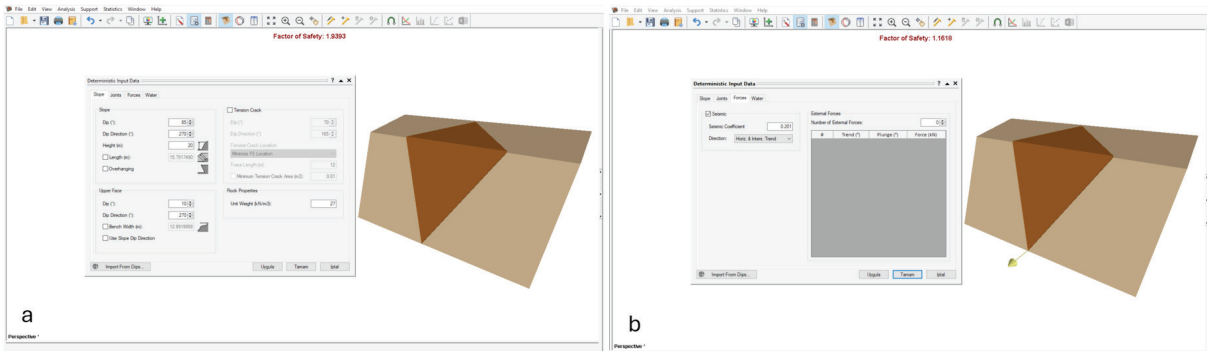
Table 5. Limit equilibrium analysis for the rock slope in Zone-2.

Deprem Durumu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma
Depremsiz	2.45	1.93
Depremlili ve Yağışlı Durum	2.08	1.16



Şekil 10. RocPlane 4.010 (Rocscience Inc, 2023) programında düzlemsel kayma için sismik olmayan (a), sismik ve yağışlı durum için limit denge analizleri (b).

Figure 10. Limit equilibrium analyses for planar failure in RocPlane 4.010 (Rocscience Inc, 2023) software for non-seismic (a), and seismic and rainy conditions (b).



Şekil 11. SWedge 7.017 (Rocscience Inc, 2023) programında kama tipi kayma için sismik olmayan (a), sismik ve yağışlı durum için limit denge analizleri (b).

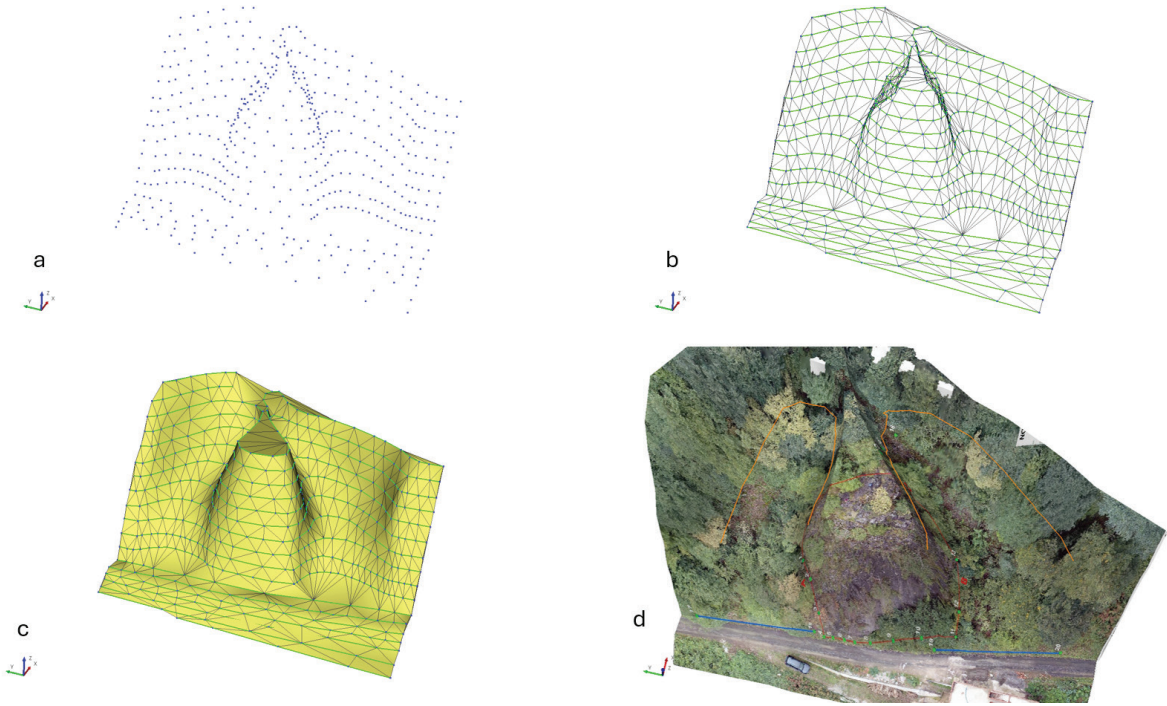
Figure 11. Limit equilibrium analyses for wedge type failure in SWedge 7.017 (Rocscience Inc, 2023) software for non-seismic (a), and seismic and rainy conditions (b).

ÜÇ BOYUTLU KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

Çalışma alanında yamaçlardan kopan ve üst kotlardan yerçekimi etkisi ile yuvarlanıp gelen bloklar Bölge-1 ve Bölge-2'deki vadilerde birikmiş durumdadır. Yamaçlardan kopan, üst kotlardan yuvarlanan ve vadide biriken blokların olası hareketleri yol ve yolun altında bulunan evleri tehdit etmektedir. Çalışma alanının topografik yapısı dikkate alındığında blokların olası hareketinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için koruma yöntemi olarak perde beton kullanılması uygun görülmüş ve analizler buna göre yapılmıştır. Önerilen perde duvarın uzunluğu ve yüksekliği 3 boyutlu kaya düşme analizi ile tespit edilmiştir. 3 boyutlu analizler RocPro3D 5.7.8 (RocPro3D, 2023) programı ile yapılmıştır. Analizlerde insansız hava aracı ile yapılan ölçümlerden elde edilen 5 cm çözünürlüğe sahip nokta bulutu kullanılarak oluşturulan katı model üzerinde 3 boyutlu kaya düşme analizi yapılmıştır. İki vadi içinde bulunan ve üst sonlardan kopup gelen bloklar dikkate alınarak analizlerde 10 ile 50 kg arasında bloklar kullanılmıştır.

Yapılan arazi çalışmaları sonrasında kaya parçalarının orman örtüsünün hemen bittiği dik yamaçlardan koptuğu ve vadi içine doğru yuvarlanıp biriktiği tespit edilmiştir. Yapılan bu tespit üzerine kaynak bölgeler vadilerin üst kotlarına ve vadi yamaçlarına tanımlanmıştır (Şekil 12 d).

3 boyutlu kaya düşme analizlerinde Kuzey Bölge (Bölge-1) ve Güney Bölge'de (Bölge-2) bulunan vadilerin üst kotlarına kaynaklar yerleştirilmiştir. Analizlerde 10 ve 50 kg ağırlığında toplam 500 adet blok yuvarlanmıştır. Yuvarlanan blokların izledikleri yollar ve sıçrama yükseklikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler ile önerilen perde duvarın boyutları tespit edilmiştir. Bölge-1'deki vadiden yuvarlanan 250 adet bloğun izlediği yollara bakıldığında blokların vadi ağzında 14 metre genişliğinde bir alanı etkilediği ve blokların 2.6 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır (Şekil 13). Bölge-2'deki vadiden yuvarlanan 250 adet bloğun izlediği yollara bakıldığında ise blokların vadi ağzında 25 metre genişliğinde bir alanı etkilediği ve blokların 1.4 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır (Şekil 14).



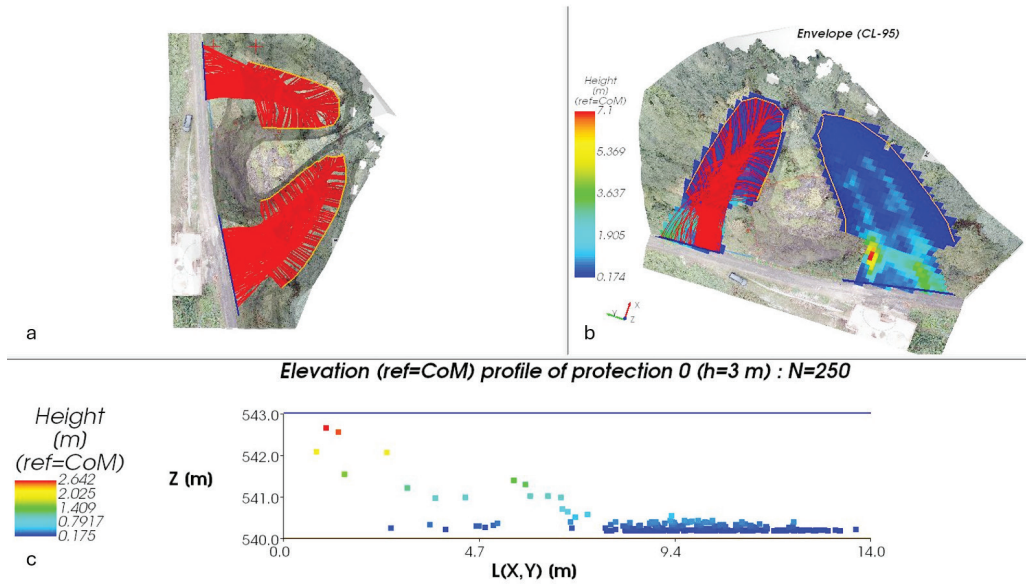
Şekil 12. Çalışma alanına ait nokta bulutu (a), nokta bulutundan oluşturulan üçgen modeller (b), 3 boyutlu katı model (c) ve ortofotonun katı model üzerine işlenmesi-kaynakların katı model üzerine yerleştirilmesi (d).

Figure 12. Point cloud for the study area (a), triangle models created from the point cloud (b), 3D solid model (c) and processing of orthophoto on the solid model and placing the source zones on the solid model (d).

Bu çalışmada Orta Bölgede (Bölge-3) ters kaya şevi eğimi nedeniyle beklenen doğrudan devrilmeyi önlemek için çelik ağ ile sarılmasının daha uygun olacağı düşünüldüğünden bu bölge için 3 boyutlu kaya düşme analizi yapılmamıştır. Bu bölgede yol dar olduğu için perde duvar ve çelik bariyer uygulaması yapmak mümkün değildir. Kuzey Bölge (Bölge-1) ve Güney Bölge (Bölge-2) içinde bulunan vadi içlerindeki önceden düşmüş bloklar dikkate alındığında

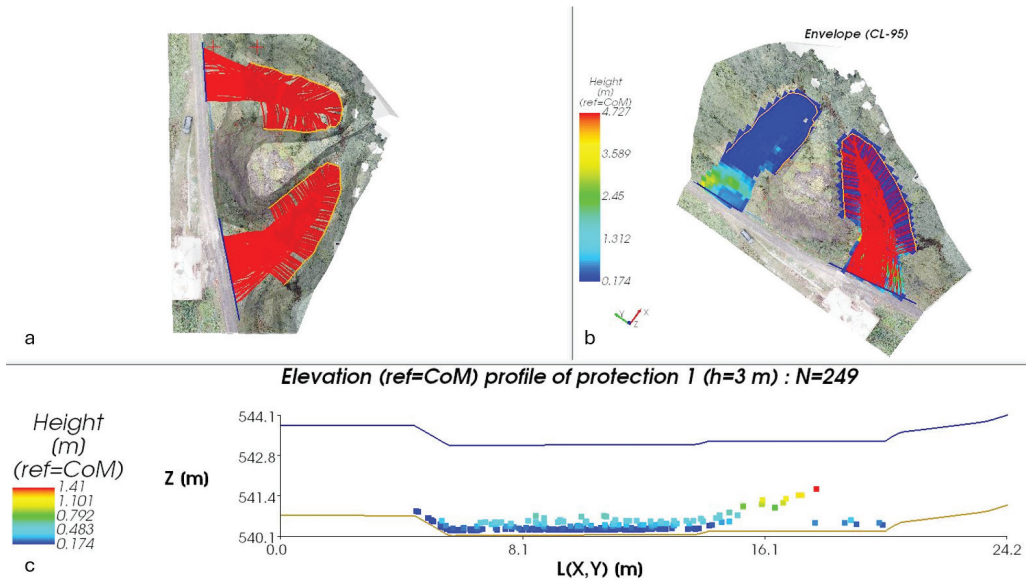
gelen bloğun enerjisinden çok sıçrama yüksekliği önemlidir.

Küçük boyuttaki blokların duvarı yıkmasından çok duvarın üstünden aşma riski olduğundan 3 boyutlu analizlerde sıçrama yüksekliğinin yanında vadi içinde yuvarlanan blokların kinetik enerjilerine bakılmıştır (Şekil 15).



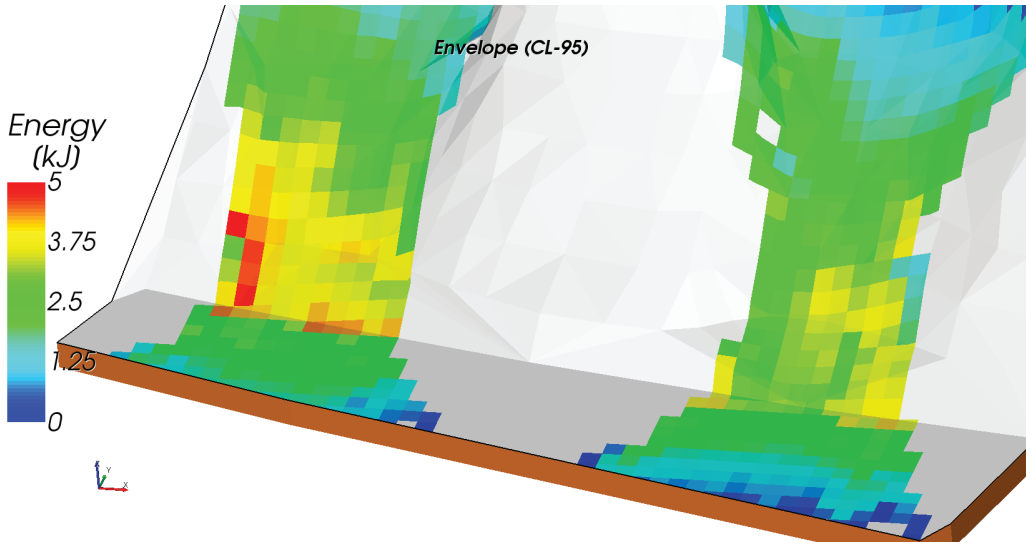
Şekil 13. Bölge-1'deki blokların izledikleri yollar (a), blokların sıçrama yüksekliği haritası (b) ve duvara çarpan blokların izleri (c).

Figure 13. Paths of blocks in Zone-1 (a), jump height map of the blocks (b) and traces of the blocks hitting the wall (c).



Şekil 14. Bölge-2'deki blokların izledikleri yollar (a), blokların sıçrama yüksekliği haritası (b) ve duvara çarpan blokların izleri (c).

Figure 14. Paths of blocks in Zone-2 (a), jump height map of the blocks (b) and traces of the blocks hitting the wall (c).



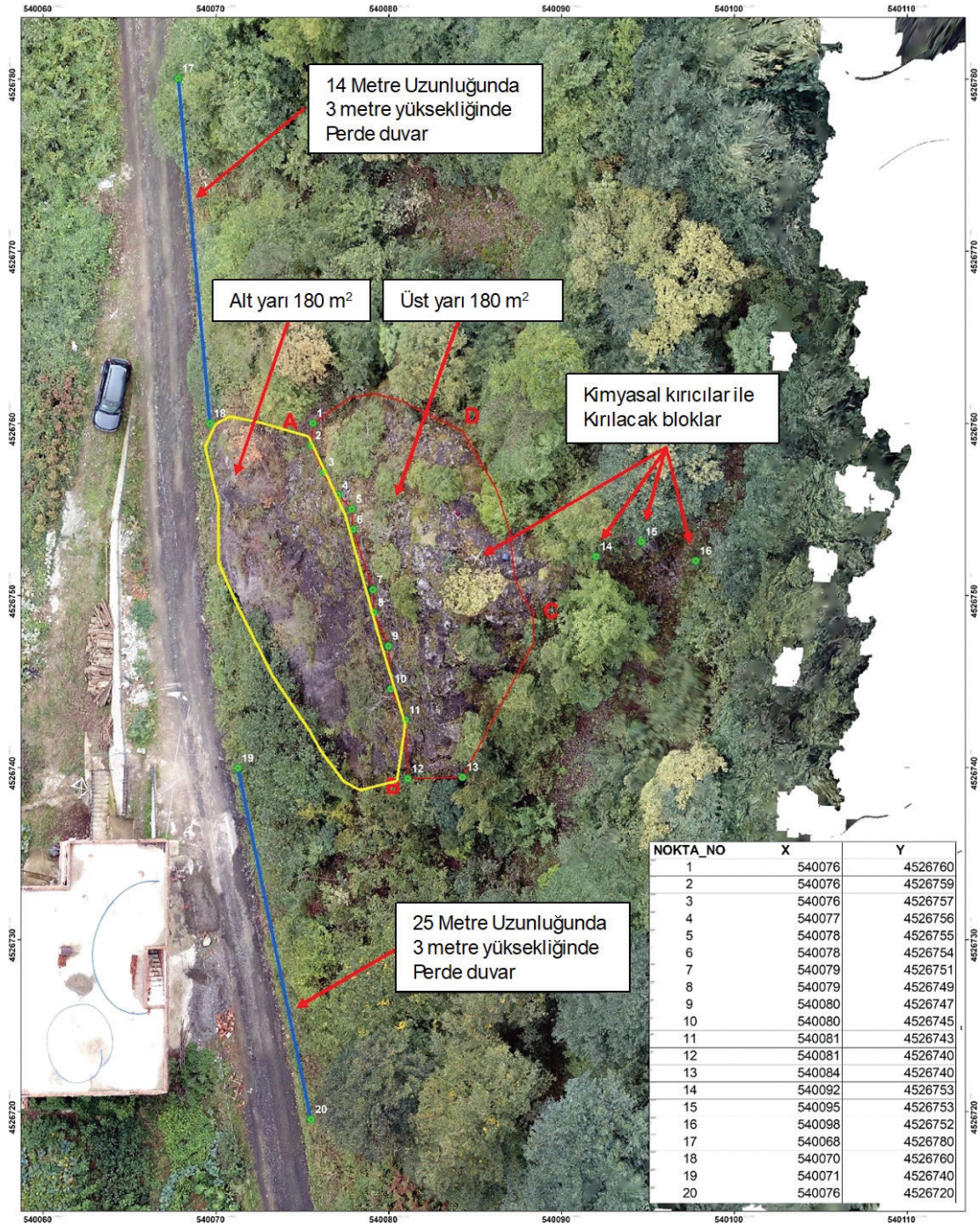
Şekil 15. Bölge-1 ve Bölge-2'deki vadilerden yuvarlanan blokların kinetik enerjileri.

Figure 15. Kinetic energies of blocks rolling down the slopes in Zone-1 and Zone-2.

BİRLEŞİK KAYA İSLAH ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan kinematik ve limit denge analizleri sonucunda çalışma konusu alanda düzlemsel kayma, kama tip kayma ve esnek devrilme riskinin olmadığı fakat Bölge-3'te (Orta Bölge) bulunan kaya şevinde süreksizlikler ile bölünmüş olan bloklarda doğrudan devrilme riskinin olduğu tespit edilmiştir. Bölge-1-2'de bulunan yamaçlardan blok düşmeleri (10-50 kg ağırlığında), vadi içlerinde biriken bloklarda moloz akması ve Bölge-3'ün üst kotlarında süreksizlikler tarafından bölünmüş serbest bir halde bulunan bloklarda ise düşme riski olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar uygulanacak kaya ıslah çalışmalarının belirlenmesi açısından çok önemlidir. Arazide yapılan detaylı çalışmalar sonucunda her bir bölge için ayrı risk oluşturan durumlar ve riski azaltmaya yönelik uygulamalar tespit edilmiştir.

Bölge-1'de vadi içinde yığılmış farklı boyuttaki kayaç parçaları ve kaynak bölgesinde bulunan blokların hareketi risk oluşturmaktadır. Bölgenin sık bitki örtüsü ile kaplı olması bu bölgede çelik ağ uygulamasının yapılmasına engel teşkil ettiğinden bu uygulama dikkate alınamamıştır. Kaynak bölgedeki blokların ve vadi içinde yığılmış malzemenin olası hareketinin etkileri 3 boyutlu kaya düşme analizi ile araştırılmıştır. Yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda hareket etmesi muhtemel blokların olası etkilerini en aza indirmek için yol kotunda vadi tabanı boyunca 14 metre uzunluğunda 3 metre yüksekliğinde (temel hariç) perde duvar uygulaması önerilmiştir. Ayrıca önerilen perde duvarın performansı 3 boyutlu kaya düşme analizinde test edilmiştir. Yapılan duvarın gelen blokların tuttuğu tespit edilmiştir. Daha önceden düşmüş, birikmiş ve düşmesi muhtemel blok boyutları dikkate alındığında duvar arkası enerji sönmüleyici bir sistem önerilmemiştir.



Şekil 16. Kaya düşmesi riskini azaltmaya yönelik önerilen perde duvarlar, çelik ağıın ve kırılacak blokların konumları.
Figure 16. Proposed shear walls to reduce rockfall risk, locations of steel mesh and breakable blocks.

Bölge-2’de ise kaya kütlelerinin üst kesimlerinde bulunan bloklar ve vadi içinde yığılmış farklı boyuttaki kayaç parçalarının hareketi risk teşkil etmektedir. Bu bölgede süreksizlikler tarafından bölünmüş serbest haldeki blokların yerinde sabitlenmesi ve/veya blokların olası hareketlerini durduracak çelik bariyerlerin vadi içinde uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle süreksizlikler tarafından bölünmüş serbest haldeki blokların kimyasal madde kullanılarak daha küçük parçalara bölünmesi önerilmiştir. Gerek büyük blokların parçalanması sonucu oluşan kayaç parçalarının gerekse vadi içindeki farklı boyuttaki kayaç parçalarının olası hareketlerinden kaynaklanacak olası etkiler 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda olası blok hareketlerinin riskini minimuma indirmek için yol kotunda vadi tabanı boyunca 25 metre uzunluğunda 3 metre yüksekliğinde (temel hariç) perde duvar uygulaması önerilmiştir. Önerilen perde duvarın performansı 3 boyutlu kaya düşme analizinde test edilmiştir. Yapılan duvarın gelen blokların tuttuğu tespit edilmiştir.

Kaya kütlelerinin mostra verdiği Orta Bölgedeki (Bölge-3) alanda şev yüzeyinde süreksizlikler tarafından bölünmüş bloklar ve şev tepesinde ise üst zonlardan yuvarlanıp gelmiş duran serbest bloklar mevcuttur. Kaya şevinde süreksizlikler dikkate alınarak yapılan kinematik ve limit denge analizleri sonucunda bu bölgede sadece doğrudan devrilme riskinin olduğu tespit edilmiştir. Şev tepesinde yer alan serbest haldeki blokların kimyasal madde kullanılarak daha küçük parçalara bölünmesi, şev yüzeyinde süreksizlikler ile bölünmüş askıda bulunan doğrudan devrilme riski olan blokların çelik ağ kullanılarak yerinde sabitlenmesi uygun görülmüştür. Çelik ağ ile kaplanması gereken kaya kütleleri Şekil 14’te verilmiştir. Yapılan hesaplamada kaplanması gereken toplam yüzey 360 m² olarak hesaplanmıştır.

Askıda blokların bulunduğu üst yarıda blok boyutları dikkate alındığında kaya şevinin çelik ağ ve halka panel ağla sarılmasından sonra yatayda ve düşeyde 100 cm ara ile çelik halatla sarılması, 2 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi, daha masif olan alt yarıda yatayda ve düşeyde 200 cm ara ile çelik halatla sarılması, 1 metre uzunluğunda ve 4 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi önerilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Trabzon İli Akçaabat İlçesi sınırları içinde meydana gelen kaya duraysızlıkları çalışılmış ve bu kapsamda 3 boyutlu kaya düşme analizleri yapılmıştır. Yapılan arazi çalışmaları sonucunda; çalışma alanı ve çevresinde Kabaköy formasyonu bazalt, andezit ve piroklastitlerinin yüzeyleme verdiği tespit edilmiştir. Volkanik birimlerden oluşan çalışma alanı, litolojik özellikler, morfoloji, yerleşim durumu, bitki örtüsü ve alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemleri dikkate alınarak Bölge-1 (Kuzey Bölge), Bölge-2 (Güney Bölge) ve Bölge-3 (Orta Bölge) olmak üzere 3 farklı zona ayrılmıştır. Bu üç bölgeden biri olan Bölge-3’te ki süreksizlik kontrollü kütle hareketlerinin araştırması için yapılan hat etüdü çalışması ile süreksizlik özellikleri tayin edilmiş ve kontur diyagramları hazırlanmıştır. Hazırlanan kontur diyagramı ile 270/85 duruşlu kaya şevinde kinematik analiz yapılmıştır. Kinematik analizlerde 264/78 duruşlu süreksizlik düzlemleri boyunca düzlemsel kayma-direkt düşme ve 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca (271/56) kama tipi kayma riski olduğu belirlenmiştir. Sonrasında kinematik analizler sonucunda tespit edilen düzlemsel ve kama tipi kayma hareketi için limit denge analizleri yapılmıştır. Yapılan limit denge analizlerinde düzlemsel kayma için depremsiz durumda 1,65 ve depremlili durum için 1,48

olarak hesaplanmıştır. Kama tipi kayma hareket için ise depremsiz durumda 1,62 ve depremlili durum için 1,29 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda çalışma konusu alanda düzlemsel kayma, kama tipi kayma, devrilme riskinin olmadığı hesaplanmıştır. Sadece Bölge-3'te ki üst yarıda bulunan şevin negatif eğimli kısmında bulunan 264/78 duruşlu süreksizlik boyunca direkt düşme riski söz konusu olduğu tespit edilmiştir.

Bölge-1 ve Bölge-2'yi içine alan yamaç ve vadi üst kotlarında bulunan riskli serbest-birikmiş blokların olası hareketleri Rocpro3D programı ile 3 boyutlu olarak modellenmiştir. 3 boyutlu modelleme ile bu iki bölgede bulunan 10-50 kg ağırlığında 500 adet blok yuvarlanarak blokların vadi boyunca izledikleri yollar ve sıçrama yükseklikleri hesaplanmıştır. Analizler sonucunda Bölge-1'de blokların 14 metre genişliğinde bir alana yayıldığı ve blokların 2.6 metre yüksekliğe sıçradığı, Bölge-2'de ise blokların 25 metre genişliğinde bir alana yayıldığı ve blokların 1.4 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır. Yapılan tüm analizler sonucunda Bölge-1 ve Bölge-2'de bulunan riskli blokların olası hareketlerinin olumsuz etkilerini ve bir moloz akmasını önlemek için Bölge-1'de bulunan vadinin ağızına 14 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar, Bölge-2'de bulunan vadinin ağızına 25 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar yapılması önerilmiştir.

Bölge-3'ün üst kesimlerinde blokların ve ters eğimden kaynaklı düşmeleri önlemek için 360 m² alanın halat destekli çelik ağ ile sarılması önerilmiştir. Bölge-3'te bulunan büyük tasviye edilemeyen blokların kimyasal kırıcı ile kırılması, genel bir şev temizliğinin yapılması ve en sonda askıda blokların bulunduğu üst yarıda yatayda ve düşeyde 100 cm ara ile çelik halatla

sarılması, 2 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi, daha masif olan alt yarıda yatayda ve düşeyde 200 cm ara ile çelik halatla sarılması, 4 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi önerilmiştir. Ankraj boylarının en az 1 metre olması önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akgün, A. (2011). Assessment of possible damaged areas due to landslide-induced waves at a constructed reservoir using empirical approaches: Kurtun (North Turkey) Dam reservoir area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1341-1350. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1341-2011>
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A.Ö., Akın M.K., Topal, T. (2019). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 43, 211-232. <https://doi.org/10.24232/jmd.655005>
- Alemdağ, S., Zeybek, H.I., Külekçi, G. (2019). Stability evaluation of the Gümüşhane Akçakale Cave by Numerical Analysis Method. *Journal of Mountain Science* 16 (9), 2150–2158. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5529-1>
- Alizadeh, E. (2021). Altındere Vadisi (Maçka-Trabzon) boyunca gözlenen kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyelinin çevresel etkilerinin 2 ve 3 boyutlu benzetim modellerle incelenmesi. [Doktora Tezi] Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altay, G. (2015). Kaya Düşmelerine Karşı Kullanılan Toprak Dolgu Setlerin Nümerik İncelenmesi. [Yüksek Lisans Tezi] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arslan, M., Aslan, Z. (2006). Mineralogy, Petrography and Whole-Rock Geochemistry of the Tertiary Granitic Intrusions in Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2), 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.03.002>
- Arslantürk, F. (2022). Yedigöl köyü (İspir/Erzurum) ve çevresi kaya düşme tehlikesinin 2-3 boyutlu modellerle analizi [Yüksek Lisans Tezi].

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- Aydın, F., Karslı, O., Sadıklar, M.B. (2003). Mineralogy and Chemistry of Biotites from Eastern Pontide Granitoid Rocks, NE-Turkey: Some Petrological Implications for Granitoid Magmas. *Geochemistry*, 63, 163–182. <https://doi.org/10.1078/0009-2819-00027>
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10, 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Barton, N., & Bandis, S. C., (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, 603- 610.
- Buz, R. (2019). Şahinefendi (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Caymaz, P. (2023). Karahıdırlı (Mersin) çevresindeki kaya düşmelerinin üç boyutlu analizi ve koruma yöntemlerinin belirlenmesi [Doktora Tezi]. *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Çapar, N. (2018). Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi [Doktora Tezi]. *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dağ, S., Bulut, F., Alemdağ, S., & Kaya, A. (2011). A general assesment for methods and parameters used in production of landslide susceptibility maps. *Gümüşhane University J Sci Technol Inst*, 1(2), 151-176.
- Dearman, W., Turk, N., Irfan, Y., & Rowshanei, H. (1987). Detection of rock material variation by sonic velocity zoning. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 35(1). <https://doi.org/10.1007/BF02590472>
- Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetçi, M. O., & Yahşi, B. K. (2019). Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology*, 249, 112-128. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.025>
- Ersoy, H., Karahan, M., & Öztürk, H. (2020). Baraj rezervuarlarında heyelanlardan kaynaklanacak itki dalga özelliklerinin ampirik ilişkilerle değerlendirilmesi: Borçka Barajı örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(2). <https://doi.org/10.21324/dacd.621377>
- Gelişli, K., Şeren, A., Babacan, A. E., Çataklı, A., Ersoy, H., & Kandemir, R. (2011). The Sumela Monastery slope in Maçka, Trabzon, Northeast Turkey: rock mass properties and stability assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 577-583. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0343-6>
- Gökçe, O., Özden, Ş. and Demir, A. (2008). “Türkiye’de Afetlerin Mekânsal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgileri Envanteri.” T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı.
- Grosic, M., Arbanas, Z., Udovic, D. (2009). Designing And Constructing Rockfall Barriers – Experiences İn Republic of Croatia. *ISRM Regional Symposium-EUROCK 29-31 October 2009, Croatia*, 113.
- Güven, İ. H. (1993). *Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu*. MTA Yayınları.
- IAEG (1976). *Engineering Geological Maps: A Guide to Their Preparation*. International Association of Engineering Geology. UNESCO Press. 79 p. Paris.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1976). *Engineering geological maps*. The UNESCO Press, 15, 78
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1978). *Comission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Suggested Methods for The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-68.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring. International Society of Rock Mechanics Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (2007). In: Ulusay R, Hudson JA (eds) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. Kazan Offset Pres, 628 p. Ankara.
- Kadioğlu, M., (2006). Heyelan ve sel risk yönetimi. 1. Heyelan Sempozyumu. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (s.38-50).
- Karahan, M., Ersoy, H., & Akgun, A. (2020). A 3D numerical simulation-based methodology for assessment of landslide-generated impulse waves: a case study of the Tersun Dam reservoir (NE Turkey). *Landslides*, 17, 2777-2794. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01440-4>
- Kaya, A., & Midilli, Ü. M. (2020). Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: a case study from NE Turkey. *Journal of Mountain Science*, 17(11), 2624-2635. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6306-x>
- Keskin, B. (2019). Zonguldak-Kilimli Yolunda Kaya Düşme Potansiyelinin Araştırılması [Yüksek Lisans Tezi]. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kırbaş F. (2019). Kızıllar Mahallesinin (Tepebaşı, Eskişehir) Çevresindeki Kaya Düşmesi Duraysızlıklarının Araştırılması ve Çözüm Önerileri [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Koçyiğit, T. (2019). Göre (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lambert, S., & Bourrier, F. (2013). Design of rockfall protection embankments: a review. *Engineering geology*, 154, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.012>
- Önsoy, H., Murat, İ.K., Kankal, M., Yüksek, Ö., & Filiz, M. H. (2008). Doğu Karadeniz havzasında oluşan taşkınların nedenleri çözüm önerileri. Taşkın, Heyelan ve Dere Yataklarının Korunması Konferansı (s. 17-28).
- Polat, A. (2020). CBS Tabanlı 3b Kaya Düşmesi Analizi Ve Veri Hazırlama Süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1205-1222. <https://doi.org/10.17482/uumfd.769109>
- San, N.E. (2017). Ankara Kalesi Çevresinde Kaya Düşmesinin İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Şaraldı, M.H. (2015). Tatların (Nevşehir) Yeraltı Şehrini ve Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi. [Yüksek Lisans Tezi] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ... & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617-2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>
- Wang, X., Frattini, P., Stead, D., Sun, J., Liu, H., Valagussa, A., & Li, L. (2020). Dynamic rockfall risk analysis. *Engineering Geology*, 272, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105622>
- URL-1 TATD, (2023, 6 Haziran). Türkiye Acil Tıp Derneği. 2020'de Türkiye ve Dünyada En Sık Görülen Doğal Afetler. <https://tatd.org.tr/afet/afet-yazi-dizisi/2020de-turkiye-ve-dunyada-en-sik-gorulen-dogal-afetler>
- URL-2. EM-DAT, (2023, 6 Haziran). The International Disaster Database. <https://www.emdat.be/>

Karahan, Sünnetçi, Ersoy, İpek

URL-3. AFAD, (2023, 8 Haziran). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>

URL-4. AFAD, (2023, 8 Haziran). Trabzon İl Risk Azaltma Planı – İRAP. <https://trabzon.afad.gov.tr/il-planlari>

Derleme / Review

Maden Kaynak Belirleme Sondaj Programlarının Optimizasyonu

Optimization of Mineral Resource Definition Drilling Programs

Yusuf Ziya ÖZKAN 

DAMA Mühendislik A.Ş. Çankaya, Ankara

Geliş (Received): 17.10.2024 / Düzeltme (Revised): 11.11.2024/ Kabul (Accepted): 16.12.2024

ÖZ

Maden kaynak belirleme sondaj programları, maden yataklarının sınırlarını ve işletilebilirliğini etkileyen özelliklerini belirlemek için yapılan bir örnekleme sürecidir. Bu süreçte, sistematik ve tesadüfi olmak üzere iki tür örnekleme hatası bulunur. Sistematik hatalar, cihaz kalibrasyon hataları veya örneklerin yatağı yetersiz temsil etmesi gibi sorunlardan kaynaklanır ve tahminlerin doğruluğunu olumsuz etkiler. Tesadüfi hatalar ise örneklerin rastgele dağılımı veya doğal değişkenlikten kaynaklanır ve tahminlerde belirsizliğe neden olur. Bu hataların etkisi, daha fazla örnekleme yaparak azaltılabilir, ancak sondaj maliyetli bir işlem olduğu için maliyet ile kabul edilebilir bir belirsizlik düzeyi arasında bir denge kurulması zorunludur. Maden kaynak belirleme sondaj programının optimizasyonu, sondaj noktalarının yerleşimini veya sondaj kuyuları arasındaki mesafeyi, bu dengeyi koruyacak şekilde belirlemeye odaklanır. Geometrik yaklaşım, sondaj etki alanlarının örtüşmesini en aza indirerek optimizasyon yaparken, jeostatistik yöntemler kriging varyansı gibi ölçütlere göre belirsizliği kabul edilebilir seviyelere düşürmeye çalışır. Bilginin değeri yaklaşımı, elde edilen bilgiden ekonomik olarak en yüksek faydayı sağlarken, yanlış sınıflandırma maliyetlerini minimize etmeyi ve ekonomik kayıpları önlemeyi hedefler. Genetik algoritmalar ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi meta-sezgisel yöntemler de belirsizlik yönetiminde etkilidir, ancak yüksek hesaplama gücü gerektirdiğinden sınırlı uygulanmaktadır. Bu optimizasyon yöntemleri, maliyetleri düşürerek ve maden kaynak modelinin doğruluğunu artırarak önemli katkılar sağlar.

Anahtar Kelimeler: Maden kaynak belirleme sondaj programı, örnekleme hataları, geometrik yaklaşım, kriging varyansı, bilgi değeri, yanlış sınıflandırma maliyetleri, meta-sezgisel yöntemler.

ABSTRACT

Mineral resource definition drilling programs are a sampling process used to determine the boundaries and characteristics of mineral deposits. There are two types of sampling errors in this process: systematic and random. Systematic errors arise from issues such as equipment calibration errors or insufficient representation of the deposit by the samples, which negatively affect the accuracy of predictions. Random errors, on the other hand, result from the random distribution of samples or natural variability, leading to uncertainty in predictions. The impact of these errors can be reduced through increased sample size, but since drilling is an expensive operation, it is essential to strike a balance between cost and achieving an acceptable level of certainty. The optimization of resource definition drilling focuses on determining the placement of drilling points or spacing between drill holes in a way that maintains this balance. The geometric approach aims to optimize by reducing the overlap of drilling effects, while geostatistical methods seek to reduce uncertainty to acceptable levels using metrics like kriging variance. The value of information approach aims to maximize the economic benefit derived from the obtained data, while minimizing misclassification

costs focuses on preventing economic losses. Metaheuristic methods such as genetic algorithms and particle swarm optimization are also effective in managing uncertainty, but their application is limited due to the high computational power required. These optimization methods contribute significantly to reducing costs and improving the accuracy of the resource model.

Keywords: Resource definition drilling, sampling errors, geometric approach, kriging variance, value of information, misclassification costs, metaheuristic methods.

GİRİŞ

Maden kaynak belirleme için sondaj programları, maden yatağını sınırlandırmak ve işletilebilirliğini etkileyen özelliklerini (konumunu, boyutlarını, şeklini, jeolojik yapısını, mineral dağılımını, tenörünü/kalitesini, yoğunluğunu vb.) yeterli doğrulukta belirlemek için tasarlanan arama programlarıdır.

Maden kaynak belirleme sondajları, maden arama yatırımlarında en yüksek maliyetli adımlardan biridir. Her bir sondaj kuyusu; ekipman, iş gücü, ulaşım ve analiz gibi çeşitli giderler nedeniyle yüksek maliyetlere yol açar. Sondaj programlarının optimizasyonuna yeterince önem verilmemesi, yanlış konumlandırılmış veya gereksiz sondajlar nedeniyle hem maliyetlerin artmasına hem de zaman kaybına yol açar. Bu durum, sadece mali kaynakların boşa harcanmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda madenin değerlendirilmesinde gecikmelere ve dolayısıyla ciddi mali kayıplara yol açar.

Maliyet ve zaman sınırlamaları nedeniyle hedef evrendeki (aranan yataktaki) her bireyin (veya örnekleme biriminin) araştırılması genellikle mümkün değildir. Dolayısıyla maden kaynakları/rezervleri genellikle sondajlardan çıkarılan örneklerden elde edilen veriler kullanılarak tahmin edilir. Yani maden kaynak belirleme programları, özü itibarıyla sondajlarla yapılan bir mekânsal örnekleme sürecidir. Örnekleme temel amacı, bir örneklem tarafından sağlanan verilerden (istatistik)

bilinmeyen evren parametreleri hakkında istatistiksel çıkarım yapmaktır.

Gerçek ve tahmin edilen tenör değerleri karşılaştırıldığında her zaman bir fark vardır. Tahmin ile gerçek değer arasındaki bu farka örnekleme hatası denir. Dolayısıyla bir istatistiksel tahmin genel olarak eşitlik (1)'deki gibi ifade edilebilir;

$$\text{Parametre} = \text{İstatistik} \pm \text{Örnekleme Hatası} \quad (1)$$

Burada; parametre evrenin (yani maden yatağının) bilinmeyen bir özelliğidir (örneğin; tenörü), istatistik bu parametrenin örneklemeden elde edilen tahminidir (örneğin; örneklem tenör ortalaması).

Örnekleme sürecinde ortaya çıkabilen hatalar iki ana sınıfa ayrılır:

- Sistematik hatalar
- Tesadüfi hatalar

Sistematik hatalar, örnekleme sürecinde tutarlı bir şekilde aynı yönde sapmaya neden olan hatalardır. Bu hatalar iki ana nedenle ortaya çıkar:

1. Veri toplama ve veri kaydı hataları,
2. Temsiliyet hataları.

Birinci tür sistematik hatalar, örnekleme sürecinin değişik aşamalarında (örnek alma, taşıma ve hazırlama, analiz, veri kaydı ve yönetimi) kullanılan bozuk ya da kalibre edilmemiş ölçme cihazlarından, uygun olmayan ölçme yönteminden (örneğin; manyetik mineralli kayalar içinde açılmış bir sondajda

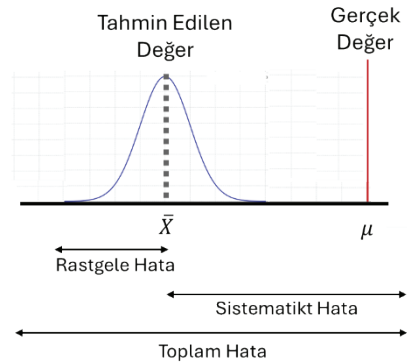
manyetik bir cihazla kuyu içi sapma ölçülmesi), ölçmenin yapıldığı ortamdan, üzerinde ölçme yapılan örneklerin sözü edilen bu etkenlerle etkileşiminden (örneğin; sülfür minerallerinin zamanla oksitlenmesinden) vb. nedenlerden kaynaklanır ve tutarlı bir şekilde aynı yönde sapma şeklinde ortaya çıkar. Bu tür hatalar, kalite güvence ve kontrol sistemleri uygulanmasıyla veya örnekleme süreciyle ilgili sorunları bulup düzelterek önlenir.

İkinci tür sistematik hatalar, örneklemin evreni yetersiz veya yanlı bir şekilde temsil etmesinden kaynaklanır. Örneklemin evreni iyi temsil etmemesi (örneğin yüksek tenörlü bölgede yoğunlaşan sondajlar), düşük tenörlü alanların yeterince örneklenmemesi nedeniyle sistematik bir hataya (temsiliyet hatası) ve olduğundan daha yüksek bir tenör tahminine yol açar. Temsiliyet hataları, eşit örnek desteği, mineralizasyonun mineralojik veya jeolojik farklılıkların belirgin olduğu tüm alanlarından örnek alınması, tesadüfi ve sistematik yöntemlerle yeterli sayıda ve yoğunlukta örnekleme ile önlenabilir.

Sistematik hatalar her örneğe (örnekleme birimine) aynı yönde ve eşit olarak etki etmelerinden dolayı örneklemin standart sapmasını değiştirmez. Bu nedenle sadece doğruluğu etkiler, güvenilirliği etkilemez. Ancak, sistematik hatalar tespit edilip düzeltilmezse, yanıltıcı sonuçlara yol açabilir ve bu da tahminlerin güvenilirliğini etkileyebilir. Bu yüzden, sistematik hataların önlenmesi esastır.

Tesadüfi veya rastgele hatalar, örneklenen evrenin(maden yatağının) doğal değişkenliğinden (jeolojik, mineral içeriği veya kimyasal bileşimlerindeki heterojenlik gibi) ve örnekleme sürecinde rastgele (numune alma noktalarının rastgele belirlenmesi, rastgele operatör ve cihaz hataları vb.) ortaya çıkan hatalardır. Bu hataların kaynağı öngörülemez ve yönü belirsizdir,

sonuçları her iki yöne de saptırabilir. Dolayısıyla tesadüfi hatalar birbirini dengeleyeceği için ortalamada sifıra yaklaşır (Şekil 1). Yeterli sayıda örnek alındığında rastgele hatalar azaltılabilir, ancak yok edilemezler.



Şekil 1. Örnekleme hataları: Sistematik hatalar, Tesadüfi hatalar.

Figure 1. Sampling errors: systematic errors and random errors.

Örnekleme içerisindeki verilerin standart sapması ve varyansı hesaplanarak tesadüfi hataların büyüklüğü belirlenebilir ve parametre tahminlerine yönelik güven aralıkları eşitlik (2) deki gibi ifade edilebilir;

$$\text{Parametre} = \bar{x} \pm z \times \text{SH} \quad (2)$$

Burada; \bar{x} örnekleme ortalamasını, yani örnekleme içindeki gözlem değerlerinin ortalamasını ifade eder ve genellikle evren ortalamasının tahmini olarak kullanılır. z (z -skoru veya puanı), seçilen güven düzeyine bağlı olarak belirlenen bir katsayıdır. Bu katsayı, standart normal dağılım tablosundan elde edilir. Örneğin, %95 güven düzeyi için z değeri yaklaşık olarak 1,96'dır, çünkü standart normal dağılımında ortalama 1,96 standart sapma uzaklıktaki aralık, toplam olasılığın %95'ini kapsar. SH (Standart Hata), örnekleme ortalamasının standart sapmasıdır ve evrendeki parametreyi tahmin ederken

Özkan

örneklem ne kadar değişkenlik gösterdiğini ifade eder. Standart hata, örneklem büyüklüğü arttıkça azalır (eşitlik 3) ;

$$SH = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Burada, s örneklem standart sapmasını, n ise örneklem büyüklüğünü (örnek sayısını) temsil eder.

Bu formül, örneklem ortalaması etrafında belirli bir güven aralığı oluşturur ve bu aralık, tahmin edilen bir evren parametresinin seçilen güven düzeyine bağlı bir olasılıkla belirli sınırlar içinde yer alabileceğini gösterir. Daha geniş güven aralıkları, daha yüksek rastgele hatayı gösterir. Örneğin, örneklem boyutu n=100, ortalaması =25 ve standart sapması s =5 ise, %95 güven düzeyinde bu tahminin ne kadar güvenilir olduğu eşitlik (4) ile hesaplanabilir:

$$\text{Standart Hata (SH)} = \frac{\text{Örneklemin Standart Sapması}}{\sqrt{\text{Örneklem Boyutu}}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{5}{\sqrt{100}} = \frac{5}{10} = 0,5 \quad (4)$$

Güven Aralığı: = $\mu \pm z \times SH = 25 \pm 1,96 * 0,5 = 25 \pm 0,98$ (evren parametresini gösterir)
%95 güven aralığı için z-değeri yaklaşık 1,96'dır.

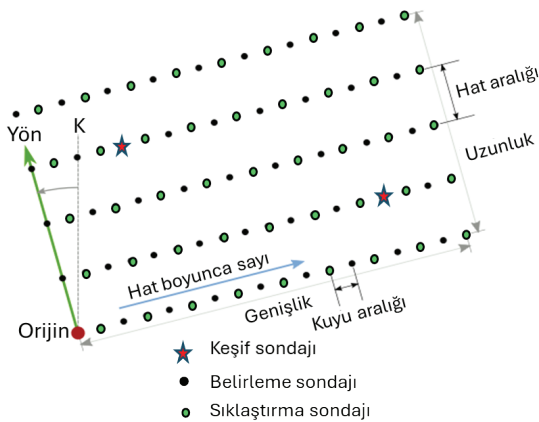
Buradaki örneklem hatası (0,98), örneklem ortalamasının evren ortalamasından sapma miktarını gösterir ve güven aralığı, evren ortalamasının bu aralıkta bulunma olasılığını belirler. Bu güven aralığı, evrenin gerçek ortalamasının %95 olasılıkla 24,02 ile 25,98 gram arasında olduğu anlamına gelir.

Maden kaynak belirleme sondaj programlarında sistematik hataların önlenmesi ve tesadüfi hataların azaltılması, güvenilir tahminler yapmak için büyük önem taşır. Sistematik hataların önlenmesi, bir kalite güvence ve kalite kontrol süreci ile sağlanırken, tesadüfi hataların azaltılması bir optimizasyon problemidir.

Tesadüfi hataları azaltma çeşitli faktörlere bağlıdır; bunların arasında en önemlisi tahmin için kullanılan örneklerin sayısıdır (Koppe vd., 2017). Tesadüfi hataların etkisi, daha fazla sondaj ve daha sık örneklem yapılarak azaltılabilir. Örnekler düzenli bir örneklem ızgarasında toplandığında örnekler arasındaki mesafe azaldıkça, merkezi limit teoremine göre, büyük örneklemle örnek dağılımlarının normal dağılıma yakınsaması nedeniyle verilerden tahmin edilen tenör hatası genellikle azalır ve eğer tamsayım yapılırsa, hata tamamen ortadan kalkar. Ancak örnek alma (sondaj) pahalı bir işlemdir. Bu nedenle, kabul edilebilir bir belirsizlik düzeyini sağlayacak örneklem yoğunluğu ile maliyetler arasında bir denge kurulması gereklidir. Mümkün olan en düşük maliyetle maden kaynaklarının tenör ve tonajını kabul edilebilir bir güvenilirlik düzeyinde tahmin edebilmek için gereken sondaj yoğunluğunun ve konumlarının belirlenmesi bir optimizasyon problemidir. Mekânsal otokorelasyonu (Haining, 2003) ve mekânsal heterojenliği (Wang vd., 2016) dikkate alan yaklaşımlar, bu süreci geleneksel yöntemlere kıyasla daha maliyet etkin kılarak sondaj programlarının verimliliğini artırır.

Hata aynı zamanda bloğun geometrisine ve blokların bölgesi içindeki verilerin değişkenliğine de bağlıdır. Daha homojen yataklarda büyük hacimli blokların tenörü tahmin edilirken daha düşük hatalar beklenebilir. Tabakalı örneklem (evrenin belirli alt gruplara bölünerek örnek alınması) veya alınan örneklerin homojen mineralizasyon alanlarına bölünerek bu alanlar temelinde tahmin yapılması tahmin doğruluğunu artırırken tesadüfi hataların kontrol altına alınmasına yardımcı olur. Bu yaklaşım, mümkün olan en düşük maliyetle örneklem hatasını veya tahmin belirsizliğini kabul edilebilir düzeyde tutmayı mümkün kılar.

Maden kaynak belirleme sondaj programlarında yaygın bir strateji, başlangıçta geniş bir ızgara (grid) üzerinde sondaj yapmaktır. Bu geniş aralıklı sondajlardan elde edilen veriler, maden kaynak tahmini için başlangıç bilgisi sağlar, ancak genellikle önemli belirsizlikler içerir. Aşamalı örnekleme süreciyle, ek sondajlar yapılarak bu belirsizlikler azaltılabilir. Uyarlanabilir ızgara yaklaşımı, mineralojik veya jeolojik heterojenliği dikkate alarak yatağın farklı alanlarında farklı yoğunluklarda örnekleme yapılmasını mümkün kılar. Örneğin, mineralizasyonun süreksiz olduğu bölgelerde ek sondajlarla bu süreksizliklerin neden olduğu belirsizlikler giderilmeye çalışılır. Mevcut sondajların aralarında ek sondaj yapılmasıyla gerçekleştirilen bu yeni sondajlara sıklaştırma sondajı denir (Şekil 2).



Şekil 2. Uyarlanabilir ızgara üzerinde aşamalı sıklaştırma sondajları (Micromine Help sayfasından değiştirilerek alınmıştır).

Figure 2. Stepwise infill drilling on an adaptive grid (Modified from the Micromine Help page).

Sıklaştırma sondajları genellikle birden fazla aşamada (veya sondaj kampanyası şeklinde) gerçekleştirilir. Her sondaj kampanyası sonunda, sıklaştırma sondajlarına devam edilip

edilmeyeceğine karar vermek için şu iki soru yanıtlanmalıdır:

1. “Belirlenmiş” veya “ölçülmüş” sınıfta maden kaynakları tanımlayabilmek için ek sondaj yapmaya ihtiyaç var mı? Eğer mevcut sondajlar bu sınıflama için yetersizse, ek sondajlar kaçınılmazdır.
2. Ek sondaj yapılacaksa, bu sondajların konumları (veya aralarındaki mesafe) ne olmalıdır?

Bu kararı verirken mevcut verilerdeki belirsizlik bölgeleri, mineralizasyonun değişkenliği ve sondajlar arasındaki mekânsal otokorelasyon dikkate alınmalıdır.

Görüldüğü gibi, maden kaynak belirlemeye yönelik sondajlarının aralıklarının optimizasyonu, sıklaştırma sondajları ve tenör kontrol süreçlerinde belirsizliği azaltmak ve gereksiz maliyetleri önlemek (ekonomik açıdan en uygun sondaj yoğunluğunu belirlemek) için yapılan önemli bir işlemdir (Vargas, 2017). Aşağıda bu optimizasyon probleminin formülasyonu ve çözümü için kullanılan başlıca yöntemler ele alınmaktadır.

OPTİMİZASYON PROBLEMİNİN FORMÜLASYONU

Maden kaynak belirleme sondajlarının optimizasyonu probleminde karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar önemli unsurlardır. Ayrıca, amaç fonksiyonunu oluşturabilmek için (veya fonksiyondaki sabitleri belirleyebilmek için) tasarım parametreleri hakkında bilgi veya tahminler gereklidir.

Karar Değişkenleri

Karar değişkenleri, optimizasyon problemi içerisinde seçilen ve optimize edilmesi gereken değişkenlerdir. Maden kaynak

belirleme sondajları için tipik olarak şu karar değişkenlerinden biri seçilir:

- **Sondaj Konumları:** Sondaj kuyularının nerelere yerleştirileceği, belirleme sondajı programının en önemli karar değişkenlerinden biridir. Bu, özellikle jeolojik veya mineralojik heterojenliğin yüksek olduğu sahalarda büyük önem taşır. Sondaj konumları, elde edilecek örnekleme dayalı maden kaynak tahminlerinin güvenilirliğini doğrudan etkiler. Karar değişkeni olarak sondaj koordinatlarının seçimi, hem veri toplama gereksinimlerini karşılayacak (yatakta jeolojik ve tenör değişkenlikleri) hem de çevresel ve yasal kısıtlamaları dikkate alarak sondaj yerleri seçiminde esneklik sağlar.
- **Sondajlar Arasındaki Mesafe (Örnekleme Yoğunluğu):** Daha sık (kısa mesafeli) sondaj, tahmin doğruluğunu artırırken maliyeti yükseltir; bu nedenle optimum örnekleme yoğunluğunun bulunması gerekir. Sondaj yoğunluğu belirlenen bir alanda jeolojik süreklilik veya süresizlik ile bağlantılıdır. Mineralizasyonun değişken olduğu yerlerde sondajlar daha sık yapılırken, homojen alanlarda daha geniş aralıklarla sondaj yapılabilir.

Bu karar değişkenlerinin her biri, maden kaynağı tahmininin kesinliği/belirsizliği ile maliyetler arasında bir denge kurma sürecinde optimize edilir.

Tasarım Parametreleri

Maden kaynak belirleme sondaj programları tasarımında en önemli değişkenlerden biri etki mesafesidir. Etki mesafesi, bir sondajdan alınan örneğin çevresindeki bölgenin tenörü veya diğer özellikleri hakkında güvenilir bilgi sağlayabildiği maksimum mesafeyi ifade eder. Bu mesafe,

sondajda elde edilen verilerin, çevresindeki diğer örnekleme verileriyle otokorelasyon içinde olduğu belirli bir yarıçaplı dairesel alan ya da 3 boyutlu düşünüldüğünde küresel bir hacim (anizotropi durumunda elips veya elipsoit) olarak tanımlanır. Aynı zamanda örnek temsil alanı veya örnek temsil hacmi olarak da adlandırılabilir.

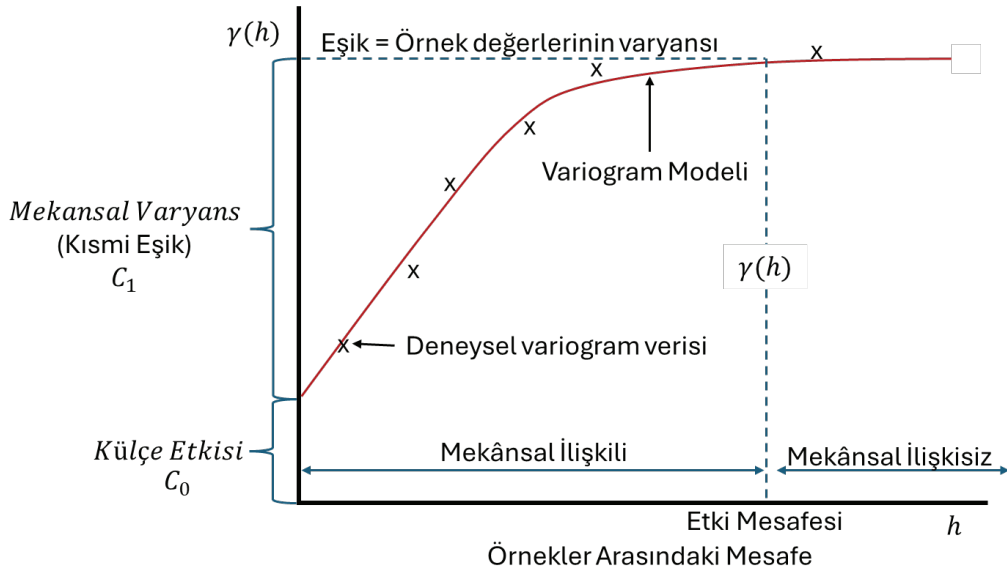
Etki mesafesi, doğrudan sondajla ilişkilendirilen bir özellik olsa da esasen mineralizasyonun jeolojik ve tenör sürekliliğine bağlıdır. Yüksek süreklilik durumunda, etki mesafesi genellikle daha uzun olur; yani sondajdan elde edilen veriler daha geniş bir alan için geçerli olabilir. Buna karşılık, düşük süreklilik durumunda etki mesafesi kısalmır ve daha fazla sondaj yapma gereksinimi ortaya çıkar.

Mineralizasyonun doğal değişkenliği ya da sürekliliği, yönere göre farklılık gösterebilir, yani anizotropik olabilir. Bu durumda, mineralizasyonun yöne bağlı mekânsal sürekliliği farklı etki mesafeleri gerektirebilir ve dolayısıyla sondaj mesafeleri de bu duruma uygun olarak değişiklik gösterebilir.

Etki mesafesi genellikle variogram analizleriyle belirlenir (Şekil 3) ve çoğunlukla variogram etki mesafesinin belirli bir yüzdesi olarak kabul edilir. Eğer variogram analizi yapılabilecek yeterli sondaj verisi yoksa, benzer jeolojik özelliklere sahip diğer maden sahalarındaki etki mesafesi verileri kullanılarak karşılaştırmalar yapılabilir ve uygun bir temsil alanı belirlenebilir.

Amaç Fonksiyonu

Maden kaynak belirleme sondaj programlarının optimizasyonunda genellikle birden fazla amaç gözetilir. Bu süreç, birden çok hedef arasında dengeli bir çözüm arayışını gerektirir. Temel amaçlar şunlardır:



Şekil 3. Tipik bir variogram modeli. Külçe Etkisi = Analiz hatası + Doğal Değişkenlik. Etki mesafesi= Örnekler arasında maksimum değişkenliğe (yani eşığe) ulaşılan mesafe.

Figure 3. A typical variogram model. Nugget effect = analytical error + natural variability. Range = distance at which maximum variability between samples (i.e. the sill) is reached.

1. Ekonomik değerlerin maksimizasyonu:

Sondaj programının, projenin toplam ekonomik değerini (örneğin, Net Bugünkü Değer-NBD) maksimize edecek şekilde tasarlanması bu hedefin özüdür. Bu, en yüksek getiriye sağlayacak alanlara öncelik verilerek yapılır. En kalın, en yüksek tenörlü ve çıkarılması ile işlenmesi en kolay yatak bölümlerine odaklanmak, programın ekonomik etkinliğini artırır. Bu strateji, sınırlı sondaj bütçesiyle maksimum ekonomik kazanç elde etmeyi hedefler.

2. Belirsizliğin minimizasyonu:

Sondaj programının, maden kaynağına ilişkin belirsizlikler (mineralizasyonun yayılımı, kalitesi ve miktarı vb.) kabul edilebilir bir düzeye indirecek şekilde minimize edilmelidir.

Bu, maden kaynak modellemelerinde daha doğru tahminler elde etmeyi sağlar. Daha az belirsizlik ve daha güvenilir bir tahmin sağlar. Ancak, belirsizliği azaltmak için gerekli sondaj yoğunluğunu artırma nedeniyle tahmin maliyeti de artar. Bu nedenle, kabul edilebilir bir belirsizlik seviyesinin tespit edilmesi önemlidir.

3. Maliyetlerin minimizasyonu:

Sondaj programı, proje maliyetlerini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. Maliyet etkinliğini sağlamak için sondajlar, en az sayıda kuyu ile en fazla bilgi elde edilebilecek şekilde planlanmalıdır. Bu, optimum sondaj aralıkları ve konumlarının belirlenmesi anlamına gelir. Gereksiz sondajlardan kaçınarak, sınırlı kaynakların verimli kullanılması ve projenin finansal sürdürülebilirliği sağlanır.

Belirsizliğin ve maliyetin eşzamanlı olarak minimize edilmesi genellikle çatışan iki amaçtır. Daha fazla sondaj, belirsizliği azaltabilir ancak maliyetleri artırır. Tam tersi şekilde, sondaj sayısını azaltarak maliyetler düşürülebilir, fakat bu durumda belirsizlik artar. Bu çatışma, optimizasyon sürecinin temel zorluklarından biridir. Tahmin belirsizliği ve maliyetler arasında en uygun dengenin (maliyet - fayda dengesi) kurulması, sondaj programının başarısının anahtarıdır.

Bu tip çok amaçlı optimizasyon problemlerinde, amaca tam uygun olan tek bir çözüm bulunması zordur. Bu nedenle, ödünleşim çözümleri üretilir. Ödünleşim çözümleri belirsizlik ve maliyet gibi çatışan amaçları dengede tutan ve her iki amacın da makul seviyelerde karşılandığı çözümlerdir. Bu yaklaşım, dengeli optimizasyon olarak bilinir ve çatışan hedefler arasında en iyi ortak faydaya ulaşmayı sağlar.

Sonuç olarak, maden kaynak belirleme sondaj programlarının optimizasyonu, örnekleme maliyeti ile tahmin belirsizliği arasındaki dengeyi bulmayı amaçlar. Bu optimizasyon, mekânsal örnekleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir ve jeolojik heterojenliği göz önünde bulundurur.

Kısıtlar

Optimizasyon problemi belirli kısıtlar altında çözülür. Kısıtlar şunlar olabilir:

- **Bütçe:** Sondaj programlarının maliyeti, en önemli kısıtlamalardan biridir. Bütçe kısıtlamaları, yapılabilecek sondaj sayısını ve kullanılacak teknikleri sınırlayabilir.
- **Zaman:** Sondaj programlarının tamamlanması için belirli bir zaman sınırı olabilir. Proje zaman çizelgeleri, sondajların

ve analizlerin ne kadar sürede tamamlanması gerektiğini belirler.

- **Çevresel ve Güvenlik Düzenlemeleri:** Çevre koruma yasaları ve güvenlik düzenlemeleri, sondajların yapılabileceği yerleri ve yöntemleri kısıtlayabilir. Örnekleme faaliyetleri, çevreye en az zararı verecek şekilde planlanmalı ve yasal düzenlemelere uygun şekilde gerçekleştirilmelidir. Ayrıca, güvenlik önlemleri, saha çalışanlarının sağlığını ve güvenliğini korumalıdır.
- **Erişim ve Lojistik:** Bazı alanlara erişim zor olabilir veya lojistik zorluklar bulunabilir. Bu durum, sondaj ekipmanlarının ve personelin sahaya ulaşımını etkileyebilir. Ulaşım ve lojistik kısıtlamalar, programın süresi ve maliyeti üzerinde doğrudan etkilidir.

OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Geçen yüzyılın ikinci yarısından beri, ek sondaj kuyularının en uygun şekilde konumlandırılması (optimizasyonu) için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunları şu ana başlıklar altında toplamak mümkündür:

- **Geometrik yaklaşım:** Bu yaklaşım çakışan etki alanlarının minimizasyonuna dayanır. Jeolojik süreklilik ve tenör sürekliliğine güven derecesi, sondaj kuyuları arasındaki mesafeler ya da veri yoğunluğu ile ilişkilendirilir. Amaç, sondaj kuyularının konumlarını, örtüşmelerini minimize edecek şekilde belirleyerek en etkin kapsama alanını sağlamaktır.
- **Jeoistatistiksel yaklaşım:** Bu yaklaşım, tenör sürekliliğine güven derecesini tahmin varyansı veya koşullu benzetim gibi jeoistatistiksel parametrelerle ilişkilendirir. Belirsizliğin, özellikle kriging varyansının, belirli bir eşik değerin altına düşürülmesi

amaçlarıdır. Jeostatistiksel modeller, sondaj verilerinin mekânsal dağılımını daha hassas tahmin etmek için kullanılır.

- **Bilginin Değerinin Maksimizasyonu:** Bu yöntem, fayda/maliyet oranını maksimize etmeye çalışır. Ek sondajların, projenin genel ekonomik değerine katkısını değerlendirir ve en uygun sondaj aralıklarını bulmaya çalışır. Amaç, sondajdan elde edilen bilginin ekonomik değerini, maliyetle karşılaştırarak optimize etmektir.
- **Yanlış Sınıflandırma Maliyetinin Minimizasyonu:** Bu yaklaşım, cevherli ve cevhersiz bölgeleri doğru sınıflandırarak yanlış pozitif (cevhersiz bölgenin cevherli olarak sınıflandırılması) veya yanlış negatif (cevherli bölgenin cevhersiz olarak sınıflandırılması) hatalarını minimize etmeye odaklanır. Yanlış sınıflandırma maliyetleri, maden işletmesinin verimliliği ve ekonomik kazançları üzerinde doğrudan etki eder.

Geometrik Yaklaşım

Bu yaklaşımda amaç, mümkün olan en düşük maliyetle tenör ve maden kaynak/rezerv tahmin belirsizliğini kabul edilebilir sınırlar içinde tutmaktır. Bunun için iki şartın sağlanması gerekir:

- Tam kapsama:** Belirli bir sınıfta (kesinlik/belirsizlik düzeyinde) maden kaynak/rezerv tahmini yapabilmek için örneklenen toplam alanın sondaj etki alanları tarafından tamamen kapsanması gereklidir. Bu etki alanlarının bir miktar çakışmasını zorunlu kılar. İki sondaj arasındaki mesafe (d) dairelerin yarıçaplarının (r) iki katından küçük olduğunda ($d < 2r$), daireler kesişir ve tam kapsama sağlanır.

- Kesişim alanını minimize etme:** Sondaj sayısını (maliyeti) düşürmek için bu kesişim alanını minimumda tutmak gerekir. Fazla kesişim, ek bilgi sağlamadan maliyetlerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, optimum sondaj aralığı bulunarak kesişim alanı minimize edilmeli ve toplam maliyet düşürülmelidir.

Yani optimizasyon problemi, geometrik olarak kapsamayı maksimize ederken kesişimi minimize etme problemine dönüştürülmüş olur.

Kesişim Alanının Hesaplanması

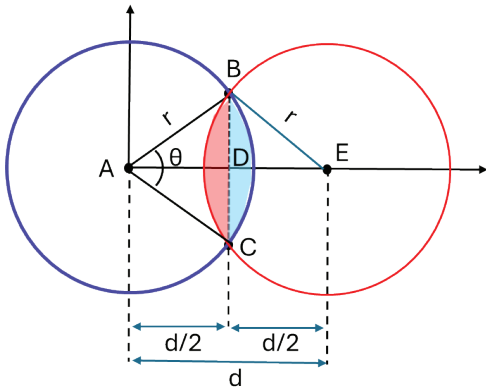
Üst üste binen ya da örtüşen aynı yarıçapa (r) sahip iki dairenin kesişim alanının büyüklüğü, bu dairesel etki alanlarının r yarıçapına ve merkezleri arasındaki mesafeye (d) bağlıdır. İki dairenin kesişmesi için d değerinin yarıçapların toplamından küçük, yarıçaplarının farkından büyük olması gerekir. Yani $0 \leq d \leq 2r$ olmalıdır.

$d < 2r$ olduğunda kesişim bölgesinin yarı parçasının alanı (mavi boyalı alan), “ABC” daire diliminin alanından (A_1) ABC üçgeninin alanının (A_2) çıkarılması ile bulunur (Şekil 4). Yani $A = 2 \times (A_1 - A_2)$ ’dir. Optimizasyon problemi, bu alanı minimize edecek d değerinin bulunması olarak ifade edilebilir. Başka bir deyişle, sondaj kuyuları arasındaki mesafeyi optimize ederek, minimum kesişimle maksimum kapsama alanı elde edilmesi hedeflenir.

Burada formüllerin çıkarılışına girmeden (bu konuda Özkan, 2023, sayfa 195’e bakılabilir) daire dilimi (eşitlik 5), üçgen alanı (eşitlik 6) kullanılarak eşitlik (7) de verilen kesişim alanı ifade edilebilir.

- Daire diliminin alanı: $A_1 =$

$$\pi r^2 \times \frac{2 \cdot \text{Cos}^{-1}(d/2r)}{360} = \frac{\pi r^2 \text{Cos}^{-1}(d/2r)}{180} \quad (5)$$



Şekil 4. “r” yarıçaplı iki dairenin kesişim alanı. Açısı 2α olan daire dilimi ile üçgenin alanlarının farkının iki katı alınarak hesaplanabilir (Özkan, 2023).

Figure 4. Intersection area of two circles with radius “r”. This can be calculated by taking twice the difference of areas of the circle segment with angle 2α and of the triangle (Özkan, 2023).

- Üçgenin alanı: $A_2 = \frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$ (6)

- Kesişim alanı: $A = 2 \times (A_1 - A_2) = \frac{\pi r^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)}{180} - \left[\frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}\right]$ (7)

Bu formül, iki dairenin kesişim alanını etki yarıçapı (r) ve merkezler arası mesafe (d) cinsinden verir. Minimize edilecek amaç fonksiyonu budur. Burada etki yarıçapı r sabit bir sayıdır (tasarım parametresi).

Kesişim Alanının Minimize Eden Sondajlar Arası Mesafenin Hesaplanması

Sondaj etki alanlarının kesişim alanını veren fonksiyonu minimum yapan d değerini bulmak için bu fonksiyonun birinci türevini alıp, bu türevi sıfıra eşitleyen d değerini (eşitlik 8) bulmak gerekir:

$$\frac{d}{dd} \frac{\pi r^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)}{180} - \left[\frac{d}{2} \times \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}\right] = 0 \quad (8)$$

Oldukça karışık olan ayrıntılarına girilmeden belirtmek gerekirse, bu amaç fonksiyonunun birinci türevini sıfıra eşitleyen (ya da amaç fonksiyonunu minimize eden) d değeri $d = \sqrt{3}r$ bulunur.

Bu sonuca göre, kesişim alanını minimize etmek için d yaklaşık olarak r etki yarıçapının $\sqrt{3}$ katı olmalıdır. Bu, en küçük örtüşme alanıyla en büyük kaplama alanını sağlayan sondajlar arası mesafedir. Örneğin, etki mesafesi $r=100$ m olan bir mineralizasyonu en az kesişim alanıyla tam kapsama için sondajlar arasındaki optimum mesafe $\sqrt{3} r = \sqrt{3} \times 100 \text{ m} \approx 173,2\text{m}$ olmalıdır.

Bu mesafe, hem boş alanları en aza indirir hem de üst üste binmeyi en aza indirir.

Jeoistatistiksel Yaklaşım

Sondaj Kuyusu Aralığı Analizi (Drill Hole Spacing Analysis: DHSA) diye bilinen ve en uygun sondaj aralığını belirlemek için kullanılan jeostatistiksel yöntemler, belirli bir amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize etme amacıyla matematiksel olarak formüle edilmiş olmadığı için doğrudan bir optimizasyon yöntemi olarak tanımlanmazlar. Bununla birlikte belirli aralıkların belirsizlik üzerindeki etkisini analiz etmeyi sağlayarak, ek sondaj ve örnekleme yapılması ihtiyacı olan yerleri belirlemede kullanılabilirlerinden dolayı optimizasyon süreçlerine destek aracı olarak işlev görür.

DHSA hem kriging varyansına hem de jeostatistiksel benzetimlere dayalı analizleri içerebilen bir yöntemdir. Kriging varyansına dayanan yöntemde, belirli bir kriging varyansını sağlayacak şekilde sondaj aralıkları belirlenir. Koşullu benzetime dayanan yöntem, sondaj aralıklarını belirlemek için tenörlerin veya

jeolojik parametrelerin mekânsal değişkenliğini daha ayrıntılı bir şekilde modellemeye odaklanır. Kriging varyansı ve koşullu benzetim tekniklerinin uygunluğu, projenin jeolojik karmaşıklığına ve veri yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir. Bu iki yöntem birlikte kullanılarak en uygun sondaj aralığı belirlenebilir.

Ek Sondaj Yerlerinin Kriging Varyansına Dayalı Belirlenmesi

Bu yöntem, belirli bir sondaj aralığında kriging varyansını hesaplayarak, bu varyansı kabul edilebilir bir hata seviyesine düşürene kadar sondaj aralığını optimize etmeye dayanır. Burada amaç, tahmin belirsizliğini minimumda tutacak ancak ekonomik açıdan da makul olacak bir aralık bulmaktır.

Kriging varyansı (eşitlik 9), her bir noktadaki tahminin belirsizliğini, yani tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerden sapma olasılığını ifade eder. Düşük bir kriging varyansı, tahminin daha güvenilir olduğunu belirtirken, yüksek bir kriging varyansı ise tahminin daha düşük bir kesinlikle, yani yüksek bir belirsizlikle yapıldığını ifade eder

Kriging varyansının formülü şu şekildedir:

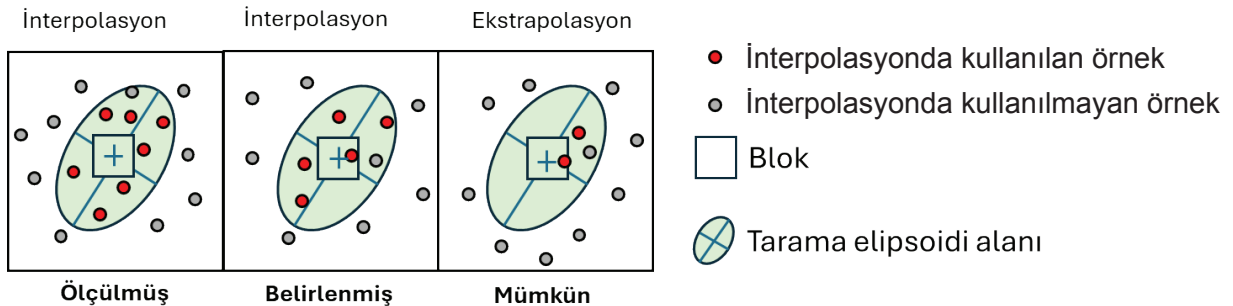
$$\sigma_k^2 = C(0) - \lambda^T C \quad (9)$$

Burada;

- $C(0)$: Aralarında sıfır mesafe bulunan noktalar için varyansı temsil eder.
- λ : Kriging ağırlıkları vektörüdür.
- C : Veriler arasındaki kovaryans matrisidir.

Kriging varyansı, sondaj noktaları arasındaki mesafeye (veri yoğunluğuna) ve mekânsal korelasyonuna bağlı olarak değişir (Bertoli vd., 2013). Daha açık bir anlatımla kriging varyansı, veri noktalarının mekânsal dağılımı, sayısı ve tahmin edilen konuma (blok merkezine) olan uzaklıkları ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 5). Veri noktası sayısı arttıkça, genellikle kriging varyansı düşer, çünkü daha fazla bilgi, tahmin belirsizliğini azaltır. Ancak, belirli bir noktadan sonra veri sayısındaki artış, kriging varyansında önemli bir iyileşme sağlamayabilir. Bu durum, veri yoğunluğunun zaten yeterli olduğu ve ek veri noktalarının belirsizliği belirgin şekilde azaltmadığı durumlarda geçerlidir.

Veri noktalarının tahmin edilen noktaya (blok merkezine) olan uzaklığı arttıkça, kriging varyansı artar. Bunun nedeni, krigingin yakın veri noktalarına daha fazla ağırlık vermesidir. Bu nedenle yakın noktalar, tahmin edilen değerlerin belirlenmesinde daha etkili olur. Uzak veri noktaları ise tahmin edilen noktaya daha az katkıda bulunur, bu da belirsizliği artırarak kriging varyansının yükselmesine neden olur.



Şekil 5. İnterpolasyonda kullanılan örneklerin konfigürasyonu ve belirsizlik arasındaki ilişki.

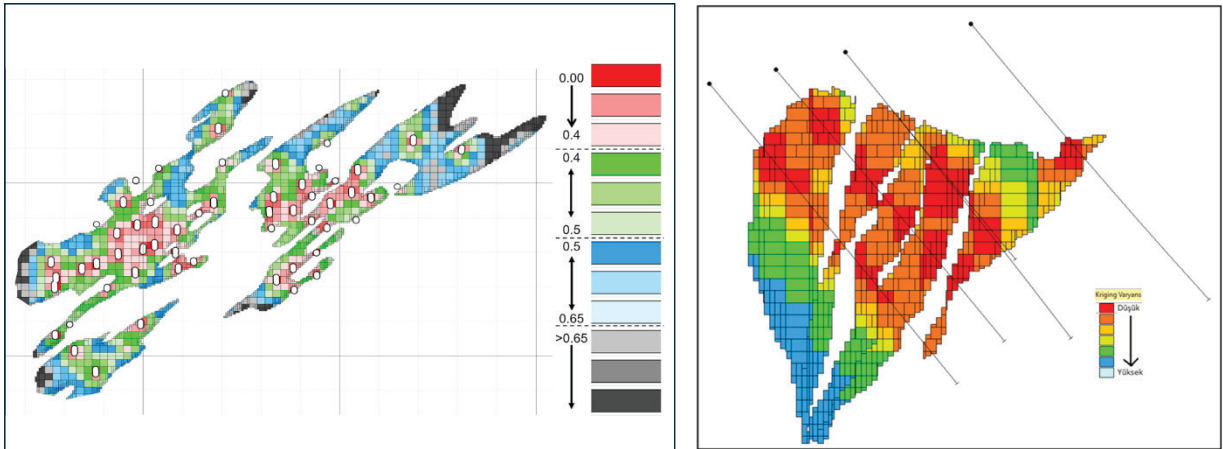
Figure 5. Relationship between the configuration of samples used in interpolation and uncertainty.

Kriging varyansı, veri noktalarının sayısı ve uzaklıklarının yanı sıra, verilerin mekânsal korelasyon yapısına da bağlıdır. Bu korelasyon yapısı, variogram aracılığıyla modellenir ve kriging ağırlıklarının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Veri noktaları tahmin edilen noktaya yakın olsa bile, variogramda belirtilen mesafe aralığında bir korelasyon yoksa, bu veri noktalarının tahmin üzerindeki etkisi sınırlı olur ve kriging varyansı yüksek kalabilir. Açıklandığı gibi, kriging varyansı yalnızca veri noktalarının konumlarına bağlı olup verilerin (örneğin tenör değerlerinin) kriging varyansı üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Bu nedenle, tahmin belirsizliğini en fazla azaltacak ek örnekleme veya sondaj noktalarının yerleri, sondajlar gerçekleştirilmeden önce, yalnızca konumlarına dayanarak kriging varyansı üzerindeki etkilerine bakarak belirlenebilir. Bu, süreci deneme-yanılma yönteminden çıkararak, kabul edilebilir bir kriging varyansı elde etmek için gereken sondaj aralığını önceden belirlemeye olanak tanır ve gereksiz sondaj maliyetlerinden kaçınmak açısından büyük önem taşır.

Belirli bir kriging varyansını sağlayacak şekilde sondaj aralıklarını belirlemek için ilk olarak mevcut sondaj verilerini kullanarak her bir blok için kriging varyansı hesaplanır ve kriging varyansı haritası (kat planları) çıkarılır (Şekil 6). Bu harita, mevcut sondajlara dayanarak yapılan tahminde hangi bölgelerde belirsizliğin yüksek olduğunu gösterir. Kriging varyansının yüksek olduğu bölgeler ek sondajla daha fazla veri toplanması gereken yerler (hedef bölgeler) olarak belirlenir.

a) Kriging Varyansı Esiklerinin Belirlenmesi

Kriging varyansı ile tahmin güvenirliliği arasında genel kabul gören bir ilişki bulunmasına rağmen, geleneksel olarak Ölçülmüş (Measured), Belirlenmiş (Indicated) ve Mümkün (Inferred) diye üç kategoride değerlendirilen Maden Kaynakları için doğrudan kriging varyansına dayalı standart eşik değerler koymak, uygulamada yaygın değildir.



Şekil 6. Kriging varyansı haritası (sol) ve kriging varyansına göre renklendirilmiş blok model kesiti (sağ) (örnekler, DAMA Mühendislik A.Ş.'nin iki projesinden alınmıştır).

Figure 6. Kriging variance map (left) and a block model section coloured by kriging variance (right) (examples from two projects by DAMA Mühendislik A.Ş.).

Bunun yerine, maden kaynak sınıflandırması yapılırken kriging varyansı, jeolojik bilgi seviyesi, veri yoğunluğu ve sondaj aralığı gibi diğer faktörlerle birlikte değerlendirilir. Yani kriging varyansı, sınıflandırma için karar alınmasında kullanılan önemli bir ölçüttür, fakat tek ölçüt değildir. Araştırmacılar Ölçülmüş, Belirlenmiş ve Mümkün* Maden Kaynakları için doğrudan eşik değerler önerme yerine, varyansın güvenilirlik analizlerinde nasıl kullanılacağını ve bu analize dayalı olarak kararların nasıl alınması gerektiğini tartışmışlardır. Örneğin, David (1977), "Geostatistical Ore Reserve Estimation" adlı kitabında, kriging varyansı ve belirsizliğin rezerv tahminindeki rolü üzerine kapsamlı analizler yapmıştır. David'in çalışmaları, kriging varyansı ve tahmin hatalarının maden kaynak güvenilirlik sınıflandırmalarına olan etkilerini inceleyen temel eserlerden biridir. Journel ve Huijbregts'in (1978) "Mining Geostatistics" adlı kitabı, bu alanda önemli bir kaynak olup, ek sondaj yerlerinin kriging varyansına dayalı optimizasyonuna dair temel bilgiler sunar.

* *UMREK Kodu'na uyum sağlamak için İngilizce "Inferred Mineral Resource" denen maden kaynakları için "Mümkün Maden Kaynakları" terimi kullanılmıştır. Ancak bu terim maden kaynağı kavramının CRIRSCO tanımına aykırıdır. Söz konusu tanıma göre, bir mineralize malzemeye maden kaynağı denilebilmesi için jeolojik belirlilik şartını ve nihai ekonomik çıkarımı yönünde makul beklenti şartını karşılaması gereklidir. TDK sözlüğüne göre "gizli kalmış, henüz varlığı ortaya çıkmamış olan, gelecekte oluşması veya gelişmesi mümkün olan" anlamına gelen potansiyel veya mümkün sıfatının maden kaynakları için kullanılmasının yanlış olacağı düşünülmektedir.*

David, M. (1977), Journel ve Huijbregts (1978), Diehl ve David (1982), Rivoirard

(1994), Dohm vd., (1995), Rossi ve Deutsch, (2014), kriging varyansına dayalı olarak belirsizliklerin nasıl değerlendirileceğini, güven aralıklarının belirlenebileceğini ve bu aralıkların kullanımıyla maden kaynak sınıflandırmasının nasıl yapılabileceğini tartışmışlardır. Deutsch ve Journel (1997), benzetim ve varyans analizi yoluyla maden kaynak tahminlerinin güvenilirliğini değerlendirmek için yöntemler sunmuşlardır. Chilès ve Delfiner (1999), sondaj noktalarının optimizasyonu için kriging varyansının nasıl kullanılabileceğini etraflıca ele almıştır. Clark (1979) ve Clark ve Harper (2000), jeostatistiksel yöntemlerin uygulamalarına yönelik pratik yaklaşımlar geliştirmiştir. Ek sondaj yerlerinin belirlenmesinde kullanılan bazı temel yöntemlerin anlaşılması için değerli kaynaklar sunmuştur.

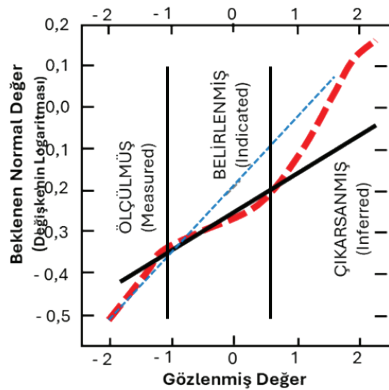
JORC (Joint Ore Reserves Committee), UMREK, NI43-101 Kılavuzları ve CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards) gibi maden kaynaklarının sınıflandırılması için yaygın olarak kabul edilen uluslararası standartlara göre de Ölçülmüş, Belirlenmiş ve Mümkün maden kaynakları şeklinde sınıflandırmaların yapılmasında kriging varyansı gibi jeostatistiksel ölçütler kullanılabilir. Ancak bu kılavuzlar da doğrudan kriging varyansı eşikleri önermek yerine, genel olarak jeolojik belirsizlik ve veri yoğunluğuna dayalı kararlar alınmasını öngörür.

Kriging varyansı eşiklerinin standart hale getirilememesinin başlıca nedenleri arasında, sahaya özgü jeolojik koşulların farklılık göstermesi ve variogramın sahadan sahaya değişmesi gösterilebilir. Bir sahada kullanılan kriging varyansı eşikleri, o bölgenin jeolojik yapısına, mineralizasyonun homojenliğine ve sondaj yoğunluğuna bağlı olarak farklılık gösterebilir. Ayrıca, ekonomik değerlendirmeler

de eşik belirlemede önemlidir. Örneğin, sondaj maliyetlerinin yüksek olduğu bir sahada, daha yüksek bir varyans kabul edilebilirken, düşük maliyetli alanlarda daha sıkı eşikler kullanılabilir.

Sahaya ya da projeye özgü eşik olarak kullanılacak kriging varyansı değerleri, genellikle varyans dağılımlarının analiz edilmesi yoluyla belirlenir ve bu eşikler tahmin edilen maden kaynaklarının belirsizliğinin kabul edilebilir sınırlarını belirlemeye yardımcı olur. Böylece maden kaynak tahmininde daha doğru ve güvenilir kararlar alınabilir.

Sahaya ya da projeye özgü kriging varyansı eşik değerlerini belirlemek için ilk adım, projede elde edilen kriging varyansı değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunu oluşturmak (Şekil 7). Bu dağılımın istatistiksel özellikleri (ortalama ve standart sapması), varyansların nasıl dağıldığını (normal, lognormal) anlamak açısından önemlidir. Olasılık yoğunluk fonksiyonunun yüzdelik dilimleri kullanarak, Ölçülmüş, Belirlenmiş ve Mümkün kategorileri için uygun eşik değerleri seçilebilir.



Şekil 7. Olasılık yoğunluk fonksiyonundan farklı kategoride maden kaynaklar için kriging varyansı eşiklerini belirlenmesi.

Figure 7. Determination of kriging variance thresholds for different categories of resources from the probability density function.

Farklı kategoride maden kaynakları için kriging varyansı eşiklerinin belirlenmesinde olasılık yoğunluk fonksiyonunun farklı dilimleri kullanılabilir. Örneğin, Ölçülmüş Maden Kaynakları için varyansın alt %10'luk (veya %25'lik) dilimi kullanılabilirken, Belirlenmiş Maden Kaynakları için orta %40 (veya %50'lik) ve Mümkün Maden Kaynakları için üst % 20'lik (veya %25'lik) dilimler kullanılarak, her bir maden kaynak sınıfı için kabul edilebilir eşik seviyeleri oluşturulabilir. Örneğin bir projede blok kriging varyanslarının ortalaması 0,10, standart sapması 0,29 ise, Kriging varyanslarının normal dağıldığı varsayıldığında, çeyrek dilimler için sınır değerler şu şekildedir:

- Alt %25 Dilimi: Ortalama - $0.6745 * \text{Standart Sapma} = 0,10 - 0.6745 * 0,29 = -0,10$
- Üst %25 Dilimi: Ortalama + $0.6745 * \text{Standart Sapma} = 0,10 + 0.6745 * 0,29 = 0,32$

Burada - 0.6745 ve + 0.6745 bir veri setindeki alt %25'lik veya üst %25'lik dilime karşılık gelen z-skorudur. 0.6745 z-skorunu kullanarak, bir normal dağılımdaki %25 ve %75 dilimlerini bulmak için ortalamadan 0.6745 kat standart sapma çıkararak veya ekleyerek sınır değerleri belirlenebilir. Buna göre;

- Varyans değeri alt %25 dilimde olan (Varyans $< -0,10$) bloklar Ölçülmüş Kaynak,
- Varyans değeri %25-%75 diliminde olan ($-0,10 \leq \text{Varyans} \leq 0,32$) bloklar Belirlenmiş Kaynak,
- Varyans değeri üst %25 dilimde olan (Varyans $> 0,32$) bloklar) Mümkün Kaynak olarak sınıflandırılır.

b) Benzer Projelerden Uyarılma ve İyileştirme

Kriging varyansı olasılık yoğunluk fonksiyonunun kullanımı, proje özelinde esnek

ve veriye dayalı bir sınıflandırma stratejisi sağlar. Ayrıca,

- Benzer projelerle kıyaslama yaparak ve / veya
- Regresyon eğimi ve koşullu varyans gibi diğer jeostatistiksel göstergeleri de değerlendirilerek ve / veya
- Kriging varyansı yanında jeolojik (kalınlık varyasyonu, jeolojik güven, örnekleme yoğunluğu ve örnekleme dağılımı) ve başka faktörleri de (projelerin risk toleransı farklılıkları, ticari şartlar) göz önüne alarak proje için olasılık yoğunluk fonksiyonu analiziyle belirlenen eşiklerin makul olup olmadığı test edilebilir.

Gerekirse, projenin özelliklerine uygun uyarlamalar yapılabilir. Örneğin, önceki bir projede “Ölçülmüş” maden kaynakları için varyans eşiği 0,08 olarak belirlenmişse ve bu eşiğin projeye iyi uyduğu biliniyorsa, bu proje için de $\sigma^2 = 0,07$ yerine 0,08 kullanılabilir.

Benzetim Temelli Sondaj Aralık Analizi

Jeostatistiksel benzetim temelli sondaj aralık analizi (DHSA), benzetim (simülasyon) yöntemleri kullanarak optimal sondaj aralıklarını analiz eder ve belirsizliğin azaltılmasını hedefler. Bu yöntemde, çeşitli sondaj aralıkları ve düzenleri için çok sayıda benzetim gerçekleştirilir ve farklı aralıkların tahmin doğruluğuna etkisi analiz edilir. Jeostatistiksel benzetimler, cevher yataklarının mekânsal değişkenliğini simüle ederek sondaj aralığının belirli özelliklere sahip bir cevher gövdesine etkisini test etmek için kullanılır. Bu, farklı sondaj aralıkları ve düzenleri altındaki potansiyel belirsizliklerin karşılaştırılmasına olanak tanır.

Belirli bir tahminin belirsizlik seviyesini analitik (deterministik) olarak değerlendiren

kriging varyansından farklı olarak benzetim temelli DHSA bir alandaki olası mineral dağılımlarının çeşitli gerçekleştirmelerini simüle ederek sondaj aralıklarının etkisini değerlendirir ve belirsizliğin nasıl değiştiğini analiz eder. Bu yaklaşım, mevcut sondaj verilerinden yola çıkarak koşullu benzetim teknikleriyle mevcut verilerle uyumlu olacak şekilde tahmin edilen değerlerin mekânsal dağılımlarını çeşitli olasılıklara dayalı olarak ele alarak daha kapsamlı bir belirsizlik analizi sağlar. Özellikle belirsizliğin yüksek olduğu ve tahminlerin doğruluğunun büyük önem taşıdığı durumlarda bu yöntem daha uygun olabilir.

DHSA'nın geliştirilmesi ve uygulanması konusunda birçok araştırmacı önemli katkılarda bulunmuştur. Bunlardan Clayton V. Deutsch, jeostatistik, özellikle rezerv modelleme ve benzetim konularında önemli bir otoritedir. 2002 yılında yayınladığı “Geostatistical Reservoir Modeling” kitabı, kriging varyansına dayalı yaklaşımlar, benzetim teknikleri ve sondaj aralığı analizleri konusunda sıkça referans gösterilir.

Journel, DHSA gibi benzetim tabanlı yöntemlerin teorik temellerine önemli katkılarda bulunmuş bir jeostatistikçidir. Özellikle “Indicator Kriging” ve “Sequential Gaussian Simulation” gibi tekniklerin geliştirilmesinde rol oynamıştır. Ek sondaj yerlerinin planlanmasında kullanılan olasılıksal modellerin ve benzetim yöntemlerinin temelini atmıştır. Journel, Huijbregts ile birlikte jeostatistiksel benzetim yöntemlerini kullanarak sondaj aralıklarının analizi ve optimal sondaj noktalarının belirlenmesine yönelik teorik çerçeveler sunan “Mining Geostatistics” adlı klasik kitabın yazarıdır (Journel ve Huijbregts, 1978).

Peter Dowd, sondaj programlarının optimizasyonu konularında çalışmalar yapmıştır (Dowd, 1997; Armstrong ve Dowd, 1994).

Özellikle sondaj verilerinin analiz edilmesi ve bu verilere dayalı rezerv tahminleri üzerine önemli araştırmaları bulunmaktadır. M. Armstrong ile birlikte editörlüğünü yaptığı “Geostatistical Simulations” (Armstrong ve Dowd, 1994) çok atıf almaktadır.

Dimitrakopoulos, özellikle maden arama ve modelleme çalışmalarında benzetim tabanlı analizlerin kullanımına yönelik uygulamalı çalışmalar yapmıştır (Boucher vd., 2005).

Benzetim Temelli DHSA Adımları

Benzetim temelli DHSA genellikle şu adımlardan oluşur:

- 1) Veri Toplama ve Hazırlık: Mevcut sondaj verileri kullanılarak bir temel veri seti hazırlanır. Bu veri seti, sahada belirli (söz gelişi 50 m) aralıklarla yapılmış sondajlardan elde edilen metal tenörü değerlerini, jeolojik süreksizlikleri, mineralleşme yapısını ve variogram analizleri için gerekli parametreleri içerir.
- 2) Mevcut Verilerle Model Oluşturma: Mevcut sondaj verileri ve variogram modeli kullanılarak, Sequential Gaussian Simulation (SGS), indikatör kriging, co-kriging ve stochastic simulation gibi bir benzetim yöntemi ile bölgedeki olası tenör dağılımları modellenir. Bu aşamada, mevcut verilerle uyumlu (koşullu) olacak şekilde, sahadaki olası mineral dağılımlarının çoklu gerçekleştirmeleri (benzetimleri) oluşturulur. Örneğin, her bir benzetim sahadaki olası tenör dağılımını farklı bir senaryo olarak yansıtır.
- 3) Farklı Sondaj Aralıklarının Benzetimi (simülasyonu): Mevcut sondaj aralığı (örneğin, 50 m) için elde edilen benzetimlerin ardından, daha geniş

(örneğin, 100 m) ve daha dar (örneğin, 25 m) sondaj aralıklarının nasıl sonuçlar vereceğini değerlendirmek amacıyla benzetimler yapılır. Bu benzetimler, sahada ek sondajlar yapıldığında tenör dağılımının nasıl değişeceğini ve belirsizliklerin ne ölçüde azalacağını analiz eder. Örneğin, 100 m aralıklarla yapılan sondajların belirsizliği artırdığı, 25 m aralıklarla yapılan sondajların ise belirsizliği önemli ölçüde azalttığı gözlemlenebilir.

- 4) Belirsizlik Analizi ve Sonuçların Karşılaştırılması: Farklı aralıklarla gerçekleştirilen bu benzetimlerin sonuçları analiz edilerek her bir sondaj aralığının belirsizlik üzerindeki etkisi karşılaştırılır. Örneğin, 25 m aralıklarla yapılan sondajlarla oluşturulan modelde, tenör tahminlerindeki kriging varyansının belirli bölgelerde kabul edilebilir düzeye (örneğin, 0.2) düştüğü ve bu bölgelerin "Ölçülmüş" sınıfına dahil edilebileceği belirlenir. Diğer yandan, 100 m aralıklarla yapılan benzetimlerde kriging varyansının yüksek olduğu ve bu bölgelerin daha belirsiz bir “Mümkün” sınıfa dahil edilmesi gerektiği anlaşılır.
- 5) Ekonomik Değerlendirme ve Planlama: Bu analizlerle, daha fazla güvenilirlik sağlayacak ek sondajların nerelerde yapılması gerektiği ve bu sondajların ekonomik olarak uygun olup olmadığı değerlendirilir. Daha dar sondaj aralıkları belirsizlikleri düşürebilir ancak maliyeti artırabilir. Dolayısıyla bu aşama, uygun maliyet ile kabul edilebilir doğruluk arasında bir denge kurmayı amaçlar.

Tahmin Güvenirlik Seviyeleri İçin Eşikler

Benzetim temelli analizlerde, belirli bir alandaki tahminlerin ne kadar güvenilir olduğunu

değerlendirmek için benzetim yapılan (simüle edilen) değerlerin istatistiksel dağılımları incelenir ve güven aralıkları belirlemeye odaklanılır.

Koppe vd. (2017), Usero vd. (2019) ve Drumond vd. (2019) gibi araştırmacılar, bu değerlendirmelerde Q95 ve Q5 gibi istatistiksel ölçütleri, referans noktası olarak kullanılmasını önermişlerdir. Q95, benzetimlerin %95'inin altında kalan bir değeri temsil eder ve tahminlerin üst sınırını belirlemek için kullanılır. Yani, tahmin edilen değerlerin %95'i bu değer altında kalır. Aynı şekilde, Q5, benzetim sonuçlarının en düşük %5'lik kısmını temsil eder ve tahminlerin alt sınırını gösterir. Örneğin, tahmin edilen varyans Q95'in üzerindeyse, bu alanın tahmininin güvenilirliğinin düşük olduğu düşünülebilir ve ek sondaj veya veri toplanması gerekebilir.

Ek Bilgi Değerinin Maksimizasyonu

Ek sondaj yerlerinin belirlenmesinde bilginin değeri yaklaşımı, karar verme sürecinde yeni bilgi edinmenin ekonomik değerini hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Ek sondajlardan sağlanacak verilerin, mevcut maden kaynak tahminlerinin doğruluğunu artırarak belirsizliği azaltması beklenir. Sondaj maliyetleri ile bu belirsizliğin azalmasından elde edilecek ekonomik fayda karşılaştırılarak, en uygun sondaj aralıkları belirlenir. Bu yaklaşım, özellikle sondaj programlarının optimizasyonunda, ek bilgi sağlayan sondajların potansiyel getirilerini maliyeti ile karşılaştırmak için kullanılır (Deutsch, 2022; Harding ve Deutsch, 2022). Bu şekilde fayda/maliyet oranının değerlendirilmesi üzerine kurulu olduğu için, bir "Fayda/Maliyet" analizi olarak da tanımlanabilir. Bilginin Değeri, genellikle belirsizliğin azaltılmasının potansiyel ekonomik faydalarını ve sondaj maliyetlerini dikkate alarak sondaj aralıklarının optimizasyonuna yardımcı olur.

Dimitrakopoulos (2011), Eidsvik ve Ellefmo (2013), Eidsvik vd. (2015), Froyland vd. (2018), Deutsch (2022), Deutsch ve Journal (1997), Caers vd. (2022), Harding (2021), Harding ve Deutsch (2022), maden arama, petrol ve doğal gaz keşfi gibi alanlarda ek sondajların ekonomik getirilerinin optimize edilmesinde bilginin değeri (value of information) yaklaşımını kullanan ve bu alandaki literatüre önemli katkılarda bulunmuş araştırmacılar arasında öne çıkan isimlerdir.

Ek Bilginin Değeri

Ek sondajlardan elde edilecek bilginin değeri, madencilik projesinin net bugünkü değerine (NBD) olan etkisi ile ölçülebilir. Ek sondajlarla projedeki toplam maden kaynak miktarında veya tenöründe bir değişiklik beklenmese bile, tahmin güvenilirliğindeki artış, projenin Beklenen NBD'inde bir artışa yol açar. Örneğin, mevcut sondaj verileriyle yapılan maden kaynak tahmininin güvenilirliği %60 iken, planlanan ek sondajların yapılması durumunda bu olasılığın %80'e çıkması halinde bu artış, projenin beklenen NBD'inde önemli bir yükselme sağlayarak projenin ekonomik cazibesini artırabilir.

Ek Sondaj Maliyeti

Ek sondajların maliyeti, doğrudan ve dolaylı maliyet unsurlarını içerir. Doğrudan maliyetler, sondajın gerçekleştirilmesi için gereken fiziksel maliyetleri (örneğin, sondaj ekipmanı, işçilik ve analiz maliyetleri) kapsar. Dolaylı maliyetler ise, ek sondajların yapılması nedeniyle ortaya çıkabilecek operasyonel gecikmeler, projede yaşanabilecek zaman kayıpları ve lojistik masraflar gibi faktörleri içerir. Bu maliyetlerin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi, ek bilgi elde etmek için yapılacak sondajların ekonomik

olarak ne kadar değerli olduğunu belirlemek açısından büyük öneme sahiptir.

Fayda-Maliyet Analizi ile Optimum Sondaj Aralığının Belirlenmesi

Bu yaklaşımda, amaç fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir:

$$\text{Max (BF - C)}. \quad (10)$$

Burada:

- BF: Ek sondajlarla edinilecek bilginin değerini, yani projenin Beklenen NBD'ine katkısı ya da faydasını,
- C: Ek sondajların maliyetini ifade eder.

Ek sondajlarla tahmin edilen kaynağın miktarında veya tenöründe bir değişiklik olmayacağı, sadece tahmin belirsizliğinin azalacağı varsayımı altında, ek sondajlarla sağlanacak bilginin değeri ya da faydası (BF) eşitlik 11'de verilmiştir.

$$\text{BF} = [R(d_1) - R(d_0)] \times \text{NBD} \quad (11)$$

- $R(d_0)$: Mevcut sondaj aralığıyla tahmin edilen güvenilirlik
- $R(d_1)$: Yeni sondaj aralığı d_1 ile elde edilecek güvenilirlik

Bu fonksiyon, güvenilirlikteki artışın projenin ekonomik değerine katkısını ifade eder. Ek sondajlar sayesinde güvenilirlik arttıkça, projenin beklenen değeri artar.

1. Güvenilirlik ile Sondaj Aralığı Arasındaki İlişkinin Tanımlanması

Tahmin güvenilirliği (R) ile sondaj aralığı (d) arasındaki ilişki, sondaj yoğunluğunun artmasının (yani aralıkların daralmasının) belirsizliği azaltması üzerine kuruludur. Sondaj aralığı azaldıkça, tahmin güvenilirliği genellikle

doğrusal olmayan bir şekilde artar. Bu ilişki sigmoidal bir fonksiyonla eşitlik 12'deki gibi tanımlanabilir:

$$R(d) = R_{\min} + \frac{R_{\max} - R_{\min}}{1 + k \cdot d^p} \quad (12)$$

Burada:

- $R(d)$: Sondaj aralığı d olduğunda tahmin edilen güvenilirlik.
- R_{\min} : Başlangıç güvenilirlik seviyesi (örneğin, mevcut sondajlarla %60).
- R_{\max} : En yüksek güvenilirlik seviyesi (örneğin, %99).
- k: Fonksiyonun eğimini belirleyen sabit (sondaj aralığı azaldıkça güvenilirliğin ne kadar hızlı arttığını belirler).
- p: Sondaj aralığı ile güvenilirlik arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi belirleyen üstel (genellikle $p > 0$).

Bu sigmoidal fonksiyon, sahada sıkça gözlemlenen, sondaj aralığı azaldıkça belirsizliğin hızlıca azalması ve ardından yavaş yavaş devam etmesi durumunu iyi yansıtır. Özellikle saha verileriyle bu modelin parametreleri (k ve p) kalibre edilerek, saha şartlarına uygun bir analiz yapılabilir. Fonksiyon, sondaj aralığı azaldıkça güvenilirliğin R_{\max} 'a yaklaştığını ama onu tam olarak geçemediğini gösterir, yani sonsuz güvenilirlik mümkün değildir.

2. Sondaj Maliyeti ile Sondaj Aralığı Arasındaki İlişkinin Tanımlanması

Sondaj aralığı d'nin maliyet üzerindeki etkisini tanımlamak için, maliyeti sondaj aralığına bağlı olarak ifade edelim. Maliyet eşitlik 13 ile modellenebilir:

$$C(d) = N(d) \times c \quad (13)$$

Burada:

- $N(d)$: Sondaj aralığı d olduğunda gereken toplam sondaj sayısı.

- **c:** Tek bir sondajın ortalama maliyetini göstermektedir.

Sondaj aralığı d küçüldükçe, gereken sondaj sayısı artar ve dolayısıyla toplam maliyet de artar. Sondajların düzenli bir ızgara üzerinde yapıldığını varsayarsak, $N(d)$ eşitlik 14 ile hesaplanabilir:

$$N(d) = \frac{L \times W}{d^2} \quad (14)$$

Burada L ve W , çalışma alanının uzunluk ve genişliği olup, ızgaranın alanını verir. Eğer başlangıçta N_0 adet sondaj zaten yapılmışsa, ek sondaj maliyeti eşitlik 15 ile ifade edilebilir:

$$C(d) = \left[\frac{L \times W}{d^2} - N_0 \right] \times c \quad (15)$$

Bu formül, mevcut sondajların üzerine ek yapılacak sondajların maliyetini ifade eder. Sondaj aralığı azaldıkça yeni sondaj sayısı artacağından, maliyet de artar.

3. Optimizasyon Problemi

Güvenilirlik ve maliyet fonksiyonlarını kullanarak amaç fonksiyonunu eşitlik 16 ile tanımlanabilir:

$$\text{Max} [(R(d) - R_{\min}) \times \text{NBD} - C(d)] \quad (16)$$

Bu amaç fonksiyonunda:

- $R(d) - R_{\min} \times \text{NBD}$: Ek sondajlar sonucu güvenilirlik artışının projenin Beklenen NBD'sine katkısını ifade eder. Bu terim, güvenilirlik artışı sayesinde riskin azalmasının proje değerine katkısını yansıtır.
- **C(d)**: Ek sondajların maliyetini temsil eder.

Amaç, güvenilirlik artışından elde edilen ekonomik faydayı (bilginin değeri) sondaj maliyetine kıyasla maksimize edecek şekilde optimum sondaj aralığı d değerini bulmaktır. Bu problemi çözmek için türev alınarak kritik noktalar bulunabilir veya numerik optimizasyon yöntemleri kullanılabilir (Eşitlik 17).

$$\frac{d}{dd} [(R(d) - R_{\min}) \times \text{NBD} - C(d)] \quad (17)$$

Bu denklem çözülerek, projenin Beklenen NBD'ine en fazla katkı sağlayan ve maliyetleri minimize eden optimum sondaj aralığı hesaplanabilir. Ancak bu tür fonksiyonlar için türev almak ve analitik bir çözüm elde etmek genellikle zor olabilir. Çünkü hem güvenilirlik fonksiyonu $R(d)$ hem de maliyet fonksiyonu $C(d)$ karmaşık ve doğrusal olmayan yapılara sahiptir. Örneğin, güvenilirlik fonksiyonu sigmoidal bir yapıdayken maliyet fonksiyonu genellikle ters orantılıdır.

Bu durumda, türev alarak analitik çözüm bulmak yerine yinelemeli (iterative) yöntemler kullanmak, yani sayısal optimizasyon teknikleri uygulamak daha uygun ve pratik bir çözüm yolu olarak öne çıkar. Yinelemeli yöntemlerle problem çözüldükçe şu adımlar izlenebilir:

1. Başlangıç Değerlerinin Belirlenmesi: İlk olarak, sondaj aralığı d için makul bir başlangıç değeri seçilir (örneğin, mevcut aralık olan 100 m).
2. Adım Adım İyileştirme: Belirlenen d değeri için, güvenilirlik ve maliyet fonksiyonları hesaplanır ve amaç fonksiyonu değeri bulunur (eşitlik 18):

$$F(d) = (R(d) - R_{\min}) \times \text{NBD} - C(d) \quad (18)$$

3. Yeni Değerlerin Denenmesi: Sondaj aralığı d 'yi adım adım artırarak veya azaltarak yeni amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Amaç fonksiyonunun değeri her adımda iyileşip iyileşmediği kontrol edilir.
4. Durdurma Ölçütü: Amaç fonksiyonunun değeri belirli bir noktadan sonra daha fazla iyileşmiyorsa veya çok küçük değişimler oluyorsa, en iyi sonuç veren d değeri optimum aralık olarak kabul edilir.

5. Sonuçların Analizi: Elde edilen optimum sondaj aralığı değeri analiz edilerek, bu değer ekonomik olarak sürdürülebilir olup olmadığı değerlendirilir. Bunun için örneğin F-M oranı kullanılabilir (eşitlik 19):

$$\text{Fayda/Maliyet Oranı} = \frac{\text{Bilginin Değeri}}{\text{Ek Sondaj Maliyeti}} \quad (19)$$

Bu oran 1'den büyük olduğu sürece (yani bilginin değeri, maliyetlerden büyük olduğu sürece), ek sondajların yapılması ekonomik olarak mantıklı kabul edilir. Fayda/maliyet oranı ne kadar büyükse, ek sondajların yapılması o kadar ekonomik anlamda uygun olacaktır.

Farklı sondaj aralıkları (örneğin, 100 m veya 50 m) için bu analiz tekrarlanarak, her durumda elde edilen bilginin değeri ve maliyetler karşılaştırılabilir. En yüksek fayda/maliyet oranını sağlayan sondaj aralığı, projenin belirsizliğini en etkin şekilde azaltan ve ekonomik açıdan en uygun sondaj aralığı olarak kabul edilir.

Bu yinelemeli çözüm yöntemi, optimizasyon yazılımları (örneğin Python'da SciPy veya R'de optim) ya da Excel'de Çözücü (Solver) gibi araçlarla uygulanabilir. Bu araçlar, karmaşık türevlerin hesaplanması yerine sayısal olarak optimum değeri arar ve kullanıcıya hızlı bir çözüm sunar. Özellikle saha verileri ve ekonomik değişkenlerin belirsiz olduğu durumlarda, bu yöntem daha esnek ve uyarlanabilir bir çözüm sunar.

Yinelemeli çözüm yöntemi, aynı zamanda saha koşullarında yapılan değişikliklere ve elde edilen yeni verilere hızlıca adapte edilebilmesi açısından da üstündür. Böylece, saha koşulları veya ekonomik koşullarda değişiklikler olduğunda, analiz kolaylıkla güncellenebilir.

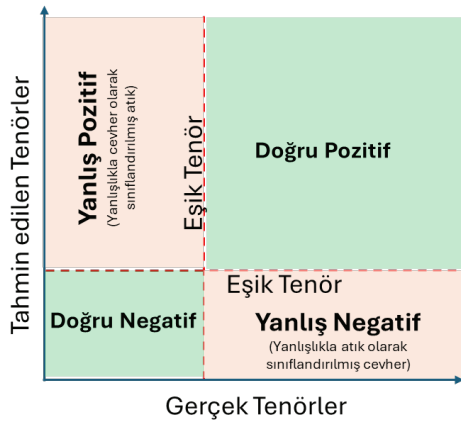
Yanlış Sınıflandırma Maliyetinin Minimizasyonu

Yanlış sınıflandırma maliyetinin minimizasyonu, özellikle sondaj programlarının optimizasyonunda cevherli ve cevhersiz (atık) bölgelerin doğru bir şekilde ayrılmasını amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, hem sondaj maliyetlerini kontrol altında tutmak hem de belirsizliği ve yanlış sınıflandırma maliyetlerini minimumda tutmak amaçlanır. Bu sayede, ekonomik kazanç maksimize edilmiş olur ve sınırlı kaynaklarla en doğru sonuçlara ulaşılabilir.

Yanlış sınıflandırma maliyetleri iki ana kategoriye ayrılır:

1. Yanlış Pozitif (False Positive) Sınıflandırma Maliyeti: Cevhersiz bir bloğun veya bölgenin cevherli olarak sınıflandırılmasıdır (Şekil 8). Bu durumda değersiz veya düşük tenörlü malzemenin çıkarılması ve işlenmesi, gereksiz işleme ve düşük kaliteli ürün üretimine yol açar. Bu hatanın neden olduğu ekstra maliyetlere yanlış pozitif sınıflandırma maliyeti denir.
2. Yanlış Negatif (False Negative) Sınıflandırma Maliyeti: Cevherli bir bloğun veya bölgenin cevhersiz olarak sınıflandırılmasıdır (Şekil 8). Bu durumda, maden içeren bir bloğun veya bölgenin gözden kaçırılması veya değerli cevherin atığa gönderilmesi söz konusu olur. Bu hatanın yol açtığı ekonomik kayıplara yanlış negatif sınıflandırma maliyeti denir.

Clayton V. Deutsch, Mario E. Rossi, J.P. Chilès, P. Delfiner, Peter Dowd, Roussos Dimitrakopoulos, Andre Journel ve Xavier Emery maden planlaması, belirsizlik yönetimi ve optimizasyon konularında önde gelen araştırmacılarıdır (Değinen Belgeler bölümündeki referanslarına bakınız).



Şekil 8. Yanlış pozitif ve yanlış negatif hataların belirlenmesi (Vargas, 2017’ tan değiştirilerek).

Figure 8. Identification of false positive and false negative errors (Modified from Vargas, 2017).

Örneğin Chiles ve Delfiner (1999), “Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty” adlı eserlerinde, sınıflandırma problemleri ve yanlış sınıflandırma risklerinin nasıl değerlendirileceğine dair temel yaklaşımlar sunmuşlardır. Englund ve Heravi (1993), yanlış sınıflandırma maliyetlerini yanlış sınıflandırma indeksi olarak değerlendirmiş ve sondaj yerlerini buna göre optimize etmek için kullanmıştır. Rossi ve Deutsch (2014), Chilès ve Delfiner (1999), Dowd (1997), Journel ve Huijbregts (1978), Emery ve Séguret (2020) ve Vargas (2017) yanlış sınıflandırma maliyetlerini minimize etmek amacıyla jeostatistiksel yöntemleri ve benzetim tabanlı analizleri kullanmış, sondaj aralığı ve yoğunluğunun optimizasyonunda bu yöntemlerin uygulamalarını incelemişlerdir.

Yanlış Sınıflandırma Maliyetlerinin Hesaplanması

Yanlış sınıflandırma maliyetlerini hesaplamak için yanlış pozitif ve yanlış negatif durumların olasılıkları ve bu hataların ekonomik

etkileri dikkate alınır. Hesaplama düzeyi, blok temelinde veya daha geniş alanlar için yapılabilir ve projenin ölçeğine ve karar verme sürecinin ayrıntı düzeyine bağlıdır.

Blok temelli yaklaşımda yanlış sınıflandırma maliyeti, her bir blok için ayrı ayrı hesaplanır ve bu maliyetlerin toplamı genel proje maliyetine etkisini belirler. Bu yaklaşıma örnek olarak, bir madencilik şirketinin 20x20x10 metre boyutlarındaki bloklardan oluşan bir model kullanarak her bloğun cevherli olup olmadığını belirlemek istediğini varsayalım. Bir bloğun tahmini tenörü belirlenen bir eşik tenör değeri ile karşılaştırılarak cevher ya da atık olarak sınıflandırılır. Örneğin, bir blok tahminlere göre cevherli olarak sınıflandırılmış ancak gerçek tenörü eşik tenörden düşük çıkarsa, bu durumda yanlış pozitif sınıflandırma maliyeti oluşur. Bu maliyet, tahmin edilen ton başına madencilik ve işleme maliyeti, blok hacmi ve yoğunluğu kullanılarak hesaplanabilir.

Başka bir blok ise atık olarak sınıflandırılmış ancak gerçekte eşik tenörün üzerinde bir tenöre sahipse, bu durumda yanlış negatif sınıflandırma maliyeti oluşur. Bu durumda, yanlış sınıflandırma maliyeti, kaybedilen cevher değerine eşittir ve yerinde bırakılan cevher miktarı, madencilik verimi ve ton başına yerinde (in situ) cevher değeri çarpılarak bulunabilir.

Bölge veya alan temelinde hesaplamada yanlış sınıflandırma maliyeti birçok blok içeren daha geniş bir alan veya bir bölge temelinde hesaplanır. Belirli bir sondaj verisi setine dayalı olarak, hangi bölgelerin cevherli veya cevhersiz olarak sınıflandırılacağına karar verilir. Bu belirli alanın cevher ya da atık olarak sınıflandırılmasının yanlış olması durumunda ortaya çıkacak toplam maliyet dikkate alınır.

Bölge veya alan temelinde hesaplama, daha basit ve hızlı bir analiz sağlar, bu da geniş alanlar

için genel kararlar verirken avantajlı olabilir. Bölgedeki heterojenlik çok yüksek değilse veya projenin ilk aşamalarında uygulanabilir.

Yanlış Sınıflandırma Olasılıklarının Hesaplanması

Blok tenörlerinin normal dağılıma uyduğu varsayılırsa, tahmin edilen tenör ve kriging varyansı kullanılarak yanlış sınıflandırma olasılıkları hesaplanabilir:

Yanlış pozitif olasılığı, tahmin edilen blok tenörünün eşik değerinin altında olmasına rağmen kriging belirsizliği nedeniyle bu değer üstünde kabul edilme olasılığıdır. Yanlış negatif olasılığı ise tahmin edilen blok tenörünün eşik değerinin üstünde olmasına rağmen kriging belirsizliği nedeniyle bu değer altında kabul edilme olasılığıdır. Bu olasılıkları hesaplamak için eşitlik 20 ve 21 kullanılır:

- Yanlış pozitif olasılığı

$$P_{YP} = 1 - \Phi \left(\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma} \right) \quad (20)$$

- Yanlış negatif olasılığı

$$P_{YN} = \Phi \left(\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma} \right) \quad (21)$$

Burada:

Z_k : Tahmin Edilen Blok Tenörü,

$g_{eşik}$: Eşik Tenör Değeri ve

σ : Standart sapma veya Blok Kriging Varyansının kareköküdür.

Bu formüllerde geçen $\Phi \left(\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma} \right)$ ifadesi, standart normal dağılımın (Z dağılımı) bir değerinin kümülatif dağılım fonksiyonunu (CDF) ifade eder.

Bu, $\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma}$ değerinin standart normal dağılımında karşılık geldiği z değerini kullanarak, o değer solundaki alanı yani belirli bir olasılığı bulmak anlamına gelir. Başka bir deyişle Φ

sembolü, kümülatif dağılım fonksiyonunu ifade eder. Bir z değerine kadar olan alanı (yani olasılığı) verir.

$\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma}$, tahmin edilen blok tenörü (Z) ile eşik tenör ($g_{eşik}$) arasındaki farkın, blok tahminindeki belirsizlik veya hata (kriging standart sapması σ) cinsinden normalize edilmiş halidir.

Yanlış pozitif olasılığı (P_{YP}), tahmin edilen blok tenörünün (Z) eşik tenörden düşük olmasına rağmen, belirsizlik nedeniyle eşik değer üzerinde sınıflandırılma olasılığıdır. Yani, bu hesaplama, tahmin edilen değer gerçekte eşik değer altında olduğu ama tahmin belirsizliği yüzünden eşik değer üzerinde kabul edilme ihtimalini gösterir.

Yanlış negatif olasılığı (P_{YN}) ise, tahmin edilen blok tenörünün (Z_k) eşik tenörden yüksek olmasına rağmen, belirsizlik nedeniyle eşik değer altında sınıflandırılma olasılığıdır. Yani, bu hesaplama, tahmin edilen değer gerçekte eşik değer üzerinde olduğu ama tahmin belirsizliği yüzünden eşik değer altında kabul edilme ihtimalini gösterir.

Özetle, Φ fonksiyonu, normal dağılım tablosundan veya standart normal dağılım BDF'nundan (Birlikli / Kümülatif Dağılım Fonksiyonu), belirli bir z değerine karşılık gelen olasılıkları belirlemek için kullanılır. $\frac{g_{eşik} - Z_k}{\sigma}$ ifadesi ise, tahmin edilen blok tenörü ile eşik tenörün farkının, belirsizliğin büyüklüğü (standart sapma) cinsinden normalize edilmesiyle elde edilen z - değeridir (z -skoru veya z - puanı da denmektedir). Z -değeri, bir veri noktasının bir veri setinin ortalamasından kaç standart sapma uzaklıkta olduğunu tanımlayan istatistiksel bir ölçümdür. Bu z değerini kullanarak, tahminlerin ne kadar doğru olduğuna dair olasılıkları hesaplanabilir.

Optimum Sondaj Aralığının Belirlenmesi

Yeni sondajlar, tahminlerin doğruluğunu artırarak kriging varyansını düşürür. Bu durum hem yanlış pozitif hem de yanlış negatif sınıflandırma olasılıklarının azalmasına yol açar. Yanlış sınıflandırma olasılıklarının düşmesi de toplam beklenen yanlış sınıflandırma maliyetinin azalmasını sağlar. Eğer yeni sondajın maliyeti, yanlış sınıflandırma maliyetindeki azalmadan daha düşükse, sondaj yapılması ekonomik olarak faydalıdır. Bu durumda sondaj, yanlış sınıflandırma maliyetlerini azaltarak toplam ekonomik faydayı artırır. Optimum sondaj kuyusu aralığı, maliyetin, seçimli madencilik birimlerindeki cevher ve atıkların yanlış sınıflandırılmasının maliyetine eşit olacağı şekilde tanımlanır (Şekil 9).

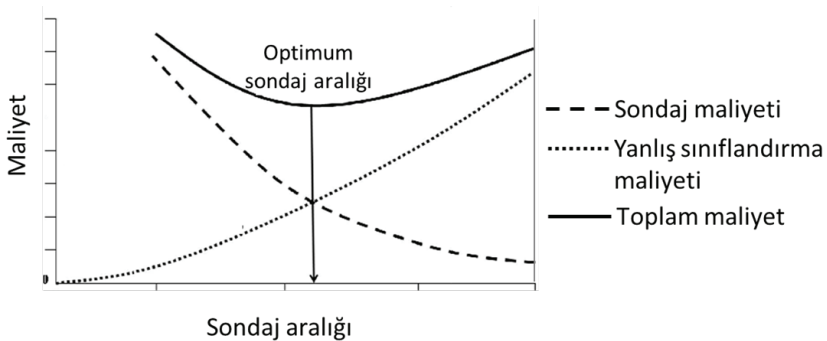
Matematiksel Optimizasyon Tekniklerinin Kullanımı

Matematiksel olarak, bu problem bir maliyet minimizasyon problemi olarak formüle edilebilir ve optimizasyon algoritmaları (doğrusal programlama, dinamik programlama vb.) kullanılarak en uygun sondaj noktaları

belirlenebilir. Amaç fonksiyonu, toplam maliyeti (yanlış sınıflandırma maliyeti + yeni sondaj maliyeti) minimize etmektir. Karar değişkenleri, yeni sondajların lokasyonları ve sayısıdır. Kısıtlar arasında toplam sondaj maliyetlerinin bütçeyi aşmaması ve belirli bir belirsizlik seviyesinin altında kalmak gibi koşullar yer alabilir.

META-SEZGİSEL YAKLAŞIMLAR

Maden kaynak belirlemeye yönelik sondaj tasarımlarının optimizasyonu, jeolojik belirsizlikler, maliyet kısıtlamaları ve birden fazla amacın aynı anda göz önünde bulundurulması gereken karmaşık bir optimizasyon problemidir. Stokastik ve meta-sezgisel yöntemler (genetik algoritmalar, yapay arı kolonisi, parçacık sürüsü optimizasyonu gibi) özellikle karmaşık ve büyük ölçekli optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır ve bu tür problemlerin üstesinden gelmek için etkili araçlar sunar. Bu yaklaşımlar, belirli bir problemi doğrudan çözmek yerine, daha genel bir arama stratejisi kullanarak optimal ya da optimal çözüme yakın sonuçlar bulmayı hedefler.



Şekil 9. Yanlış sınıflandırma maliyetine göre optimum sondaj kuyusu aralığının hesaplanması (Özkan, 2023).

Figure 9. Calculation of optimal drill hole spacing based on misclassification costs (Özkan, 2023).

Maden arama ve sondaj optimizasyonu için kullanılan meta-sezgisel yöntemler arasında genetik algoritmalar (Soltani vd., 2011), parçacık sürüsü optimizasyonu (Soltani vd., 2016; Fatehi vd., 2017), tabu arama (TS), tavlama benzetimi (Soltani ve Hezarkhani, 2013; Soltani vd., 2012) ve çok kollu haydut (Dirkx ve Dimitrakopoulos, 2017) gibi teknikler bulunmaktadır. Ancak, literatürde bu optimizasyon yöntemlerine nadiren rastlanır. Bunun nedenleri, stokastik yöntemler ve meta-sezgisel algoritmaların büyük veri setleri ve karmaşık modellerle çalışmak için yoğun hesaplama gücü gerektirmesi, algoritmaların her bir maden yatağına özel olarak uyarlanmasının zorluğu ve sektörde yeni yöntemlerin kabul görmesinin zaman alması olabilir.

SONUÇLAR

Maden kaynak belirleme sondajları, maden arama yatırımlarında yüksek maliyetli adımlardan biridir. Her bir sondaj kuyusu; ekipman, iş gücü, ulaşım ve analiz gibi çeşitli giderler nedeniyle yüksek maliyetlere yol açar. Sondaj programlarının optimizasyonuna yeterince önem verilmemesi, yanlış konumlandırılmış veya gereksiz sondajlar nedeniyle hem maliyetlerin artmasına hem de zaman kaybına yol açar. Bu durum, sadece mali kaynakların boşa harcanmasına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda madenin değerlendirilmesinde gecikmelere ve dolayısıyla ciddi mali kayıplara yol açar.

Özellikle 1970'lerden itibaren, maden arama ve sondaj programlarının verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu çalışmada, maden kaynak belirleme sondaj programlarının tasarımı için kullanılan geleneksel (örneğin geometrik yöntemler) ve modern (meta-sezgisel algoritmalar gibi) optimizasyon yöntemleri incelenmiş ve bu yöntemlerle sondaj tasarım problemlerinin çözümüne dair

örnekler sunulmuştur. Maden kaynak belirleme sondaj programlarının doğru şekilde optimize edilmesiyle, belirsizliklerin azalması, verimsiz sondajların tespit edilip önlenmesi ve örnekleme maliyetlerinin azaltılması mümkündür. Maliyet tasarrufuna ek olarak, doğru planlanmış sondajlar sayesinde jeolojik modelin doğruluğu artırılabilir ve madenin gerçek boyutları ile mineral dağılımı hakkında daha güvenilir tahminler yapılabilir.

Maden kaynak belirleme sondaj programlarının optimizasyonu, maden kaynak doğruluğunu artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla sürekli gelişen bir alandır. Bu alanda gelecekteki araştırma konuları ve yönelişler hakkında şunlar söylenebilir.

- İleri makine öğrenimi algoritmaları (örneğin, derin öğrenme ve karar ağaçları) ve yapay zeka destekli modeller, mevcut verilerden öğrenerek sondaj yerlerinin ve yoğunluklarının optimizasyonunu otomatikleştirebilir ve jeolojik belirsizlikleri azaltabilir.
- Sıklaştırma sondaj programlarında belirsizliğin azaltılması ve yeni verilerin bütünleştirilmesi için Bayesci güncelleme teknikleri gittikçe önem kazanmaktadır. Bu yöntemle, her yeni sondaj sonucu ile kaynak tahminleri güncellenebilir ve optimum sondaj yerleri dinamik olarak belirlenebilir (Bayesci Güncelleme ve Dinamik Optimizasyon).
- Jeolojik ve mineralojik heterojenliklerin daha doğru bir şekilde modellenmesi, sondaj yerleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Gelecekte, daha gelişmiş coğrafi bilgi sistemi (CBS) bütünleştirilmesi ve veri analitiği araçları ile maden kaynak modelleme hassasiyeti artırılabilir.
- Sıklaştırma sondaj programlarında, maliyet ve doğruluk arasındaki dengeyi sağlamak

için çok amaçlı optimizasyon teknikleri giderek önem kazanmaktadır. Bu yaklaşımla, sondaj sıklığı ve doğruluk hedeflerine göre Pareto cephesi oluşturularak, kullanıcıya bir dizi optimal çözüm sunulabilir.

- Monte Carlo benzetim teknikleri, özellikle jeolojik belirsizlikleri anlamak ve sondaj programlarının risk analizini yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelecekte, daha hızlı ve daha karmaşık benzetim yöntemleri, belirsizlikleri daha kapsamlı şekilde ele alarak sıklaştırma sondaj programlarını optimize etmeye katkı sağlayabilir.
- Özellikle bulut tabanlı veya bütünleşik karar destek sistemleri, sondaj programlarının tasarımında esneklik ve hız sağlayarak kullanıcıların jeolojik modellerle gerçek zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır. Bu sistemler, optimizasyon sürecini hızlandırırken kullanıcıya görsel analiz ve veri bütünleştirme sağlar.

Bu araştırma alanları, sıklaştırma sondaj programlarının verimliliğini artırarak, sondaj maliyetlerini optimize etmek ve kaynak tahminlerinde doğruluğu artırmak için giderek daha fazla önem kazanacaktır.

KATKI BELİRTME

Makaleyi yayın öncesinde okuyup düzeltmeleri ve destekleri için DAMA Mühendislik A.Ş Genel Müdür Yardımcısı Sayın Mehmet Ali Akbaba, Jeoloji ve Arama Bölümü Müdürü Sayın Mustafa Atalay'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca değerli katkıları ve önerileri için hakemlere teşekkür etmek istiyorum. Prof. Dr. Tolga Çan, Doç. Dr. Senem Tekin başta olmak üzere dergi editörlerine sağladıkları editoryal yardım için de minnettarım.

KAYNAKLAR

- Armstrong, M., & Dowd, P. A. (Eds.). (1994). Geostatistical simulations. Springer Science & Business Media.
- Bertoli, O., Paul, A., Casley, Z., & Dunn, D. (2013). Geostatistical drillhole spacing analysis for coal resource classification in the Bowen Basin, Queensland. *International Journal of Coal Geology*, 112, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.08.001>
- Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., & Vargas-Guzman, J. A. (2005). Joint simulations, optimal drill hole spacing and the role of stockpile. In Leuangthong, O., & Deutsch, C. (Eds.), *Geostatistics Banff 2004: Quantitative Geology and Geostatistics* (Vol. 14, pp. 35–44). Springer.
- Caers, J., Scheidt, C., Yin, Z., Wang, L., Mukerji, T., & House, K. (2022). Efficacy of information in mineral exploration drilling. *Natural Resources Research*, 31, 1157–1173. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10002-8>
- Chilès, J. P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons.
- Clark, I. (1979). *Practical geostatistics*. Applied Science Publishers.
- Clark, I., & Harper, W. V. (2000). *Practical geostatistics*. Ecosse North America.
- David, M. (1977). *Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier.
- Deutsch, C. V. (2002). *Geostatistical reservoir modeling*. Oxford University Press.
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1997). *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Diehl, P., & David, M. (1982). Classification of ore reserves/resources based on geostatistical methods. *CIM Bulletin*, 75(838).
- Dimitrakopoulos, R. (2011). Stochastic optimization for strategic mine planning: A decade of developments. *Journal of Mining Science*, 47(2), 138–150. <https://doi.org/10.1134/S1062739111020039>
- Dirkx, R., & Dimitrakopoulos, R. (2017). Optimizing infill drilling decisions using multi-armed bandits: Application in a long-term, multi-element stockpile. *Mathematical Geosciences*, 50, 35–52. <https://doi.org/10.1007/s11004-017-9691-y>

- Dohm, C. (2004). Quantifiable mineral resource classification: A logical approach. In Leuangthong, O., & Deutsch, C. V. (Eds.), *Geostatistics Banff 2004* (pp. 333–342). Springer.
- Dowd, P. A., (1997). Risk in minerals projects: Analysis, perception and management. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Minerals Industry*, 106, A9–A18.
- Drumond, D. A., Amarante, F. A. N., Koppe, V. C., & Costa, J. (2019). A chart for judging optimal sample spacing for ore grade estimation. Part II. *Natural Resources Research*, 29, 551–560. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09457-9>
- Eidsvik, J., & Ellefmo, S. L. (2013). The value of information in mineral exploration within a multi-Gaussian framework. *Mathematical Geosciences*, 45(7), 777–798. <https://doi.org/10.1007/s11004-013-9482-7>
- Eidsvik, J., Mukerji, T., & Bhattacharjya, D. (2015). *Value of information in the Earth sciences: Integrating spatial modeling and decision analysis*. Cambridge University Press.
- Emery, X., & Séguret, S. A. (2020). *Geostatistics for the mining industry: Applications to porphyry copper deposits*. CRC Press.
- Englund, E. J., & Heravi, N. (1993). Conditional simulation: Practical application for sampling design optimization. In Soares, A. (Ed.), *Proceedings of the Fourth International Geostatistics Congress* (Vol. 2, pp. 613–624). Kluwer Academic.
- Fatehi, M., Asadi Haroni, H., & Hossein Morshedy, A. (2017). Designing infill directional drilling in mineral exploration by using particle swarm optimization algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 487. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3212-3>
- Froyland, G., Menabde, M., Stone, P., & Hodson, D. (2018). The value of additional drilling to open pit mining projects. In Dimitrakopoulos, R. (Ed.), *Advances in applied strategic mine planning* (pp. 119–138). Springer.
- Haining, R. P. (2003). *Spatial data analysis: Theory and practice*. Cambridge University Press.
- Harding, B. E. (2021). Drillhole spacing determination with value of information. Retrieved from <https://era.library.ualberta.ca/items/fa0321f4-a91b-4202-bf92-a58fdd53842a>
- Harding, B., & Deutsch, C. V. (2022). Drillhole spacing determination with value of information. *CIM Journal*, 13(1), 38–51.
- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press.
- Koppe, V. C., Rubio, R. H., & Costa, J. F. C. L. (2017). A chart for judging optimal sample spacing for ore grade estimation. *Natural Resources Research*, 26(2), 191–199.
- Özkan, Y. Z. (2023). Maden arama projelerinin optimizasyonu. Mayeb Basın Yayın İnsan Kaynakları Ltd. Şti.
- Rivoirard, J. (1994). *Introduction to disjunctive kriging and non-linear geostatistics*. Clarendon Press.
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). *Mineral resource estimation*. Springer.
- Soltani-Mohammadi, S., & Hezarkhani, A. (2013). A simulated annealing-based algorithm to locate additional drillholes for maximizing the realistic value of information. *Natural Resources Research*, 22(3), 229–237.
- Soltani-Mohammadi, S., Hezarkhani, A., & Tercan, E. (2012). Optimally locating additional drill holes in three dimensions using grade and simulated annealing. *Journal Geological Society of India*, 80, 700–706.
- Soltani, S., Hezarkhani, A., Tercan, E., & Karimi, B. (2011). Use of genetic algorithm in optimally locating additional drillholes. *Journal of Mining Science*, 47(1), 62–72.
- Soltani-Mohammadi, S., Safa, M., & Mokhtari, H. (2016). Comparison of particle swarm optimization and simulated annealing for locating additional boreholes considering combined variance minimization. *Computers & Geosciences*, 95, 146–155.
- Usero, G., Misk, S., & Saldanha, A. (2019). An approach for drilling pattern simulation. In *Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry* (pp. 59–66). CRC Press.
- Vargas, A. M. (2017). Optimizing grade-control drill hole spacing with conditional simulation. *Minería y Geología*, 33(1), 1–12.
- Wang, J., Zhang, T., & Fu, B. (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 67, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.052>

YAYIN AMAÇLARI VE KURALLARI, YAYINA KABUL İLKELERİ

AMAC ve KAPSAM:

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ

- İnsan ile Yerküre arasındaki etkileşimlere ilişkin bilgi ve deneyimleri doğal çevreyi de gözetererek daha güvenli ve sağlıklı bir yaşam ortamı sağlamak amacı ile insanlığın hizmetine sunmayı hedefleyen Jeoloji Mühendisliği mesleğinin, günlük yaşamdaki yerini ve önemini daha etkin bir şekilde yansıtmak,
- Bu alanda ulusal ve uluslararası gelişmeleri Jeoloji Mühendislerinin bilgisine sunmak,
- Konu ile doğrudan veya dolaylı etkinliklerde bulunan bilim insanları, 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,
- Uluslararası Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda, doğal kaynakların etkili yönetimi, mühendislik yapıları, mekansal planlamalar, insan ve doğayı yeryüzü dinamiklerini gözetererek, jeolojik tehlikeler göz önünde bulundurularak dirençli ortamların tasarımına katkıda bulunmak ve Jeoloji Mühendisliğine ilişkin diğer sorunların daha etkin bir şekilde çözüme kavuşturulması ve geliştirilmesini sağlamak,
- Disiplinler arası araştırmaların ve birlikte çalışabilirlik ilkelerinin geliştirilmesine katkıda bulunma,

amaçlarına sahiptir.

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, mühendislik jeolojisi, jeoteknik, su kaynakları yönetimi ve hidrojeoloji, çevre jeolojisi ve atık yönetimi, jeotermal, sondaj tekniği ve uygulamaları, doğal olası tehlikeler, doğa kaynaklı afetler ve afet yönetimi gibi uygulamalı jeoloji mühendisliği hizmetleri konularının yanı sıra, uygulamaya yönelik yerbilim verilerinin de içinde bulunduğu inşaat, maden, jeofizik, petrol, çevre ve şehir bölge planlama gibi disiplinler arası ulusal ve uluslararası araştırmaların yayımlandığı bir dergidir.

Bu kapsamda;

- Mühendislik yapıları için uygun yer seçimi araştırmaları ve arazi kullanım planlamaları,
- Jeoteknik saha araştırmaları, sondaj çalışmaları, arazi ve laboratuvar deneyleri,
- Jeoteknik çalışmalarda kullanılan jeofizik yöntemler,
- Kaya ve zeminlerin jeomekanik özellikleri,
- Şev duraylılığı değerlendirmeleri ve izleme teknikleri,
- İnsan ve doğayı olumsuz etkileyen dinamik jeolojik süreçlere dirençli mekansal planlama çalışmaları,
- Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama teknolojilerinin jeoloji mühendisliği alanında uygulamaları,
- Doğal olası tehlike ve risk (Deprem, sıvılaşma, heyelan, obruk, tıbbi jeoloji, taşkın, çığ vb.) değerlendirmeleri,
- Doğa kaynaklı afetler ve afet yönetimi çalışmaları,

- Çevre jeolojisi araştırmaları, atık yönetimi ve yer seçimi çalışmaları,
- Yüze ve yeraltı su kaynaklarının yönetimi, hidrojeolojik sorunlar ve çözümlere yönelik yaklaşımlar,
- Jeolojik kaynakların yönetimi uygulamaları, sorunları, çözüm önerileri ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi,
- Jeotermal, maden ve mineral kaynaklarının araştırma ve geliştirilmesi, yeraltı jeolojisi modelleme çalışmaları,
- Kirleticiler ve ekosisteme etkileri,
- Doğal yapı malzemeleri ve zemin iyileştirme çalışmaları,
- Tarihi yapıların ve jeolojik anıtların korunmasında mühendislik jeolojisi,
- Kaynak arama ve üretim süreçlerindeki sondaj uygulamaları, sondaj teknolojilerindeki gelişmeler,
- Yapı üretim ve denetim süreçlerinde jeoloji mühendisliği alanına giren konulardaki araştırma, geliştirme ve proje çalışmaları,
- Jeoloji Mühendisliği eğitimi ve eğitimin geliştirilmesi,

konuları öncelikli olmak üzere, yukarıdaki konularla ilişkili tüm kuramsal ve uygulamalı çalışmaları kapsayan araştırmalar Jeoloji Mühendisliği Dergisinde yayımlanır. Çalışmanın daha önce yayımlanmamış olması gerekmektedir. Jeoloji Mühendisliği Dergisinde, dört yazı türü yayımlanmaktadır:

- 1- ARAŞTIRMA MAKALESİ (Research Article):** Özgün bir çalışmanın sunulduğu yazıdır. Kuramsal temel, yeterli miktar ve nitelikte veriye dayalı bulgu ve sonuçların ayrıntılarıyla değerlendirildiği bölümleri içermelidir. Yazının toplam uzunluğu 9000 sözcük eşdeğerini (15 JMD sayfası) aşmamalıdır. Makale, alanında uzman en az iki hakem tarafından incelendikten sonra yayımlanır.
- 2- DERLEME (Review):** 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 getiren ve geliştiren yazıdır. Yazı uzunluğu konuya bağlı olarak değişebilir. Yayın Kurulu incelemesi zorunluluğu yoktur.
- 3- TEKNİK NOT (Technical Note):** Teknik not makalesi, önceki yayınlara kıyasla gerçekten yeni olan bir teknik, ekipman, araştırma yöntemi veya bir değerlendirme yöntemini kapsayan çalışmalardır. Makalede değerlendirme veya ölçüm yöntemlerinin, nasıl doğrulandığı belirtilmelidir. Bir teknik not 4000 kelimedenden uzun olmamalıdır (6 JMD sayfası). Makaleler en az iki yayın kurulu üyesi tarafından incelenecektir.
- 4- DÜZELTME (Erratum):** Makalenin son düzenleme sırasında yazarlar veya yayın kurulu tarafından yanlışlıkla oluşturulan yayımlanmış bir makaledeki hataları düzeltmek için bir hata bildirimini yayımlanır. JMD, yayımlanan makalenin yazarları veya okuyucular tarafından hatalara karşı uyarılabilir. Yazarlar yayın kurulunu uyardıysa, mümkün olan en kısa sürede bir düzeltme (erratum) yayımlanır. Bir okuyucu yayın kurulunu uyardıysa, bir yazım hatası bildiriminin uygun olup olmadığını görmek için yazarla iletişime geçilir. Okuyucular, Editör ile iletişime geçebilirler. Editöre Mektup

alınmışsa ve yazım düzeltilmesi gerekliyse, orijinal makalenin yazarlarından, yayınlanan Editöre Mektup'a yanıt vermeleri ve düzeltme yazısı yazmaları istenir.

ETİK İLKELER VE YAYIN POLİTİKASI

1. Etik İlkeler ve Yayın Politikası

Jeoloji Mühendisliği Dergisi (JMD) yayıncı ve kullanıcıları (Editör ve teknik editör, yazarlar, hakemler, okuyucular vb.) Yayın Etiği Komitesi (Committee on Publication Ethics-COPE, <https://publicationethics.org/>) tarafından belirlenen etik kurallar ve sorumluluklara uyar.

Jeoloji Mühendisliği Dergisi hakemli bir dergidir. Basılı ve elektronik ortamda çevrimiçi yayın yapmakta olup, açık erişim sistemine sahiptir. Dergi sayıları Aralık ve Haziran aylarında yılda iki kez yayınlanır. Yayın süreçlerinde, bilimsel yöntemle özgürce ve yansız biçimde üretilen bilginin paylaşılması gözetilir. Makale değerlendirme sürecinde kör hakemlik sistemi uygulanır. JMD'nin 1977 yılından itibaren yayınlanan tüm sayıları gerek yayıncı kuruluş olan TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (JMO) tarafından basılı ve elektronik versiyonları, TÜBİTAK ULAKBİM- DergiPark tarafından ise elektronik versiyonları arşivlenmektedir.

1.1 Etik İlkeler

Editörlerin Etik Görev ve Sorumlulukları

Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde görev alan Editörler, Yayın Etiği Komitesi (Committee on Publication Ethics -COPE) tarafından "Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors" başlığı altında yayınlanan kılavuz kapsamında hazırlanan etik görev ve sorumluluklara sahiptir.

Editörler, derginin gelişimi ve yayınlanan çalışmaların kalitesini geliştirmeye yönelik süreçleri takip etmekle sorumludurlar.

JMD'ne sunulan makale ilk olarak, Editörler tarafından dergi amaç ve kapsamına uygunluğu açısından gözden geçirilir. Gönderilen makale, derginin amaç ve kapsamına uymuyorsa en geç 15 gün içerisinde reddedilir ve yazara bilgi verilir. Amaç ve kapsamı uygun bulunan makale, yapılan hakem değerlendirmesi öncesi yazım kuralları, dil ve anlatım ile çalışmanın planlanması açısından incelenir. Bu konularda eksiklikleri bulunan makalelerin yazar tarafından düzeltilmesi istenir.

Editörler, makalelerin tüm bölüm içeriklerini inceleyip, uygun bulunduğu makaleler hakem değerlendirmesine alınırlar. Ancak, herhangi bir nedenle hakem değerlendirmesine uygun bulunmayan makaleler, editörün değerlendirme raporuyla birlikte reddedilir. Yazara en geç 15 gün içerisinde bilgi verilir.

Hakem değerlendirmesinde makaleler, editör tarafından içerik ve uzmanlık alanlarına göre dergi hakem havuzundan ve/veya havuz dışından olmak üzere, en az üç hakeme gönderilir. Makale hakemlerinin belirlenmesinde, çıkar çatışması/çakışması hususlarına özen gösterilir.

Hakem görüşleri doğrultusunda, düzeltilmesi istenen makalelerin düzeltilmiş kopyası, geçerli bir neden olmaksızın yazarlar

tarafından 30 gün içerisinde tekrar editöre gönderilmediği takdirde, editörün makaleyi reddetme hakkı vardır. Yeniden düzenleme sonrası, düzeltilmiş makale editör tarafından gerekirse yeniden hakem değerlendirmesine gönderilir veya editör tarafından doğrudan kabul veya reddedilir.

Değerlendirme sonucu, hakemlerden gelen görüşler, editör tarafından en geç 15 gün içerisinde incelenir. İnceleme sonucunda, editör makaleye ilişkin nihai kararını vererek yazara iletir. Ret kararı verilen makaleler arşivlenir.

Editörler; olası suistimal ve görevi kötüye kullanma işlemlerine karşı önlem almakla yükümlüdür. Bu duruma yönelik şikayetlerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi konusunda titiz ve nesnel bir soruşturma yapmanın yanı sıra, konuyla ilgili bulguların paylaşılması, editörün sorumlulukları arasında yer almaktadır. Suistimal şüphesi veya tartışmalı yazarlık durumlarında COPE akış şemaları (<https://publicationethics.org/resources/translated-resources/turkish-all-flowcharts>) dikkate alınarak gerekli aşamalar izlenir.

Editörler; yazar, hakem veya okuyuculardan gelen şikayetleri dikkatlice inceleyerek aydınlatıcı ve açıklayıcı bir şekilde yanıt vermekle yükümlüdür.

Dergi sahibi, yayıncı ve diğer hiçbir politik ve ticari unsur, editörlerin bağımsız karar almalarını etkilemez.

Editörler; yazar(lar), hakemler ve diğer editörler arasındaki çıkar çatışmalarını göz önünde bulundurarak, çalışmaların yayın sürecinin bağımsız ve tarafsız bir şekilde tamamlanmasını garanti eder.

Hakemlerin Etik Görev ve Sorumlulukları

Jeoloji Mühendisliği Dergisi'nde görev alan Hakemler, Yayın Etiği Komitesi (Committee on Publication Ethics -COPE) tarafından "COPE-Ethical Guidelines for Peer Reviewers" başlığı altında yayınlanan kılavuz kapsamında hazırlanan etik görev ve sorumluluklara sahiptir.

- JMD'de tüm bilimsel yayınların objektif değerlendirilmesini sağlamak amacıyla kör hakemlik sistemi uygulanmaktadır. Makaleye hakem atama aşamasında hakem ve yazar(lar) arasında herhangi bir çıkar çatışması/çakışması bulunmamasına özen gösterilmektedir. Bu amaçla hakem ve yazar(lar) arasında bilhassa;
 - Tez danışmanı/öğrenci ilişkisi olmaması,
 - Yazar(lar) ve hakem arasında yakın geçmişte (son 2 yıl) ortak araştırma ve yayın yapılmamış olması,
 - Aynı kurumda görev yapıyor olmaması,
 - Dergiye sunulan yazıya biçim ya da içerik yönünden katkı yapmamış olması,
 - Yazar(lar) ve hakem arasında yargıya ya da etik kurullara intikal eden ihtilafların olmaması,
 - Hakem ve yazar(lar) arasında akrabalık ilişkisinin olmaması,
 - Hakemin yazar(lar) hakkında kamuoyuna intikal etmiş önyargılarının bulunmaması,

- o Hakem ve yazar(lar) arasında herhangi bir ticari ilişkisinin olmaması,

gibi durumlar dikkate alınır. Yukarıda belirtilen ve dergi editörlüğünün gözünden kaçan durumların olması ihtimaline karşı hakemler editörü uyarır ve gerekli bilgiyi verir.

Ayrıca;

- Hakemler, sadece uzmanlık alanlarına giren makaleleri değerlendirir.
- Hakemler değerlendirmelerini tarafsız, objektif ve gizlilik içinde yapmakla yükümlüdürler.
- Değerlendirmede milliyet, cinsiyet, dini inanç, siyasi düşünce, ticari kaygılar vb. nedenlerle tarafsızlıklarını kaybetmemelidirler.
- Görüş ve önerilerini akademik görgü kuralları içinde, yapıcı ve akademik bir dille yapmaları, kişisel polemiğe yaratacak üsluptan kaçınmaları gerekmektedir.
- Yayın sürecini sebepsiz uzatacak şekilde değerlendirmelerini geciktirmemeleri gerekir. Hakem değerlendirme süreci için hakemlere verilen süre 30 gündür. Hakemler veya editörden gelen düzeltme önerilerinin yazarlar tarafından 30 gün içerisinde tamamlanması zorunludur. Hakemler makale için düzeltmelerini inceleyerek uygunluğuna karar verebilir veya gerekliyse birden çok defa düzeltme talep edebilir.

Yazarların Etik Görev ve Sorumlulukları

JMD’nde uygulanan yayın süreçleri, bilginin tarafsız ve saygın bir şekilde gelişimine ve dağıtımına temel teşkil etmektedir. Bu doğrultuda uygulanan süreçler, yazarların ve yazarları destekleyen kurumların çalışmalarının kalitesine doğrudan yansımaktadır. Hakemli çalışmalar bilimsel yöntemi somutlaştıran ve destekleyen çalışmalardır. Bu noktada sürecin bütün paydaşlarının (yazarlar, okuyucular ve araştırmacılar, yayıncı, hakemler ve editörler) Yayın Etiği Komitesi-COPE ilkelerine uyması önem taşımaktadır.

JMD’ne değerlendirilmek üzere makale gönderecek yazar(lar), öncelikle DergiPark’a üye olmak zorundadır. Sorumlu yazar çalışmalarını (orijinal makale, derleme, vb.) JMD’ne DergiPark sistemi üzerinden göndermelidir.

Makaleden sorumlu yazarın dergiye yeni makale gönderimi için “iThenticate İntihal Tespit Yazılımı” veya “Turnitin” veya eşdeğeri bir intihal programı kullanarak benzerlik raporunun yanı sıra, imzalanan “Telif Hakkı Devri Formu” ve “Etik Bildirim Formu”nu DergiPark sistemine yüklemesi gerekmektedir. Gönderilen makalenin benzerlik endeksi oranı, referans listesi hariç, % 20’nin altında olmalıdır.

Yazarlar çalışmalarını aynı anda birden fazla derginin başvuru sürecinde bulundurmaz. Her bir başvuru önceki başvurunun tamamlanmasını takiben başlatılabilir. Başka bir dergide yayınlanmış çalışma JMD’ne gönderilemez.

Sorumlu yazar, gönderilen bu makalenin başka bir yerde benzer bir formda yayınlanmadığını, makalenin orijinal olduğunu ve yayınlanmak üzere başka bir yere gönderilmeyeceğini garanti etmelidir.

Yazar(lar)ın gönderdikleri çalışmaların özgün olması beklenmektedir. Yazar(lar)ın başka çalışmalardan yararlanmaları veya başka çalışmaları kullanmaları durumunda eksiksiz ve doğru bir biçimde atıfta bulunmaları ve/veya alıntı yapmaları gerekmektedir.

Yazar(lar)dan değerlendirme süreçleri çerçevesinde makalelerine ilişkin ham veri talep edilebilir; böyle bir durumda yazar(lar) beklenen veri ve bilgileri yayın kuruluna sunmaya hazır olmalıdır.

Yazar(lar), kullanılan verilerin kullanım haklarına, araştırma/analizlerle ilgili gerekli izinlere sahip olduklarını gösteren belgeye sahip olmalıdır.

Makale yazarlarının her biri makaleye önemli bilimsel katkıda bulunmuş olması gerektiğinden her yazarın eşit etik sorumluluk taşıdığı kabul edilir. Yazar(lar)ın yayınlanmış, erken görünüm veya değerlendirme aşamasındaki çalışmasıyla ilgili bir yanlış ya da hatayı fark etmesi durumunda, dergi editörünü veya yayıncıyı bilgilendirme, düzeltme veya geri çekme işlemlerinde editörle iş birliği yapma yükümlülüğü bulunmaktadır.

Değerlendirme aşamasındaki makalesini geri çekme isteğinde bulunan yazar(lar)ın, konuyu içeren ıslak imzalı dilekçeyi dergi e-posta adresi jmd@jmo.org.tr üzerinden yayın kuruluna iletmesi gerekir. Yayın Kurulu, geri çekme dilekçesini inceleyerek en geç 15 gün içerisinde cevap verir. Yayın Kurulu tarafından dilekçesi onaylanmayan bir makalenin yazar(lar)ı, makalelerini başka bir dergiye gönderemezler.

Yayınlanmak üzere gönderilen tüm çalışmaların varsa çıkar çatışması teşkil edebilecek durumları ve ilişkileri açıklanmalıdır.

Değerlendirme süreci başlamış bir çalışmanın yazar sorumluluklarının değiştirilmesi (Yazar ekleme, yazar sırası değiştirme, yazar çıkartma gibi) teklif edilemez.

Değerlendirme sürecinde yazarlar; editör ve hakemlerin görüş, öneri ve eleştirilerine cevap vermekle yükümlüdürler. Yazarlar, hakem görüşlerini dikkate alarak sorulan soruları cevaplamak, görüş ve önerileri değerlendirmek, eleştirilere karşı olumlu ya da olumsuz karşılık vererek bunlara dair kanıtlarını ayrıntılı bir mektupla editöre bildirmek zorundadır. Bu karşı mektupta akademik üslup kullanılmalı, kişisel tartışmalardan kaçınılmalıdır.

1.2 Yayın Politikası

JMO ve/veya JMD yayınlanacak makalelerin telif haklarının alınması için yazarlardan yazılı onay alır. İlgili yazar, dergiye sunulan makalenin yazarı/sahibi olduğunu ve kendisi ve diğer yazar(lar) adına telif hakkını JMO ve/veya JMD’ne devreder. Telif Hakkı Devri Formunun doldurularak, makale sunumu esnasında dergi sistemine yüklenmesi zorunludur.

Sunulan makalenin tüm yazarları, yazının tüm haklarını ve tüm telif haklarını imzalayarak JMO ve/veya JMD’ne devretmelidir. JMO ve/veya JMD’nin, ilgili makalenin tamamını veya bir kısmını dersler/ders notları, raporlar ve ders kitapları/basılı kitaplar gibi gelecekteki eserlerinde herhangi bir ödeme yapmadan kullanma hakkı ve ilgili makalenin kendi kullanımı için kopyasını alma hakkı vardır. JMO ve/veya JMD; ticari amaçlar dışında patent hakları gibi telif hakkı dışındaki tüm haklarını saklı tutar.

JMD sistemindeki tüm kişisel bilgiler bilimsel amaçlarla kullanılmakta olup, üçüncü taraflarla paylaşılmamaktadır.

Editör, Teknik Editör ve Yayın Kurulu üyeleri, yazarların görüşlerinden ve yazı içeriğinden sorumlu değildir. Yazarlar, yazılarındaki etik özgünlük ve olası hatalardan sorumludur. Son okuma (düzeltme okuması) öncesi ve sayfa düzenleme aşamasında oluşabilecek tüm hatalardan yazarlar sorumludurlar. Son okuma sonrası meydana gelen hatalar dergi yetkililerinin sorumluluğundadır.

YAZIM KURALLARI

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ'nin yayım dili Türkçe ve İngilizcedir. Makale hangi dilde hazırlanmışsa Başlık, Öz, Şekil ve Çizelge açıklamalarını takiben diğer dildeki karşılığı yazılmalıdır. Yazarların ana dillerinin Türkçe olmaması ve bu konuda makalenin dergiye sunumundan önce gerekli yardımı alamamaları durumunda, Başlık, Öz, Şekil ve Çizelge başlıklarının Türkçeye çevrilmesinde Editörler gerekli yardımı sağlar. Ana dili İngilizce olmayan yazarlara, yazılarını DergiPark sistemine yüklemeye önce, dil bilgisi ve yazım tarzı açısından, ana dili İngilizce olan bir kişiden katkı almaları özellikle önerilir.

Dergiye yayımlanmak üzere gönderilen makaleler, dergi yazım kurallarına göre hazırlanmalıdır.

Dergi yazım kurallarına göre hazırlanmış MS Office Word şablonunu bilgisayarınıza indirmek için lütfen [tıklayınız](#)...

Dergiye yayımlanmak üzere gönderilen makaleler, Etik İlkeler ve Yayın Politikası dikkate alınarak hazırlanmış olmalıdır.

Tüm makaleler Jeoloji Mühendisliği Dergisi DergiPark Sistemi üzerinden <https://dergipark.org.tr/tr/journal/1669/submission/step/manuscript/new> adresindeki "Makale Gönder" menüsü aracılığıyla elektronik ortamda gönderilmelidir.

Bunun için önce DergiPark sistemine üye olmalısınız. Makale Gönderim Aşamasında karşınıza çıkan Etik Beyan formu ve Telif Hakkı Devir formlarının düzenlenip, makale dosyalarıyla birlikte sisteme yüklenmesi gerekmektedir.

Yazılar aşağıda verilen düzen çerçevesinde hazırlanmalıdır:

- Başlık (Türkçe ve İngilizce)
- Yazarların Ad(lar)ı SOYAD(LAR)I koyu olacak şekilde, adresleri (italik ve küçük harfle) ile sorumlu yazarın e-posta adresi
- Öz (Türkçe ve İngilizce)
- Anahtar Kelimeler (Türkçe ve İngilizce)
- Giriş (amaç, kapsam ve yöntemi)
- Ana metin (kullanılan yöntemler, çalışılan malzemeler, tanımlamalar, analizler vd.)
- Tartışma ve Sonuçlar veya Sonuçlar
- Katkı Belirtme
- Kaynaklar

Metinde kullanılan değişik türde başlıklar farklı şekillerde ve tüm başlıklar sayfanın sol kenarında verilmelidir. Ana başlıklar büyük harflerle ve koyu yazılmalıdır. İkinci derece başlıklar alt başlık

olarak değerlendirilmeli ve birinci ve ikinci derece alt başlıklar küçük harfle (birinci derece alt başlıklarda her kelimenin ilk harfi büyük) ve koyu, üçüncü derece alt başlıklar ise italik olmalıdır. Başlıkların önüne numara veya harf konulmamalıdır. Yazılar (öz, metin, sponsor, katkı belirtme, kaynaklar, ekler ve şekiller dizini) A4 (29.7 cmX21 cm) boyutundaki sayfaların bir yüzüne, kenarlardan en az 2.5 cm boşluk bırakılarak, 1,5 satır aralığında ve 12 puntoyla (Times New Roman) yazılmalı, ayrıca tüm sayfalara numara verilmelidir.

Başlıklar şu şekilde olmalıdır:

ÖZ

ABSTRACT

GİRİŞ

ANA BAŞLIK

Birinci Derece Alt Başlık

İkinci derece alt başlık

Üçüncü derece alt başlık

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

KATKI BELİRTME

ORCID

KAYNAKLAR

Başlık ve Yazarlar

Yazının başlığı, çalışmanın içeriğini anlaşılır şekilde yansıtmalıdır. Eğer yazı Türkçe hazırlanmışsa, Türkçe başlığı (koyu ve kelimelerin ilk harfleri büyük harf olacak şekilde) İngilizce başlık (italik ve kelimelerin ilk harfleri büyük olacak şekilde) izlemelidir. İngilizce hazırlanmış yazılarda ise, İngilizce başlık Türkçe başlıktan önce ve yukarıda belirtilen yazım kurallarına göre verilmelidir.

Makaledeki yazarlar, eğer henüz yoksa <http://orcid.org> web adresinden edinecekleri ORCID (ORCID, Open Researcher ve Contributor ID'nin kısaltmasıdır. ORCID, Uluslararası Standart Ad Tanımlayıcı (ISNI) olarak da bilinen ISO Standardı (ISO 27729) ile uyumlu 16 haneli bir numaralı URL'dir.) bilgilerini de makale ile birlikte sunmalıdır.

Yazarlara ilişkin bilgi ise aşağıdaki örneklere uygun olarak verilmelidir.

Tolga ÇAN

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 01250 Adana

e-posta: tolgacan@cu.edu.tr

ORCID Numarası: 0000-0001-9940-2832

ÖZ

Çalışma hakkında bilgi verici bir içerikle (çalışmanın amacı, elde edilen başlıca sonuçlar) ve 200 kelimeyi aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır. Özde kaynaklara atıfta bulunulmamalıdır. Makalelerde hem Türkçe hem de İngilizce Öz bulunmalıdır. Türkçe yazılarda ilk önce Öz, daha sonra “Abstract” (İtalik), İngilizce yazılarda ise önce Abstract daha sonra Türkçe Öz (italik) olacak şekilde hazırlanmalıdır.

Anahtar Kelimeler

Öz ve Abstract'ın altında sırasıyla Türkçe ve İngilizce olarak en az 3-6 kelimeyi aşmayacak şekilde ve yazının konusunu yansıtan anahtar kelimeler verilmelidir. Anahtar kelimeler, alfabetik sırayla, birinci anahtar kelimenin ilk harfi büyük, diğerleri ise küçük harflerle yazılmalı ve aralarına virgül konmalıdır. Teknik Not türü yazılarda anahtar kelimelerin verilmesine gerek yoktur.

KATKI BELİRTME

Katkı belirtme, kısa olmalı ve teşekkür edilecek olanlar çalışmaya en önemli katkıyı sağlayan kişilerin ve/veya kuruluşların adlarıyla sınırlandırılmalıdır. Teşekkür edilecek kişilerin açık adları ünvanları belirtilmeksizin verilmeli, ayrıca bu kişilerin görevli oldukları kurum ve kuruluşların adları da eklenmelidir.

Hibe, proje fon desteği vb. teşekkürleri bu başlık altında ayrı bir paragraf olarak belirtilmelidir. Finansman sağlayan kuruluşların isimleri tam olarak yazılmalıdır.

Araştırma sırasında yardım sağlayan kişiler burada listelenmelidir (örneğin, İngilizce tercüme desteği sağlamak, yazım yardımı veya makalenin Türkçe ve İngilizce düzeltilmesini yapmak vb.).

DEĞİNİLECEK BELGELER

Metin İçinde Atıfların Yazılması

A. Yayında tek yazar varsa

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Yazar1, Tarih) Ör: (Sönmez, 1996)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Yazar1 (Tarih) Ör: Sönmez (1996)

B. Yayında 2 yazar varsa

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Yazar1 ve Yazar2, Tarih) Ör: (Merriman ve Frey, 1999)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Yazar1 ve Yazar2 (Tarih) Ör: Merriman ve Frey (1999)

C. Yayında 2'den fazla yazar varsa

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Yazar1 vd., 1987) Ör: (Pettijohn vd., 1987)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Yazar1 vd. (1987) Ör: Pettijohn vd. (1987)

D. Arka arkaya birden fazla atıfta bulunulacaksa

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Merriman ve Frey, 1999; Pettijohn vd., 1987; Sönmez, 1996)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Merriman ve Frey (1999), Pettijohn vd. (1987), Sönmez (1996)

. Aynı yazarların aynı yıl içinde birden fazla yayınına atıfta bulunulduysa

Bu durumda Kaynaklar bölümünde makalelerin tarihlerinden sonra a, b, c gibi harfler verilir, metin içindeki atıflarda da tarihlerden sonraki harfler kullanılır.

Kaynakçada:

Ahmetoğlu, A. ve Hüsnuoğlu, H. (2022a). Makale Adı 1. Süreli yayının/derginin adı (kısaltılmamış), Cilt No(Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Ahmetoğlu, A. ve Hüsnuoğlu, H. (2022b). Makale Adı 2. Süreli yayının/derginin adı (kısaltılmamış), Cilt No(Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Metin içindeki atıflarda:

Parantez içinde yazılması gerekiyorsa: (Ahmetoğlu ve Hüsnuoğlu, 2022a)

Metin içinde yazılması gerekiyorsa: Ahmetoğlu ve Hüsnuoğlu (2022a)

Kaynaklar Bölümü

Aşağıdaki örnekler ile kesinlikle uyumlu olmalıdır

- JMD'de Türkçe yayınlanacak makalelerde: Kaynak çok isimli bir çalışma ise: Son isimden önce “ve” gelmelidir eğer kaynak İngilizce ise “&” kullanılmalıdır.
- Editörün belirtilmesi gereken çalışmalarda: Tek isim ise (Ed.) çoklu editör ise: Son isimden sonra (Ed.ler) eğer kaynak İngilizce ise (Eds.) yazılmalıdır.

A. Süreli yayınlar:

A.1. Süreli yayınların gösterilmesi:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Makalenin başlığı. Süreli yayının/derginin adı (kısaltılmamış), Cilt No(Sayı No), sayfa numaraları. Varsa DOI bilgisi

Hoek, E. & David, M. (1990). Estimating Mohr – Coulomb friction and cohesion values from Hoek – Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics, 27(3), 220-229. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94333-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94333-0)

A.2. Özel durumlar:

A.2.1. Eğer makale serbest erişimli bir internet sayfasından alındıysa:

Ketin, İ. (1949). Son on yılda Türkiye'de vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında. Türkiye Jeoloji Bülteni, 2(1), 1-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/issue/50279/650044>

A.2.2. Eğer makalenin makale numarası varsa:

Açlan, M., Oyan, V. & Köse, O. (2020). Petrogenesis and the evolution of Pliocene Timar basalts in the east of Lake Van, Eastern Anatolia, Turkey: A consequence of the partial melting of a metasomatized spinel-rich lithospheric mantle source. Journal of African Earth Sciences, 168, Article 103844. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103844>

B. Bildiriler:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Bildirinin başlığı. Editör(ler), Sempozyum veya Kongrenin Adı, (bildirinin sayfa aralığı). Yayınevi. Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi

Şanlıyüksel Yücel, D., İleri, B. (2019). Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses. H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, B. Uzel, Ö. Sümer, M. Softa, Ç. Tepe, S. Eski (Ed.ler), 72. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri ve Tam Metin Bildiriler Kitabı, (s.63-64). Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893_ek.pdf

C. Kitaplar:

C.1. Kitapların gösterilmesi:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Kitabın Adı (ilk harfleri Büyük). Yayınevi. Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi

Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. (1987). Sand and Sandstones (2nd ed.). Springer-Verlag New York. <https://www.doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>

Ketin, İ. (2016). Genel Jeoloji, Yerbilimlerine Giriş (9. Baskı). İTÜ Vakfı Yayınları.

C.2. Çeviri Kitapların Gösterilmesi:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Kitabın Çeviri Adı (Çevirenlerin adları). Yayınevi. (Orijinal yayın tarihi). Varsa DOI bilgisi veya internet erişim bilgisi

Komatina, M. M. (2011). Tıbbi Jeoloji: Jeolojik Ortamların İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri (Çev: Y. Örgün ve D. Bayrak). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (Orijinal yayın tarihi: 2001).

D. Kitapta Bölüm ise:

Yazar ad(lar)ı, (Tarih). Bölüm Adı. Editör(ler) Kitap adı (Bölümün sayfa aralığı). Yayınevi.

Merriman, R. J. & Frey, M. (1999). Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In M. Frey & D. Robinson (Eds.), Low Grade Metamorphism, (pp. 61-107). Blackwell Sciences Ltd.

E. Raporlar ve Tezler:

E.1. Raporlar:

Yazar ad(lar)ı, Tarih. Raporun başlığı (Varsa rapor no). Kurum adı (Yayımlanma durumu).

Kellogg, H. E. (1960). Stratigraphic report, Derik-Mardin area Petroleum District V, Southeast Turkey (Rapor no: 1367). TPAO (yayımlanmamış).

E.2. Tezler:

Yazar adı, (Tarih). Tezin başlığı [Yayımlanma durumu ve derecesi]. Kuruluşun veya Üniversitenin Adı.

Sönmez, H. (1996). TKİ ELİ Soma Linyitleri açık işletmelerinde eklemli kaya kütlesi içindeki şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

F. Kişisel Görüşme:

Sözbilir, H., 2005. Personal communication. Geological Engineering Department of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.

G. İnternette İndirilen Bilgiler:

Kurumun veya internet sayfasının adı, (Erişim tarihi). Web adresi.

KRDAE, (2020, 02 Ocak). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. Deprem Bilgileri, Büyük Depremler. <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/>

H. Kaynak olarak kullanılan haritalar:

Konak, N. ve Ercan, T., 2002. 1/500.000 Türkiye Jeoloji Haritası Van Paftası, (Şenel, M., (Ed.)). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Türkçe kaynaklar doğrudan Türkçe olarak verilmeli ve Türkçe karakterlerle yazılmalıdır.

EŞİTLİKLER

Matematiksel sembolleri ve formülleri resim olarak değil, lütfen düzenlenebilir metin olarak gönderin. Denklemler için denklem düzenleyicisini veya MathType'ı kullanın. Eşitliklerde, yaygın olarak kullanılan uluslararası simgelere yer verilmesine özen gösterilmelidir. Her eşitliğe sırayla numara verilmeli, numaralar parantez içinde eşitliğin hizasında ve sayfanın sağ kenarında belirtilmelidir. Prensipten olarak, değişkenler italik olarak sunulmalıdır. "e" nin kuvvetleri "(exp)" ile gösterilmelidir. Eşitliklerde kullanılacak alt ve üst indisler belirgin şekilde ve daha küçük karakterlerle yazılmalıdır (Id, x2 gibi). Eşitliklerdeki sembollerin açıklamaları eşitliğin hemen altındaki ilk paragrafta verilmelidir. Karekök işareti yerine parantezle birlikte üst indis

olarak 0.5 kullanılmalıdır ($\sigma_{mass} = \sigma_{0.5}$ gibi). Bölme işareti olarak yatay çizgi yerine “/” simgesi kullanılmalıdır. Çarpma işareti olarak genellikle herhangi bir işaret kullanılmamalı, ancak zorunlu hallerde “*” işareti tercih edilmelidir ($y=5 * 10^{-3}$ gibi). Kimyasal formüllerde iyonların gösterilmesi amacıyla Ca^{++} veya CO_2 - gibi ifadeler yerine Ca^{+2} ve CO_3^{-2} kullanılmalıdır. Metinde eşitliklere “eşitlikler (1, 2, vb.)” şeklinde atıfta bulunulmalıdır. Eşitlik verildikten sonra ilgili parametreler açıklanmalıdır.

ÇİZELGE VE ŞEKİLLER

Çizelge ve şekiller metin içerisinde yer almalıdır. Çalışmanın sonunda ayrıca verilmemelidir. Çizelge ve şekillerde genel şablonun dışında 10 punto Times New Roman yazı karakteri kullanılır. Paragraf sekmesinde girintiler bölümünde; önce ve sonra alanı 0, satır aralığı tek olmalıdır. Tablo ve şekiller sola dayalı olmalı ve metin kaydırma özelliği kapalı olmalıdır. Çizelge ve şekiller Dergi'nin tek (7.5 cm-Genişlik) veya çift (16 cm-Genişlik) kolonuna sığacak şekilde düzenlenmelidir.

Çizelgeler

Çizelgeler, başlıklarıyla birlikte, Dergi'nin sayfalarındaki baskı alanını (16 x 22cm) aşmayacak şekilde hazırlanmalı ve birbirini izleyen sıra numaralarıyla verilmelidir. Çizelgelerin üst kısımlarında hem Türkçe hem de İngilizce başlıkları bulunmalıdır. Makalenin Türkçe yazılması halinde İngilizce başlık italik harflerle Türkçe başlığın altında yer almalı, İngilizce makalelerde ise, italik yazılmış Türkçe başlık İngilizce başlıktan sonra verilmelidir. Çizelgeler, “Çizelge 1” vb. şeklinde sunulmalıdır. Metinde çizelgelere Çizelge 1 veya Çizelge 1 ve 2 (eğer birden fazla sayıda çizelgeye atıfta bulunulacaksa) şeklinde değinilmelidir. Çizelgeler içindeki karakterler 10 punto (duruma göre daha küçük) yazılmalıdır. Çizelgelerde dikey çizgiler kullanılmamalı, yatay çizgiler ise sadece çizelgenin alt ve üstünde, ayrıca çizelgedeki başlıklar ile bunların altında listelenen rakamları ayırmak için kullanılmalıdır (Bunun için Dergi'nin önceki sayılarına bakılması önerilir). Çizelgelerde makalenin diğer kısımlarında verilen bilgi veya sonuçların (örneğin grafikler vb.) tekrar verilmemesine özen gösterilmelidir. Çizelgelerle ilgili varsa verilmesi gereken açıklamaları daha küçük karakterlerle çizelgenin altında belirtilebilirsiniz.

Şekiller

Çizim, grafik ve fotoğraf gibi tüm şekiller yüksek kalitede basılmış olarak “Şekil” başlığı altında ve metin içinde anıldıkları sırayla numaralandırılarak verilmelidir. Çizim, grafik ve fotoğraf formatlarında aşağıda önerilen kurallar dikkate alınmalıdır.

Kullanılan uygulama ne olursa olsun, elektronik fotoğraf/grafik sonlandırıldığında, ‘farklı kaydet’ seçeneğini kullanarak görüntüleri aşağıdaki biçimlerden birine dönüştürün (çizgi çizimler, yarı tonlar ve çizgi/yarı ton kombinasyonları için aşağıda verilen çözünürlük gereksinimlerine dikkat edin):

EPS (veya PDF): Vektör çizimleri. Yazı tipini yerleştirilmeli veya metin ‘grafik’ olarak kaydedilmeli.

TIFF (veya JPG): Renkli veya gri tonlamalı fotoğraflar (yarı tonlar) için en az 300 dpi kullanılmalı.

TIFF (veya JPG): Çizgi grafikler için en az 1000 dpi kullanılmalı.

TIFF (veya JPG): Çizgi grafikler /yarım ton (renkli veya gri tonlamalı) kombinasyonlarda minimum 500 dpi kullanılması gereklidir.

Şekil başlıkları; şekillerin altına yazılmalı ve çizelgeler için yukarıda belirtilen yazım kurallarına benzer şekilde, şekil başlıkları hem Türkçe hem de İngilizce hazırlanmalıdır. Şekiller için en büyük boyut, şekil başlığını da içerecek biçimde 16 cm (genişlik) x 22 cm (uzunluk) olmalıdır. Özellikle haritalar, arazi ile ilgili çizimler ve fotoğraflar, sayısal ölçek (1:25000 vb.) kullanılmamalı, metrik sisteme uygun çizgisel ölçekle verilmelidir. Tüm haritalarda kuzey yönü gösterilmelidir. Bölgesel haritalarda, uygun koordinat sistemi (enlem/boylam veya izdüşüm koordinat sistemi) değerleri verilmelidir. Harita açıklamaları (lejang); şekil başlığıyla birlikte değil, şeklin üzerinde yer almalıdır. Şekiller (a), (b) vb. gibi gruplar halinde verilebilir. Bu tür sunumlarda örneğin; Şekil 1a, b’de, veya (Şekil 1c, d) a, b, c, d vb. şekilde toplu olarak sunulan bir şekil, ayrı sayfalarda basılması yerine, gruplandırılarak aynı sayfada sunulmalıdır.

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ EDITÖRLÜĞÜ

T.M.M.O.B. 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 : jmd@jmo.org.tr

AIM & SCOPE

Journal of Geological Engineering has the following purposes;

- To more effectively reflect the place and importance of the geological engineering profession in daily life. The field of geological engineering studies the interactions between humans and the earth, then shares this knowledge and experience to provide humanity with safer and healthier living conditions that also consider the environment.
- To share national and international developments in the field with geological engineers.
- To provide an easily accessible and active discussion platform that strengthens and accelerates the sharing of knowledge and experience among scientists, researchers, engineers and other practitioners who are directly or indirectly involved in this field.
- To contribute to the design of resilient environments and solve problems in line with the International Sustainable Development Goals, which include the effective management of natural resources, and the consideration of humans and nature, as well as geological hazards when engineering structures and carrying out spatial planning.
- To contribute to the development of interdisciplinary research and interoperability principles.

The **Journal of Geological Engineering** covers national and international research in applied geological engineering domains such as engineering geology, geotechnics, water resources management and hydrogeology, environmental geology and waste management, geothermal energy, drilling techniques and applications, natural hazards, natural disasters and disaster management. The journal also accepts interdisciplinary work that uses geoscientific data from fields including civil engineering, mining, geophysics, petroleum engineering, environmental engineering, city and regional planning.

We are interested in papers on the following topics:

- Suitable site selection for engineering structures and land use planning
- Geotechnical site investigations, drilling studies, in-situ and laboratory tests
- Geophysical methods used in geotechnical studies
- Geomechanical properties of rocks and soils
- Slope stability assessments and monitoring techniques
- Spatial planning studies resistant to dynamic geological processes that adversely affect humans and nature
- Geographic Information Systems and Remote Sensing applications in the field of geological engineering
- Natural hazard and risk assessments (earthquakes, liquefaction, landslides, sinkholes, medical geology, floods and avalanches, etc.)
- Natural disasters and disaster management studies
- Environmental geology, waste management and site selection studies

- Management of surface and underground water resources, hydrogeological problems and practical solutions
- Geological resources management practices, problems, solutions and economic evaluations
- The research and development of geothermal, mineral and mineral resources and subsurface geological modeling
- Pollutants and their effects on the ecosystem
- Natural building materials and ground improvement works
- Engineering geology in the protection of historical structures and geological monuments
- Drilling applications in resource exploration and production processes, developments in drilling technologies
- Research, development and project studies in the field of geological engineering in building production and inspection processes
- Geological Engineering education and development

Theoretical and applied studies related to the above topics are also published in the Journal of Geological Engineering.

We only accept previously unpublished work. Four types of paper are published in the Journal of Geological Engineering:

1- Research Articles: Articles in which an original study is presented. The theoretical basis should include sections in which findings and conclusions based on sufficient quantitative and qualitative data are evaluated in detail. The total length of the manuscript should not exceed 9000 words (15 JMD pages). Articles will be subject to review by at least two experts in the field.

2- Reviews: Articles prepared upon the invitation of the Editor or with their knowledge, examining the techniques, methods and approaches still used in any field of Geological Engineering in light of today's technological developments and the writer's own experiences. The article should also make and develop suggestions in this regard. The length of the article may vary depending on the subject. There is no obligation of editorial review.

3- Technical Notes: A technical note article presents a technique, instrumentation, exploration method, or an assessment method that is truly new compared to earlier publications. An evaluation or measurement method should specify how it was validated. A technical note should be no longer than 4000 words (6 JMD pages). Articles will be subjected to review by at least two members of the editorial board.

4- Erratum: A notice to correct errors in a published article that were mistakenly created by the authors or editorial board during the final editing of the article. JMD may be warned of errors by the authors or readers of the published article. If the authors have alerted the editorial board, an erratum is published as soon as possible. If a reader has alerted the editorial board, the author will be contacted to see if a typo report is appropriate. Readers can contact the Editor. If a Letter to the Editor has been received and a spelling correction is required, the authors of the original article

are requested to respond and write a correction to the published Letter to the Editor.

Ethical Principles and Publication Policy

1. Ethical Principles and Publication Policy

Journal of Geological Engineering (JMD) publishers and users (Editor and technical editor, authors, reviewers, readers, etc.) comply with the ethical rules and responsibilities determined by the Committee on Publication Ethics - COPE, <https://publicationethics.org/>.

Journal of Geological Engineering is a peer-reviewed journal. It publishes online in print and electronic media and has an open access system. Journal issues are published twice a year in January and June. In the publication processes, sharing of the information produced freely and impartially taking in account the scientific methods. Blind refereeing system is applied in the manuscript evaluation process. All issues of JMD published since 1977 are archived both in printed and electronic versions by the publishing company, TMMOB Chamber of Geological Engineers (JMO), and electronic versions by TUBITAK ULAKBİM- DergiPark.

1.1 Ethical Principles

Ethical Duties and Responsibilities of Editors

The editors of the Journal of Geological Engineering, the ethical task prepared by the Committee on Publication Ethics (COPE) within the scope of the guidelines published under the headings of “Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors” has responsibilities.

Editors are responsible for following the processes for the development of the journal and improving the quality of published studies.

The manuscript submitted to JMD is first reviewed by the Editors for compliance with the journal’s purpose and scope. If the submitted manuscript does not comply with the purpose and scope of the journal, it is rejected within 15 days at the latest and the author is informed. The manuscripts found appropriate according to the journal’s aims and scope, is examined in terms of writing rules, language and expression and planning of the study before the reviewer’s evaluation. Manuscripts with deficiencies in these subjects are requested to be corrected by the author.

When the editors examine all the section contents of the manuscripts and find it appropriate, the manuscripts are evaluated by the reviewer. However, manuscripts that are not suitable for reviewer evaluation for any reason are rejected together with the editor’s evaluation report. The author is informed within 15 days at the latest.

In peer review, manuscripts are sent by the editor to at least three reviewers, from the journal’s reviewer pool and/or outside the pool, according to their content and areas of expertise. In the determination of the manuscript reviewers, attention is paid to the issues of conflict of interest.

In line with the opinions of the reviewers, if the corrected copy of the manuscripts requested to be corrected is not sent back to the

editor within 30 days by the authors without a valid reason, the editor has the right to reject the manuscript. After the re-editing, if necessary, the corrected manuscript is sent to the reviewers or directly accepted or rejected by the editor.

As a result of the evaluation, the opinions of the reviewers are reviewed by the editor within 15 days at the latest. As a result of the review, the editor gives his final decision on the manuscript and conveys it to the author. Rejected manuscripts are archived.

Editors are responsible to take precautions against possible abuse and misconduct. It is among the editor’s responsibilities to share the relevant findings, as well as to conduct a rigorous and objective investigation regarding the determination and evaluation of the complaints regarding this situation. In cases of suspected fraud or controversial authorship, necessary steps are followed by considering the COPE flowcharts (<https://publicationethics.org/resources/translated-resources/turkish-all-flowcharts>).

Editors; The author is obliged to carefully examine the complaints from the reviewers or readers and respond in an enlightening and explanatory manner.

The journal owner, publisher and no other political or commercial factors affect the editors’ independent decision making.

Editors; considers the conflicts of interest between the author(s), reviewers and other editors, and ensures that the publication process of the studies is completed independently and impartially.

Ethical Duties and Responsibilities of Reviewers

Reviewers in the Journal of Geological Engineering have ethical duties and responsibilities within the scope of the guidelines published under the title of “COPE-Ethical Guidelines for Peer Reviewers” by the Committee on Publication Ethics (COPE).

- Blind peer-review system is applied in order to ensure objective evaluation of all scientific publications at JMD. At the stage of assigning a reviewer to the manuscript, care is taken to ensure that there is no conflict of interest between the reviewer and the author(s). For this purpose, between the reviewer and the author(s), in particular;
 - o No thesis advisor/student relationship,
 - o No joint research or publication in the recent past (last 2 years) between the author(s) and the reviewer,
 - o Not working in the same institution,
 - o Not contributing to the manuscript submitted to the journal in terms of format or content,
 - o There are no disputes between the author(s) and the reviewer, which are submitted to the judiciary or ethical committees,
 - o There is no kinship relationship between the reviewer and the author(s),
 - o The reviewer has no prejudices about the author(s) that have been disclosed to the public,
 - o The absence of any commercial relationship between the reviewer and the author(s),

situations are considered. The reviewers warn the editor and give the necessary information in case of the above-mentioned situations that are overlooked by the journal editor.

Moreover;

- Reviewers only evaluate manuscripts that fall within their area of expertise.
- Reviewer are obliged to make their evaluations impartially, objectively and confidentially.
- Nationality, gender, religious belief, political opinion, commercial concerns, etc. they should not lose their impartiality for any reason.
- They should make their opinions and suggestions within academic etiquette, in a constructive and academic language, and avoid a style that will create personal polemics.
- They should not delay their evaluation in such a way as to prolong the publication process for no reason. The time given to the reviewers for the review processes is 30 days. The authors must complete the correction suggestions from the reviewers or the editor within 30 days. Reviewers can review their corrections for the manuscript and decide whether it is appropriate or request more than one correction if necessary.

Ethical Duties and Responsibilities of Authors

The publication processes implemented at JMD are the basis for the development and distribution of information in an impartial and respectful manner. The processes implemented in this direction are directly reflected in the quality of the authors' work and the institutions that support the authors. Peer-reviewed studies are studies that embody and support the scientific method. At this point, it is important that all stakeholders of the process (authors, readers and researchers, publisher, reviewers and editors) comply with the Principles of the Publication Ethics Committee-COPE.

The author(s) who will send a manuscript to JMD for evaluation must first become a member of DergiPark . Corresponding authors should submit their work (original article, review, etc.) to JMD through the DergiPark system.

The author responsible for the manuscript must upload the signed "Copyright Transfer Form" and "Ethics Notification Form" to the DergiPark system, in addition to the similarity report, by using the " iThenticate Plagiarism Detection Software" or " Turnitin " or an equivalent plagiarism program to submit a new manuscript to the journal. The similarity index rate of the submitted manuscript should be below 20%, excluding the reference list.

Authors cannot have their work in the application process of more than one journal at the same time. Each application can be started following the completion of the previous application. Work published in another journal cannot be submitted to JMD.

The corresponding author must ensure that this submitted manuscript has not been published in a similar form elsewhere and that the manuscript is original and will not be sent elsewhere for publication.

The works submitted by the author(s) are expected to be original. If the author(s) benefit from or use other works, they are required to cite and/or cite completely and accurately.

Raw data regarding their manuscripts can be requested from the author(s) within the framework of the evaluation processes; In such a case, the author(s) should be ready to present the expected data and information to the editorial board.

The author(s) must have a document showing that they have the right to use the data used and the necessary permissions for the research/analysis.

Each author is considered to have an equal ethical responsibility, as each of the authors must have made a significant scientific contribution to the manuscript. In the event that the author(s) notices an error or error in their published, pre-published or evaluation phase, they have an obligation to cooperate with the editor in informing, correcting or withdrawing the journal editor or publisher.

Author(s) who want to withdraw their manuscript under evaluation should forward the petition with a wet signature containing the subject to the editorial board via the journal's e-mail address jmd@jmo.org.tr. The Editorial Board reviews the withdrawal petition and responds within 15 days. The author(s) of a manuscript whose petition is not approved by the Editorial Board cannot send their manuscript to another journal.

All studies submitted for publication should be disclosed, if any, and their relationships that may constitute a conflict of interest.

Changing the author responsibilities of a work whose evaluation process has begun (such as adding an author, changing the order of authors, or removing an author) cannot be proposed.

In the evaluation process, the authors are obliged to respond to the opinions, suggestions and criticisms of the editors and reviewers. The authors are obliged to answer the questions asked by considering the opinions of the reviewers, to evaluate the opinions and suggestions, to respond positively or negatively to the criticisms and to report their evidence to the editor in a detailed letter. Academic style should be used in this counter letter, and personal discussions should be avoided.

1. 2 Publication Policy

JMO and/or JMD obtain written consent from the authors for the copyright of the manuscripts to be published. The related author is the author/owner of the manuscript submitted to the journal and transfers the copyright to JMO and/or JMD on behalf of himself and other author(s). It is obligatory to fill in the Copyright Transfer Form and upload it to the journal system during the submission of the manuscript.

All authors of the submitted manuscript must sign and transfer all rights and copyrights of the manuscript to JMO and/or JMD. JMO and/or JMD have the right to use all or part of the relevant manuscript in their future works such as lectures/lecture notes, reports and textbooks/printed books without any payment and the right to obtain a copy of the relevant manuscript for their own

use. JMO and/or JMD; reserves all its rights other than copyright, such as patent rights, for commercial purposes.

All personal information in the JMD system is used for scientific purposes and is not shared with third parties.

Editor, Technical Editor and Editorial Board members are not responsible for the opinions of the authors and the content of the manuscript. Authors are responsible for ethical originality and possible errors in their manuscripts. Authors are responsible for all errors that may occur before the last reading (revision reading) and during page editing. Errors that occur after the last reading are the responsibility of the journal authorities.

Author Guidelines

Both Turkish and English manuscripts are accepted by the Journal of Geological Engineering. According to the language chosen in the article; following the title, abstract, figure, and table captions, the equivalents in other languages should also be written. Editors provide the necessary assistance in translating the Title, Abstract, Figure, and Table captions into Turkish for the manuscripts prepared in English by the foreign author(s) (in case they cannot get the relevant Turkish language assistance before their submission). Authors whose native language is not English are strongly advised to seek support from a native English speaker in terms of grammar and style of the manuscript before submission.

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract, a published lecture, or an academic thesis) and that it is not under consideration for publication elsewhere.

Please click to [download](#) the MS Office Word template prepared according to the journal's manuscript writing format. Please check the relevant section in this Author's Guidelines for more details.

Manuscripts sent to the journal for publication should be prepared by considering the Ethical Principles and Publication Policy.

DergiPark online submission system for the Journal of Geological Engineering guides you stepwise through the process of entering your article details, and uploading your manuscript file together with Ethics Statement and Copyright Transfer forms. For this, you must first sign in to the DergiPark system.

Please submit your manuscript via <https://dergipark.org.tr/en/journal/1669/submission/step/manuscript/new>

Manuscripts should generally be structured as follows:

- (a) Title (English and Turkish)
- (b) Author Name(s) SURNAME(S) (bold), their affiliations (italic and lowercase), and the name and e-mail address of the corresponding author.
- (c) Abstract (English and Turkish)
- (d) Keywords (English and Turkish)

- (e) Introduction (aim, content, and methodology)
- (f) Main text (methods, material studied, descriptions, analyses, etc.)
- (g) Results and Discussion or Conclusions and Recommendations
- (i) Acknowledgements (if necessary)
- (j) References

The various levels of headings used in the manuscript should be clearly differentiated. All headings should be left-aligned. Major headings should be in bold capitals. Secondary headings should be considered sub-headings. Primary- and secondary subheadings should be given in lower-case and tertiary headings in italics. Headings should not be preceded by numerals or letters. Manuscripts (abstract, main text, acknowledgments, references, appendices and figure captions) should be typed on A4 page size (29.7 cm x 21 cm) with wide margins (at least 2.5 cm) and 1.5 line-spaced throughout, at a font size of 12 points (Times New Roman) and with all pages numbered.

Examples of headings:

ABSTRACT

INTRODUCTION

PRIMARY HEADING

Primary Sub-Heading

Secondary sub-heading

Tertiary sub-heading

CONCLUSIONS & DISCUSSION

ACKNOWLEDGEMENTS

REFERENCES

Title and Authors

The title of the manuscript should be concise and informative. If the paper is written in Turkish, the Turkish title (in boldface type and the first letter of the words capitalized) should be followed by the English title (italic and first letter of the words capitalized). If the paper is in English, the English title should appear before the Turkish title in the style mentioned above.

ORCID stands for Open Researcher and Contributor ID. ORCID is a 16-digit numbered URL that complies with the ISO Standard (ISO 27729), also known as the International Standard Name Identifier (ISNI). Please create free registration for individual ORCID at <http://orcid.org> ORCID information is requested from the authors during submission.

The information related to the authors should be given as follow:

Tolga ÇAN

Çukurova University, Engineering Faculty, Geological Engineering Department, 01250 Adana Türkiye

e-mail: tolgacan@cu.edu.tr

ORCID Number: 0000-0001-9940-2832

ABSTRACT

The abstract not exceeding 300 words should be informative (the aim of the study and main conclusive remarks). It should not contain references. The Abstract should be given in both Turkish and English. If the paper is written in Turkish, an English abstract (in italics) should follow the Turkish abstract, while a Turkish abstract (in italics) should appear after the English abstract in papers written in English.

Keywords

The abstract should include a minimum of 3, and not more than 6 keywords that reflect the entries the authors would like to see in an index. Keywords should be given in both Turkish and English. Keywords should be written in lower-case letters, separated by commas, and given in alphabetical order. No need to give keywords for Technical Note-type articles.

ACKNOWLEDGEMENTS

Acknowledgments should be brief and confined to persons and organizations that have made significant contributions. Please use full names without titles and indicate the name(s) of the organization(s) of the person(s) acknowledged.

Acknowledgments of grants, funds, etc. should be placed as a separate paragraph under this heading. The names of funding organizations should be written in full.

List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proofreading the article, etc.).

CITATIONS and REFERENCES

Citation in the text

A. If the article has one author

Parenthetical citations: (Author, Year) e.g.: (Sönmez, 1996)

Narrative citations: Author (Year) e.g.: Sönmez (1996)

B. If the article has two authors

Parenthetical citations: (Author1 & Author2, Year) e.g.: (Merriman & Frey, 1999)

Narrative citations: Author1 and Author2 (Year) e.g.: Merriman and Frey (1999)

C. If the article has more than two authors

Parenthetical citations: (Author1 et al., Year) e.g.: (Pettijohn et al., 1987)

Narrative citations: Author1 et al. (Year) e.g.: Pettijohn et al., (1987)

D. Citing Multiple Works

Parenthetical citations: (Merriman & Frey, 1999; Pettijohn et al., 1987; Sönmez, 1996)

Narrative citations: Merriman and Frey (1999), Pettijohn et al. (1987), Sönmez (1996)

E. If more than one publication of the same authors published in the same year is cited

In this case, letters such as a, b, and c are given after the years of the articles in the References section. In the same way, these letters are used in the citations in the text.

In References:

Ahmetoğlu, A. & Hüsnuoğlu, H. (2022a). Article 1. Full Name of Journal, Vol. (No), pages. DOI number (if available)

Ahmetoğlu, A. & Hüsnuoğlu, H. (2022b). Article 2. Full Name of Journal, Vol. (No), pages. DOI number (if available)

Citations in the text:

Parenthetical citations: (Ahmetoğlu & Hüsnuoğlu, 2022a)

Narrative citations: Ahmetoğlu & Hüsnuoğlu (2022a)

References

All references cited in the text, and in captions of figures and tables should be presented in a list of references under the heading of "REFERENCES" following the text of the manuscript.

A. Journals

A.1. Citing the periodicals:

Author(s), (Date). Title of paper. Full Name of Journal, Vol. (No), pages. DOI number (if available)

Hoek, E. & David, M. (1990). Estimating Mohr–Coulomb friction and cohesion values from Hoek – Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics*, 27(3), 220-229. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)94333-O](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)94333-O)

A.2. Special cases:

A.2.1. If the article was taken from an open (free) access website:

Ketin, İ. (1949). Son on yılda Türkiye'de vukua gelen büyük depremlerin tektonik ve mekanik neticeleri hakkında. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 2(1), 1-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjb/issue/50279/650044>

A.2.2. If the article has an article number:

Açlan, M., Oyan, V. & Köse, O. (2020). Petrogenesis and the evolution of Pliocene Timar basalts in the east of Lake Van, Eastern Anatolia, Turkey: A consequence of the partial melting of a metasomatized spinel-rich lithospheric mantle source. *Journal of African Earth Sciences*, 168, Article 103844. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103844>.

B. Proceedings and Abstracts:

Author(s), (Date). Title of paper. Name of Editor(s), Title of Symposium or Congress, (pages). Name of Publisher. DOI number & internet address (If available).

Şanlıyüksel Yücel, D., İleri, B. (2019). Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses. In H. Sözbilir, Ç. Özkaymak, B. Uzel, Ö. Sümer, M. Softa, Ç. Tepe, S. Eski (Eds.), 72nd Geological Congress of Turkey The Proceedings and Abstracts Book, (s.63-64). Chamber of Geological Engineers of Turkey Publications No: 140. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/174e0f6fa731893_ek.pdf

C. Books:

C.1. Citing of books:

Author(s), (Date). Name of the Book. Name of the Publisher. DOI number & internet address (if available).

Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. (1987). Sand and Sandstones (2nd ed.). Springer-Verlag New York. <https://www.doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>

Ketin, İ. (2016). Genel Jeoloji, Yerbilimlerine Giriş (9. Baskı). İTÜ Vakfı Yayınları.

C.2. Citing of translated books:

Author(s), (Date). Name of the Translated Book. Name of the Publisher. (Original publishing date). DOI number & internet address (If available).

Komatina, M. M. (2011). Tıbbi Jeoloji: Jeolojik Ortamların İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri (Translator: Y. Örgün ve D. Bayrak). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (Original publication date: 2001).

D. Chapter in a book:

Author(s), (Date). Chapter Name. Name of Editors, Name of Book (Page numbers of the chapter). Name of Publisher.

Merriman, R. J. & Frey, M. (1999). Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In M. Frey & D. Robinson (Eds.), Low-Grade Metamorphism, (pp. 61-107). Blackwell Sciences Ltd.

E. Reports and Thesis:

E.1. Reports:

Author(s), (Date). Title of report (If any report no). Name of the Organization or Institution, (published or unpublished).

Kellogg, H. E. (1960). Stratigraphic report, Derik-Mardin area Petroleum District V, Southeast Turkey (Rapor no: 1367). TPAO (unpublished).

E.2. Thesis:

Author, (Date). Title of Thesis [published or unpublished & Ph.D. or MSc Thesis]. Name of the Institution or University.

Sönmez, H. (1996). TKİ ELİ Soma Linyitleri açık işletmelerinde eklemli kaya kütlesi içindeki şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi [Unpublished Msc Thesis]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

F. Personal Communications:

Sözbilir, H., 2005. Personal communication. Geological Engineering Department of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey.

G. Information Downloaded from the Internet

Name of the Organization, (Date). The web address, and date of access to the website.

KRDAE, (2020, 02, January). Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center, <http://www.gov.tr>.

Turkish references can also be given directly in Turkish. For such references please use Turkish characters.

Equations

Please submit mathematical symbols and formulae as editable text and not as images. Use the equation editor or MathType for equations. Equation numbers should appear in parentheses at the right-hand side of the equations and be numbered consecutively. For Greek or other non-Roman letters, identify the symbol in words in the left-hand margin just below the equation the first time it is used. In addition, the meaning of symbols used in equations should be given below the equations. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of “e” should be denoted by “(exp)”. Subscripts and superscripts should be given clearly and written in smaller characters (e.g. I_d , x_2). Instead of a square-root symbol, indices of 0.5 should be used (i.e., $\sigma_{cmass} = \sigma_{c0.5}$). For the multiplication sign do not use any symbol, however, if necessary, the symbol “*” can be preferred (i.e., $y = 5 * 10^{-3}$). Please use “/” for division instead of a horizontal line between the numerator and denominator. In the expression of chemical reactions, ions should be given as Ca^{2+} and CO_3^{2-} instead of Ca^{++} and CO_3^{--} . In the text, equations should be referred to as equations (1, 2, etc.).

TABLE and FIGURES

Tables and figures should be embedded in the text, with their captions. For tables and figures, use Times New Roman, font size 10. Under the Paragraph tab, ensure that the indentation is as follows; before and after 0 nk and spacing single. Tables and figures should be left aligned, and the text wrapping feature should be turned off. Tables and figures should be arranged to fit in a single (7.5 cm-width) or double (16 cm-width) column of the Journal.

Tables

Tables with their captions should not exceed the printed area of the page (16 x 22 cm) and be numbered consecutively. Both Turkish and English captions should appear at the top of a table (do not print table captions on a separate sheet). If the manuscript is written in Turkish, the English title in italics should follow the Turkish title. For manuscripts in English, a Turkish title should

appear below the English title in italics. They should begin with “Table 1.” etc. Tables should be referred to as Table 1 or Tables 1 and 2 (if more than one table is referred to). Tables can be written in a font size smaller than that of the text (9 or 10 points). Tables should be arranged to fit a single column (7.5 cm wide) or a double column (16 cm wide). No vertical rules should be used. Horizontal rules should only be used at the top and bottom of the tables, and to separate headings and numbers listed in the tables (Please check the previous issues of the Journal). Tables should not duplicate results presented elsewhere in the manuscript (e.g. in graphs). Place any table notes below the table body.

Figures

All figures such as drawings, graphics, and photographs should be given in high-quality printed form under the title of “Figure” and numbered in the order in which they are mentioned in the text. The rules suggested below should be taken into account in drawing, graphic and photographic formats.

Regardless of the application used, when your electronic artwork is finalized, please ‘save as’ or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS (or PDF): Vector drawings. Embed the font or save the text as ‘graphics’.

TIFF (or JPG): Color or grayscale photographs (halftones): always use a minimum of 300 dpi. TIFF (or JPG): Bitmapped line drawings: use a minimum of 1000 dpi.

TIFF (or JPG): Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale): a minimum of 500 dpi is required.

Figure captions should be written under the figures, and figure captions should be prepared in both Turkish and English, similar to the format stated above for tables. The largest size for figures should be 16 cm (width) x 22 cm (length), including the figure title. In particular, maps, drawings, and photographs related to the area should not be used with a numerical scale (1:25000, etc.), and should be given in a linear scale suitable for the metric system. A north arrow should be shown on maps. Regional maps may include National Grid or latitude/longitude numbers where appropriate. Map legend should be given on the figure, not in the figure caption. Photographs, line drawings, or combinations may be grouped as figure parts (a), (b), etc. It is preferred that these are mounted.



İçindekiler / Contents

Makaleler / Articles

- 95- Araştırma Makalesi / Research Article
İsmail DİNÇER, Mutluhan AKIN, Ahmet ORHAN, Emre BECERİR, Mehmet Yasin CANBOLAT
Kültürel ve Tarihi Miras Alanlarındaki Kaya Oyma Yapılarda Mühendislik Jeolojisi Çalışmaları:
Kayaşehir Yüzey Yerleşkesi (Nevşehir) Örneği
Engineering Geological Studies of Rock Hewn Structures in Cultural and Historical Heritage Sites: A Case Study of Kayaşehir Surface Settlement (Nevşehir)
- 123- Araştırma Makalesi / Research Article
Nil VURAL, Murat YILMAZ, Burcu ONAT, Atiye TUĞRUL, Burcu UZUN AYVAZ
Agrega Madencilğinde Çevresel Etkilerin Yaşam Döngüsü Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi:
Cebeci Agregası Ocakları Örneği
Assessment of Environmental Impacts in Aggregate Mining With Life Cycle Approach; An Example of Cebeci Aggregate Quarries
- 139- Araştırma Makalesi / Research Article
Eroltan DURMUŞ, Özkan CORUK, Ahmet KARAKAŞ
Kaya Düşmesi Risklerinin Kentlerin Planlanmasına Etkileri: Çoruh Havzası Örneği
Effects of Rockfall Risks on Urban Planning: The Coruh Basin Case
- 161- Araştırma Makalesi / Research Article
Mehmet Ali AKGÜL
EnMAP Hiperspektral Uydusunun Batimetri Kabiliyeti
Bathymetry Capability of EnMAP Hyperspectral Satellite
- 179- Araştırma Makalesi / Research Article
Murat KARAHAN, Muhammet Oğuz SÜNNETCİ, Hakan ERSOY, Ali İPEK
3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri ile Birleşik Kaya Islah Uygulamalarının Değerlendirilmesi:
Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Örneği
Evaluation of Combined Rock Remediation Applications with 3D Rockfall Analyzes: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Case
- 203- Derleme / Review
Yusuf Ziya ÖZKAN
Maden Kaynak Belirleme Sondaj Programlarının Optimizasyonu
Optimization of Mineral Resource Definition Drilling Programs