



Kayalarda Mikro Çatlaklanma Sürecine Bağlı Deformasyon Evriminin Sayısal Analizi

Numerical Analysis of Rock Deformation Evolution Regarding Microcracking Process

ÖZGE DİNÇ GÖĞÜŞ^{1*}, ELİF AVŞAR², KAYHAN DEVELİ¹, AYTEN ÇALIK³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Konya Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Geliş (received): 24 Kasım (November) 2022 Kabul (accepted): 13 Şubat (February) 2023

ÖZ

Gerilmeye maruz kalan bir kayanın yenilme ve deformasyon karakteri mikro ölçekteki çatlaklanma sürecine bağlıdır. Bu sürecin nasıl evrildiğinin anlaşılması konusunda farklı laboratuvar ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada söz konusu yöntemlere bir alternatif olarak mikro çatlaklanma sürecinin sayısal modelleme tekniği ile tespit edilebilirliği araştırılmıştır. İgnimbirit, mermer ve diyabaz olmak üzere üç farklı kaya türü üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen makro mekanik parametreler, ayrık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı sayısal kaya modellerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde model tahminleri ile laboratuvar verilerinin uyumlu olduğu belirlenmiş ve bu durum sayısal çatlaklanma analizlerinin kaya ortamını temsil edecek şekilde yürütülebileceğini göstermiştir. Laboratuvar deneylerinin simülasyonlarında, sıkışma gerilmesi altındaki model örneklerde mikro çatlaklanmanın başladığı (σ_{ci}) ve ilerleyerek biriktiği (σ_{cd}) kritik eşik gerilme seviyeleri tespit edilmiştir. Bu gerilme seviyeleri sırasıyla ignimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyabaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olarak belirlenmiştir. Tüm kaya modellerinde mikro çatlaklanma çekme mekanizması tarafından kontrol edilirken her üç kaya türü de gevrek bir davranış sergilemektedir. Elde edilen tüm veriler, kayalardaki mikro çatlaklanma sürecinin araştırılmasında DEM tabanlı sayısal modelleme tekniğinin diğer yöntemlere alternatif olarak güvenli bir şekilde kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Deformasyonu, Kritik Gerilme Eşik Değeri, Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), Mikro Çatlaklanma

ABSTRACT

The failure and deformation characteristics of rock under stress are controlled by microcracking process. There are various laboratory and analytical methods for understanding the evolution of this phenomenon. In this study, the applicability of the numerical modeling technique for detecting the microcracking process is investigated as an alternative method among the other techniques. Macro mechanical parameters derived from the laboratory tests, performed on three different rock types such as ignimbrite, marble, and diabase are used in the calibration of the numerical rock models which are generated based on the discrete element

method (DEM). According to the results, model predictions and laboratory measurements are in good agreement that verifying cracking analysis can be performed as being representative of the rock domain in the numerical platform. During the simulations of laboratory tests, the initiation (σ_{ci}) and propagation (σ_{cd}) stress thresholds of microcracking are determined in the model samples under compressive loading. These stress levels are $\sigma_{ci} = 25$ MPa and $\sigma_{cd} = 37$ MPa for ignimbrite, $\sigma_{ci} = 21$ MPa and $\sigma_{cd} = 30$ MPa for marble, and $\sigma_{ci} = 38$ MPa and $\sigma_{cd} = 55$ MPa for diabase, respectively. Microcracking in all rock models is controlled by extensional mechanisms, and all rock types present brittle behavior. Overall, our insights show that the numerical modeling technique based on DEM can be used reliably as an alternative methodology to the other techniques for the investigation of the microcracking process in rocks.

Keywords: Rock Deformation, Critical Stress Threshold, Discrete Element Method (DEM), Microcracking

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1209614>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: dincgogus@itu.edu.tr

GİRİŞ

Kayalar gerilmeye maruz kaldıklarında deformasyona uğramakta ve yüklemeler devam ettikçe bu deformasyonun miktarı zamanla artmaktadır. Bu sürecin evrimi ise öncelikle kayanın iç yapısında oluşan mikro çatlaklarla başlamaktadır (Dyskin and Germanovich, 1993; Holcomb vd., 2007; Nicksiar ve Martin, 2012). Gerilmeyle tetiklenen çatlakların zamanla büyümesi, ilerlemesi veya kayanın içinde belirli kısımlarda birikmesi, o kayanın nihayetinde yenilmesiyle ve dolayısıyla makro ölçekte kırıkların oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Mikro çatlaklanma sürecinin araştırılması, ilk olarak Griffith (1921) ile başlamış ve ilerleyen yıllarda çok sayıda çalışmaya konu olmuştur (örn. Brace, 1964; Bieniawski, 1967; Peng ve Johnson, 1972; Germanovich vd., 1994; Martin ve Chandler, 1994; Eberhardt vd., 1998; Diederichs, 2007; Nicksiar ve Martin, 2012; Moradian vd., 2015; Yang vd., 2019; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022). Araştırmacılar söz konusu sürecin bir kayanın yenilme ve deformasyon karakteri üzerinde önemli bir rol oynadığını belirterek mühendislik operasyonlarının etkili bir şekilde yürütülmesi için kapsamlı bulgular sunmuşlardır.

Bilindiği gibi kayalardaki çatlaklanmanın yüklemenin hangi aşamasında başladığı ve kritik yoğunluğa ulaştığının belirlenmesi için laboratuvarında akustik emisyon (AE) ölçümleri yapılmaktadır (Lockner vd., 1991; Lei vd., 2000; Zang vd., 2000; Baud vd., 2004; Lei, 2006; Zhao vd., 2013; Cheng vd., 2021). Ancak bu yöntem yüksek dayanımlı kayalarda çok fazla gürültü oluşturduğundan veya özellikle heterojen kayalarda düşük çözünürlükten dolayı doğru gerilme seviyelerinin belirlenmesinde kısıtlamalar yaratmaktadır (Locker vd., 1991; Schubnel vd., 2007). Bu nedenle giderek yaygınlaşan X-Ray tomografi ve dijital görüntü korelasyonu tekniğinin laboratuvar deneylerine entegre edilmesi söz konusu kısıtlamaların önemli ölçüde giderilmesini sağlamıştır. Yüksek çözünürlük özelliği artan eksenel gerilmeyle çatlaklanmanın ilerleyişinin detaylı olarak izlenebilmesine olanak tanımıştır (Besuelle vd., 2000; Louis vd., 2007; Zhang vd., 2013; Desrues ve Andò, 2015; Ji vd., 2015; Renard vd., 2017; Zhu vd., 2018; Shirole vd., 2020). Diğer taraftan bu tekniğin laboratuvarlarda kolaylıkla ve uygun maliyetle tedarik edilmesi ise çoğu zaman mümkün olmamaktadır.

Son yıllarda literatürde yaygın olarak yer bulan ve laboratuvar deneylerini destekleyici veya kimi zaman bu deneylere alternatif olarak kullanılan sayısal modelleme yöntemleri mikro çatlaklanmayla ilgili araştırmaların yürütülmesinde kullanılmaktadır. Kayaların süreksiz bir ortam olması sebebiyle bu yöntemlerden ayrık elemanlar metoduna (DEM) dayalı modelleme teknikleri sıklıkla çalışılmakta, çatlaklanmaya bağlı deformasyon/hasar miktarının ölçülmesinde ayrıntılı veriler sunmaktadır. Özellikle sıkışma rejimi altında bir kayanın yenilme öncesindeki birim deformasyon birikmesinin yenilme sonrasında açığa çıkan makaslama bantlarına (kırıklara) dönüştüğü sürecin izlenebilmesi, kayaların yenilme ve hasar süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına da ışık tutmaktadır (Wang vd., 2008; Shimizu vd., 2010; Dinç ve Scholtès, 2018; Wu vd., 2018; Zhang vd., 2019; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022).

Bu çalışmanın amacı farklı kaya türlerinde gerilme-deformasyon davranışları incelenerek, mikro çatlaklanmanın kaya içinde ilk kez oluşmaya başladığı (σ_{ci}) ve ilerleyerek biriktiği (σ_{cd}) kritik gerilme seviyelerinin DEM sayısal yöntemiyle belirlenmesidir. Bu amaçla üç farklı kaya türünün makro mekanik parametreleri laboratuvar deneyleriyle belirlenmiştir. Bu parametreler daha sonra üç boyutlu (3D) Yade açık kaynaklı DEM kodu (Šmilauer vd., 2015) kullanılarak oluşturulmuş sayısal modellerin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Model verileri laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılmış ve her kaya türü için çatlaklanma eşik gerilme seviyeleri (σ_{ci} ve σ_{cd}) sayısal çözümlerle belirlenmiştir. Üç kaya türünün de dayanım, deformasyon özellikleri ve yenilme mekanizmaları tespit edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında kırık/çatlak içermeyen ve olabildiğince homojen bir iç yapıya sahip

diyabaz (Kayseri), mermer (Mudurnu) ve ignimbirit (Afyon) olmak üzere üç farklı kaya türü kullanılmıştır. Örneklerin öncelikle laboratuvarda jeomekanik özellikleri belirlenmiş ve belirlenen bu parametreler kullanılarak sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Aşağıda kullanılan yöntemler ve elde edilen bulgular alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

Laboratuvar Çalışmaları

Kübik bloklar halinde temin edilen üç kaya türünden ASTM (2000) standartlarına ($2 \leq L/D \leq 2.5$, L: boy ve D: çap) göre karot ve ISRM (2007) standartlarına uygun olarak (t/D : 0.5-1.0, t: kalınlık ve D: çap) disk şeklinde örnekler hazırlanmıştır (Şekil 1). Hazırlanan örnekler kaya mekaniği laboratuvarında tek ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleri ve Brazilian dolaylı çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Bilindiği gibi Brazilian deneylerinden elde edilen dolaylı çekme dayanımı değerleri kayaların gerçek (doğrudan) çekme dayanımından (UTS) daha yüksek çıksa da (Gorski et al. 2007; Perras and Diederichs 2014; Briševac et al. 2015; Jensen 2016), örnek hazırlamadaki pratikliği ve sınır koşullarıyla ilgili sorunların kolaylıkla çözümlenebilmesi açısından laboratuvarlarda çoğunlukla bu tür dolaylı çekme dayanımı yöntemleri kullanılmaktadır. Çünkü doğrudan çekme dayanımı deneyinde, iki ucundan metal çenelere bağlı olan kayada, çekme gerilmesiyle tetiklenen bir çatlak oluşturmak hem zaman alıcı olup hem de çenelerle kayanın bağlantı kısımlarında oluşan yenilmelerin minimize edilmesi son derece zordur. Ancak DEM sayısal modelleme platformlarında her türlü laboratuvar koşulunun simülasyonunun gerçekleştirilmesinden ötürü, model kalibrasyonlarında UTS değeri doğrudan çekme dayanımı deneyinin simülasyonundan belirlenmiş ve sayısal modellerin tamamı

Brazilian deneyinden elde edilen dayanım değeri, UTS değerine eşit olacak şekilde kalibre edilmiştir. Simülasyonların ayrıntıları "Model Kalibrasyonu" başlığı altında verilmektedir. Yukarıda bahsi geçen tüm laboratuvar deneylerinden her kaya türüne ait 4 temel mekanik parametre olan tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), çekme dayanımı (UTS), Young (Elastisite) Modülü (E) ve Poisson oranı (ν) belirlenmiş ve kayaların yenilme zarfları elde edilmiştir.



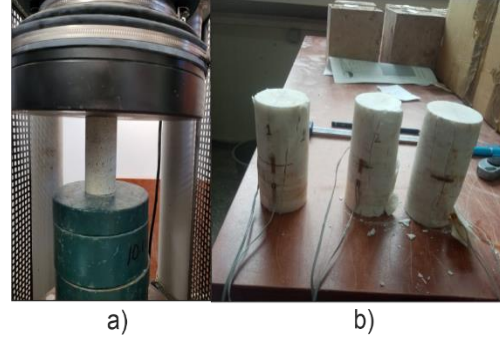
Şekil 1. Blok kayalar ve bunlardan hazırlanan karot ve disk şeklindeki örnekler (a) mermer (b) diyabaz (c) ignimbirit.

Figure 1. Block samples and core and disk shape specimens extracted from these blocks (a) marble (b) diorite (c) ignimbrite.

Kayaların UCS ve E parametrelerinin belirlenmesi için diyabaz ve mermerden 12'şer, ignimbiritlerden 11 adet karot örneği 100 ton yükleme kapasiteli ve deformasyon kontrollü hidrolik preste deneye tabi tutulmuştur (Şekil 2a). Poisson oranını belirlemek için her bir kaya türünden 3'er adet ayrıca karot ayrılmış ve toplam 9 set sıkışma dayanımı deneyi bu parametre için özel olarak uygulanmıştır (Şekil 2b).

Ön analiz testlerindeki sonuçlara bağlı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde, diyabaz 0.005 mm/s, ignimbirit 0.004 mm/s ve mermer örnekleri ise 0.003 mm/s' lik deformasyon hızlarında yüklenmiştir. 1D9,

1D12; 1I3, 1I11; 1M11 nolu örneklerde ise hatalı veri elde edildiği görüldüğünden değerlendirmeye alınmamıştır (Tablo 1).



Şekil 2. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri (a) yükleme presine yerleştirilmiş kaya örneği ve (b) Poisson oranlarının (ν) belirlenmesinde kullanılan ve örnek yüzeylerine yapıştırılmış bulunan yanıl ve düşey deformasyon ölçerlerden görünüm.

Figure 2. Uniaxial compressive strength tests (a) rock sample under loading frame (b) views from the strain gauges attached to sample surfaces along the lateral and vertical axes for determining the Poisson's ratio (ν).

Deney sonuçlarına göre diyabaz, ignimbirit ve mermer örneklerinin mekanik özellikleri $UCS_{diyabaz} = 72.57$ MPa, $E_{diyabaz} = 10.88$ GPa, $\nu_{diyabaz} = 0.25$; $UCS_{ignimbirit} = 54.41$ MPa, $E_{ignimbirit} = 7.23$ GPa, $\nu_{ignimbirit} = 0.15$; $UCS_{mermer} = 41.46$ MPa, $E_{mermer} = 8.32$ GPa, $\nu_{mermer} = 0.14$ olarak belirlenmiş ve ayrıntılar Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Her örneğe ait gerilme-deformasyon eğrisi ise Şekil 3'de verilmiş olup, E parametresi bu eğrilerin doğrusal elastik davranış gösterdiği kısımlar ve doruk dayanım değerlerine (UCS) göre teğetsel modül dikkate alınarak hesaplanmıştır (Şekil 4).

Tablo 1. Tek eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen her kaya türüne ait UCS ve E parametreleri.**Table 1.** UCS and E values obtained from the uniaxial compressive strength tests on each rock type.

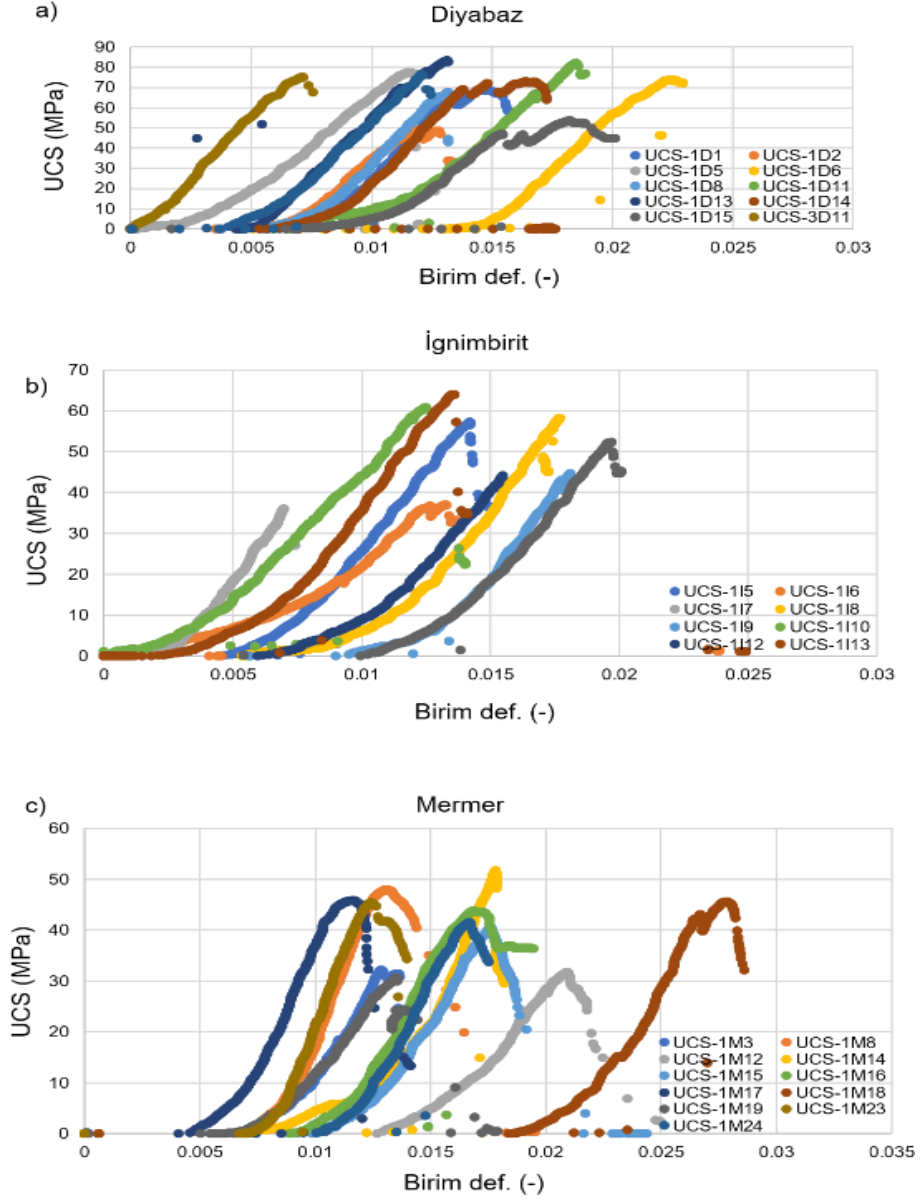
| | No | UCS | E | No | UCS | E | No | UCS | E |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 1 | 1D1 | 69.12 | 12.5 | 115 | 57.18 | 7.5 | 1M3 | 32.09 | 6.7 |
| 2 | 1D2 | 48.65 | 10.5 | 116 | 36.92 | 4.2 | 1M8 | 47.94 | 10.0 |
| 3 | 1D5 | 77.11 | 8.0 | 117 | 36.03 | 8.7 | 1M12 | 31.70 | 5.0 |
| 4 | 1D6 | 73.95 | 12.0 | 118 | 58.09 | 7.5 | 1M14 | 51.29 | 10.8 |
| 5 | 1D8 | 67.63 | 11.7 | 119 | 44.77 | 8.9 | 1M15 | 40.46 | 7.0 |
| 6 | 1D11 | 82.09 | 10.0 | 1110 | 60.35 | 6.7 | 1M16 | 43.78 | 7.5 |
| 7 | 1D13 | 82.65 | 11.0 | 1112 | 44.11 | 6.0 | 1M17 | 45.79 | 9.0 |
| 8 | 1D14 | 73.00 | 10.0 | 1113 | 64.05 | 8.0 | 1M18 | 45.50 | 10.0 |
| 9 | 3D11 | 75.09 | 13.3 | 1114 | 52.31 | 6.0 | 1M19 | 30.73 | 7.5 |
| 10 | 3D12 | 76.37 | 9.8 | *113 | - | - | 1M23 | 45.39 | 10.0 |
| 11 | *1D9 | - | - | *1111 | - | - | 1M24 | 41.46 | 8.0 |
| 12 | *1D12 | - | - | | | | *1M11 | - | - |
| Ort | | 72.57 | 10.88 | | 54.41 | 7.23 | | 41.46 | 8.32 |
| Std (±) | | 9.68 | 1.46 | | 7.67 | 1.07 | | 7.03 | 1.79 |

*Hatalı veri kaydı.

Tablo 2. Tek eksenli sıkışma deneylerinden belirlenen her kaya türüne ait ν parametreleri.**Table 2.** ν parameter of each rock obtained from the uniaxial compressive strength tests.

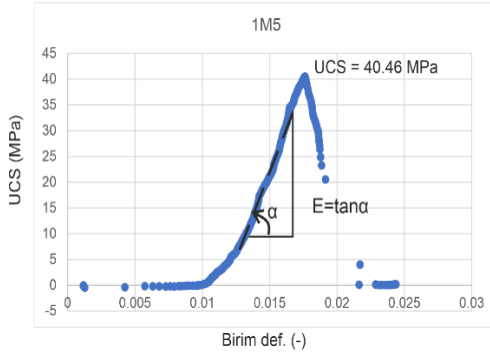
| Örnek No | Diyabaz | İgnimbirit | Mermer |
|----------|---------|------------|--------|
| 1 | * | 0.20 | 0.13 |
| 2 | 0.24 | 0.14 | 0.19 |
| 3 | 0.27 | 0.10 | 0.11 |
| Ort | 0.25 | 0.15 | 0.14 |

*Örnek ortalama UCS değerinin 2 katı gerilim seviyesinde yenilmiş ve yanıl deformasyona ait veride hata oluşmuştur.



Şekil 3. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen gerilme- birim deformasyon eğrileri (a) diyabaz (b) ignimbirit (c) mermer.

Figure 3. Stress-strain curves obtained from uniaxial compressive strength tests (a) diabase (b) ignimbrite (c) marble.



Şekil 4. E (teğetsel modülü) parametresinin hesaplanması.

Figure 4. Calculation of the E (tangential modulus) parameter.

Üç eksenli sıkışma deneyleri kayalara ait Hoek-Brown yenilme zarflarının (Hoek et al. 2002) belirlenmesi için yapılmıştır (Şekil 5). Her kaya türü için 2, 5 ve 8 MPa yanal basınç (σ_3) altında

3'er setten toplam 9 adet karot örnek, 200 ton yükleme kapasiteli preste ve 420 bar'a kadar yanal basınç uygulayabilen Hoek hücresi kullanılarak deneye tabi tutulmuş ve yenilme anındaki doruk dayanım değeri olan σ_1 seviyeleri belirlenmiştir (Tablo 3). Elde edilen veri çiftleri kullanılarak Eş. 1 ve 2'den örneklerin Hoek- Brown m parametreleri belirlenmiş ve yenilme zarfları (Hoek et al. 2002) çizilmiştir (Şekil 6).

$$\sigma_1 = (\sigma_3 + m\sigma_c\sigma_c + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad (1)$$

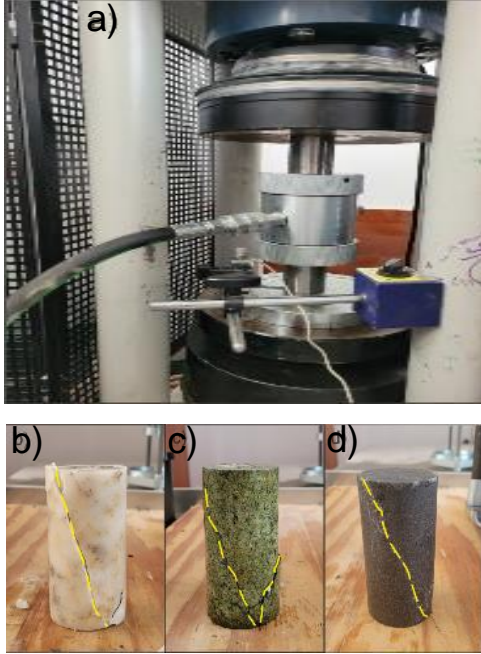
$$y = m\sigma_c x + s\sigma_c^2 \quad (2)$$

Burada, $\sigma_c = \text{UCS}$, $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ ve $x = \sigma_3$ olup, m ve s boyutsuz malzeme sabitidir ve kaya malzemelerinde $s=1$ 'dir. Regresyon analizinden x-y veri çiftiyle elde edilen doğrunun eğiminin, UCS'ye olan oranı m parametre değerlerini vermektedir (Şekil 7). Bu ilişkiden $m_{\text{diyabaz}} = 26.8$, $m_{\text{mermer}} = 17.6$, $m_{\text{İgnimbirit}} = 15.8$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar.

Table 3. The results obtained from triaxial compressive strength tests.

| Diyabaz | | | İgnimbirit | | | Mermer | | |
|---------|------------------|------------------|------------|------------------|------------------|--------|------------------|------------------|
| No | σ_3 (Mpa) | σ_1 (Mpa) | No | σ_3 (Mpa) | σ_1 (Mpa) | No | σ_3 (Mpa) | σ_1 (Mpa) |
| 3D1 | 2 | 107.75 | 3I1 | 2 | 71.3 | 3M1 | 2 | 54.82 |
| 3D2 | 5 | 124.92 | 3I2 | 5 | 93.04 | 3M2 | 5 | 83.23 |
| 3D3 | 8 | 156.76 | 3I3 | 8 | 79.48 | 3M12 | 8 | 94.58 |
| 3D4 | 2 | 129.85 | 3I4 | 2 | 104.33 | 3M4 | 2 | 64.69 |
| 3D5 | 5 | 174.73 | 3I5 | 5 | 84.27 | 3M5 | 5 | 77.44 |
| 3D6 | 8 | 188.3 | 3I6 | 8 | 108.14 | 3M6 | 8 | 85.42 |
| 3D7 | 2 | 132.83 | 3I7 | 2 | 79.62 | 3M7 | 2 | 64.2 |
| 3D8 | 5 | 157.81 | 3I8 | 5 | 90.82 | 3M8 | 5 | 79.23 |
| 3D9 | 8 | 186.8 | 3I9 | 8 | 109 | 3M9 | 8 | 92.16 |

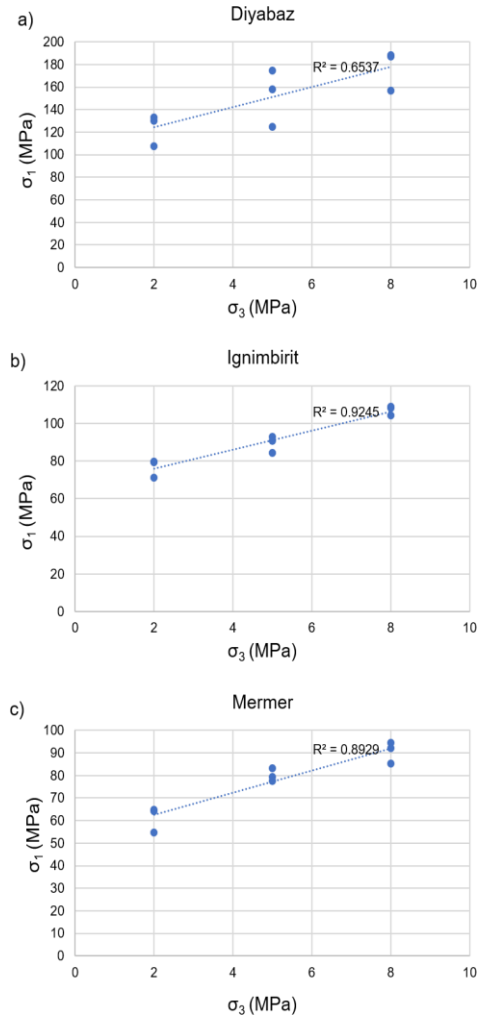


Şekil 5. Üç eksenli sıkıştırma deneyi düzeneği ve deney sonunda örneklerde oluşan makro çatlaklar a) Hoek hücresi içine yerleştirilmiş bir örneğin yükleme ünitesindeki görünümü b) yenilmiş mermer c) ignimbirit ve d) diyabaz.

Figure 5. Triaxial compressive strength test configuration and macro cracks developed in the samples after the testing (a) a view from the sample in the Hoek cell under loading frame b) fractured marble (c) ignimbrite (d) diabase.

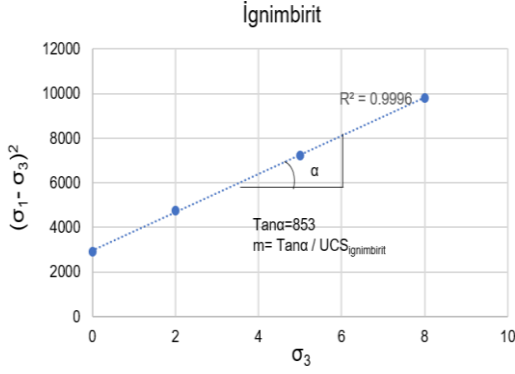
Yukarıda da bahsedildiği gibi Brazilian çekme deneyleriyle belirlenen çekme dayanımı değerleri bu çalışmada tek eksenli çekme dayanımı (UTS) olarak kabul edilmiştir. Örneklerin UTS değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Yenilme anında kaydedilen en büyük yük değeri F (kN) olmak üzere $UTS=0.636 \cdot F / (t \cdot D)$ eşitliğinden hesaplanmaktadır. Deneylerde kalınlık/çap oranı (t/D) 0.5-1.0 olan disk şeklinde örnekler kullanılmış ve bu örneklerle ortalama 25-30 sn

arasında yenilecek şekilde yüklemeler yapılmıştır (Şekil 8). Her kaya türünden 10'ar adet olmak üzere mermer, ignimbirit ve diyabaz örneklerinin ortalama UTS değerleri sırasıyla 4.85 MPa, 6.67 ve 9.14 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4).



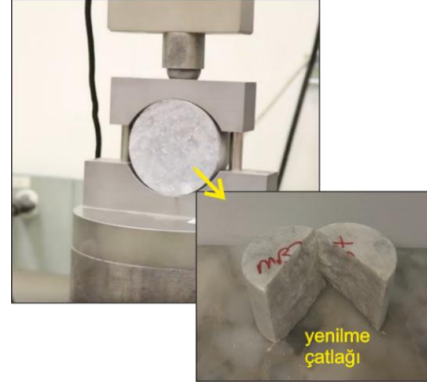
Şekil 6. (a) Diyabaz, (b) ignimbirit ve (c) mermer örneklerine ait Hoek-Brown yenilme zarfları (Yanal basınçlar $\sigma_3=2, 5$ ve 8 MPa).

Figure 6. Hoek-Brown failure envelopes (confining stresses $\sigma_3=2, 5$, and 8 MPa) of (a) diabase (b) marble (c) ignimbrite.



Şekil 7. Hoek-Brown m parametresinin hesaplanmasında kullanılan regresyon grafiğinden bir örnek.

Figure 7. An example from the regression curve used in the calculation of the Hoek-Brown m parameter.



Şekil 8. Brazilian deneyine tabi tutulmuş bir örnekten görünüm.

Figure 8. A view from the sample subjected to the Brazilian test.

Tablo 4. Brazilian çekme deneylerinden elde edilen her kaya türüne ait UTS değerleri.

Table 4. The UTS values of each rock type obtained from Brazilian tensile strength.

| Örnek No | UTS (MPa) | Örnek No | UTS (MPa) | Örnek No | UTS (MPa) |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| BM1 | 4.97 | BD2 | 11.79 | Bİ1 | 7.60 |
| BM2 | 5.66 | BD3 | 10.03 | Bİ2 | 6.26 |
| BM3 | 4.36 | B1 | 9.37 | Bİ3 | 5.81 |
| MB1 | 4.30 | B2 | 8.77 | İB1 | 7.42 |
| MB2 | 5.24 | B3 | 8.05 | İB2 | 6.13 |
| MB3 | 4.92 | B4 | 8.24 | İB3 | 7.50 |
| MB4 | 4.97 | B5 | 9.80 | İB4 | 5.33 |
| MB5 | 5.19 | B6 | 9.40 | İB5 | 6.21 |
| MB6 | 4.41 | B8 | 7.61 | İB6 | 6.89 |
| MB7 | 4.49 | B9 | 8.39 | İB7 | 7.55 |
| Ort | 4.85 | | 9.14 | | 6.67 |
| Std (±) | 0.43 | | 1.15 | | 0.78 |

Üç Boyutlu Sayısal Modelleme

Her kaya türünün makro mekanik davranışını temsil edecek sayısal modeller oluşturmak ve oluşturulan bu modellerde mikro çatlakların oluşmaya başladığı (σ_{ci}) ve birleşerek ilerlediği (σ_{cd}) eşik gerilme değerlerini belirlemek için toplamda 149 adet tek eksenli ve üç eksenli sıkışma ile çekme dayanımı deneyi simülasyonu laboratuvardaki gerilme koşullarıyla aynı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kaya örneklerinin mekanik davranışını belirleyebilmek için 3 boyutlu Yade açık kaynaklı DEM platformu (Šmilauer vd., 2015) kullanılmıştır. İlk kez Potyondy ve Cundall (2004) tarafından önerilen ve daha sonra Scholtès ve Donzé (2013) tarafından modifiye edilmiş bağlı partikül modeli (BPM) bu platforma uygulanmıştır. Söz konusu sayısal ortamda bir kaya malzemesi birbirinden ayrık, rijit ve küresel taneler/partiküllerin dağılımıyla oluşmaktadır (Şekil 9). Oluşturulan kaya modelinde partiküller bir etkileşim oranı (γ_{int}) ve "temas kanuna (constitutive contact law)" göre bir aradadırlar;

$$D_{eq} = \gamma_{int} * (R_a + R_b) \quad (3)$$

Burada; D_{eq} : iki partikül arasındaki ilksel uzaklık ve $\gamma_{int} \geq 1$ olmak üzere, R_a ve R_b : a ve b partiküllerinin yarıçapını göstermektedir. Tanelerin birbiriyle olan kenetlenme derecesi simülasyonun başlangıcında belirlenir. Her bir partikül başına düşen ortalama bağ sayısı (N) bu kenetlenme derecesine göre atanır. γ_{int} değeri ne kadar 1'e yaklaşırsa, malzeme o kadar az kenetlenmiş demektir ve bu durum onun zayıf bir kaya kütesini temsil ettiğini göstermektedir. Partiküller arasındaki etkileşim kuvvetleri, normal kuvvet (F_n) ve makaslama kuvveti (F_s) olarak ikiye ayrılmaktadır. Normal doğrultuda F_n ;

$$F_n = k_n * u_n \quad (4)$$

$$k_n = 2Y[(R_a * R_b)/(R_a + R_b)] \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada k_n , eşdeğer elastik modülün (Y) bir fonksiyonu olan normal rijitlik değeridir ve u_n ise normal rölatif yer değiştirmedir. Sıkışma rejimi altında F_n sınırsız artarken, çekme anında ise çekme dayanımının (t) bir fonksiyonu olan $F_n^{max} = t * A_{int}$ eşik değerine (izin verilebilir maksimum normal kuvvete) kadar artış gösterebilir. A_{int} , iki partikül arasındaki yüzey ($A_{int} = \pi * (\min(R_a; R_b))^2$) olmak üzere, $F_n \geq F_n^{max}$ olduğu anda partiküller arasındaki bağ kopmakta ve bu bağın olduğu yerde çekme çatlakları oluşmaktadır.

Makaslama yönünde ise F_s tetikleyici kuvvettir ve giderek artan bir eğilimle:

$$F_s = F_s^{t-\Delta t} + k_s * \Delta u_s \quad (6)$$

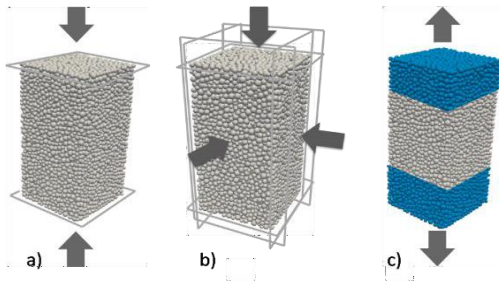
eşitliğinden hesaplanır. Eşitlikteki makaslama rijitliği (k_s), $k_s = P * k_n$ ilişkisinden belirlenmektedir. P model bir sabiti olarak $0 < P < 1$ aralığında değişmektedir. Δu_s , rölatif artan yerdeğiştirme ve $F_s^{t-\Delta t}$, bir önceki zaman aralığındaki makaslama kuvvetini gösterir. Bu durumda maksimum izin verilebilir makaslama kuvveti olan F_s^{max} , Mohr-Coulomb kriterine göre;

$$F_s^{max} = c * A_{int} + F_n * \tan(\varphi) \quad (7)$$

ilişkisinden belirlenir. Bu eşitlikte c: mikro kohezyon ve φ : taneler arasındaki içsel sürtünme açısıdır. Eğer $F_s \geq F_s^{max}$ olursa, model kayada makaslama yenilmesi meydana gelir ve bu kez partiküller arasındaki bağın olduğu yerde makaslama çatlakları gelişmektedir.

Yukarıda bahsedilen her bir mikro-parametre (Y, P, t, c, φ ve N) kayaların mekanik davranışını kontrol eden bir makro özelliği temsil etmektedir. Örneğin Y doğrudan kaya malzemesinin Young (teğetsel) modülünü (E) kontrol ederken, P, k_n / k_s değerine eşit olup Poisson oranını (ν) etkilemektedir. Her iki makro-parametre tek eksenli ve üç eksenli sıkışma ile doğrudan çekme dayanımı deneyi simülasyonlarından belirlenmektedir. Diğer taraftan t, partiküllerin çekme dayanımı olup UTS değerini kontrol ederken, c ise UCS'yi

etkilemektedir. ϕ kayanın yenilme zarfının eğimini kontrol eder ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarından belirlenir. Son olarak, N parametresi ise UCS/UTS oranına göre simülasyon başlamadan önce atanmakta ve doğrudan etkileşim oranı (ν_{int}) ile ilişkili içerisindedir (bkz. Ayrıntılar için Scholtès ve Donzé, 2013). Kullanılan yöntemde yarı-statik yükleme koşullarının simülasyonu için sönümlenme oranı (damping ratio) 0.4 olarak seçilmiştir. Her parametrenin makro özellikler üzerindeki etkisi ise ayrıntılı olarak Dinc Göğüş (2021)'de ulaşılabilir.



Şekil 9. DEM sayısal modeli (a) tek eksenli sıkışma (b) üç eksenli sıkışma (c) tek eksenli çekme dayanımı deneyleri için simülasyon şekilleri.

Figure 9. DEM numerical model (a) uniaxial compressive (b) triaxial compressive (c) uniaxial tensile strength test simulations' configurations.

Model Kalibrasyonu

Kalibrasyon süreci, söz konusu kayanın yenilme ve deformasyon davranışını temsil edinceye kadar tekrarlanmış ve toplamda 149 adet tek eksenli – üç eksenli sıkışma, çekme dayanımı deneyinin simülasyonu yapılmıştır. Yukarıda da bahsedildiği gibi tüm simülasyonlar laboratuvardaki gerilme koşullarıyla aynı şekilde yürütülmüştür (aynı yanal basınçlar, sürtünmesiz plakaların yerleştirilmesi vb.). Bu kapsamda öncelikle 1 x 2 x 1 (model birim) boyutlarında ve her biri 10,000 partikül (ayrık eleman) içeren sayısal örnekler oluşturulmuştur.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonunda iki adet rijit sürtünmesiz plaka arasında sınırlandırılmış olan sayısal model örneklere, örnek eksenine dik yönde yük uygulanmıştır (Şekil 9a). Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarında ise örnekler 6 adet rijit ve sürtünmesiz plaka arasında konumlandırılmış olup (True triaxial deney düzeneği), istenilen yanal basınca ulaşıldığı anda üst ve alt plakalar sabit bir birim deformasyon oranında düşey olarak hareket etmeye başlamaktadır (Şekil 9b). Bu sırada yanal gerilme, yan duvarların konumuyla kontrol edilmektedir. Doğrudan çekme dayanımı deneyi simülasyonunda ise, örneklerin üst ve alt sınırlarındaki partiküller düşey eksen boyunca zıt yönlü olarak hareket etmektedir (Şekil 9c). Hareket hızı sıkışma deneyi simülasyonlarındakiyle aynı hızda olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm simülasyonlar için yükleme oranı (hızı) yapılan ön hassasiyet analiz sonuçlarına göre 0.025 m/s olarak seçilmiştir. Modelleme çalışmalarının karmaşık hale gelmemesi açısından tüm örneklerin herhangi bir süreksizlik içermediği ve mikro çatlakların etki eden gerilmelerin tetiklenmesiyle oluştuğu kabul edilmektedir.

Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre kaya modellerinin mikro özellikleri (N, Y, P, t, c, ϕ) Tablo 5'de sunulmuş olup, bu mikro özelliklerle donatılan modellerin sahip olduğu makro mekanik parametreler (UCS, UTS, E ve ν) laboratuvar verileriyle karşılaştırmalı olarak Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü gibi sayısal model analizlerinden elde edilen mekanik parametreler, laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle oldukça uyumludur. Yalnızca diyabaza ait ν parametresi laboratuvar deneylerinden elde edilen değerden daha düşük çıkmıştır. Deformasyon ölçerlerin hassas olması diyabazın ν parametresinin belirlenmesinde sınırlamalar yaratmış olabilir. 1 nolu diyabaz

örneğinden veri alınamamasının, bu hassasiyetten de kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Ancak sayısal modellerden elde edilen Hoek-Brown yenilme zarfları (Hoek vd., 2002), laboratuvar verilerine göre üretilmiş yenilme zarflarıyla örtüştüğü için (Şekil 10), diyabaz

örneklerinin v_{lab} parametresinin sayısal model analizlerinden elde edilen $v_{dem}=0.15$ değerine yakın bir değerde olduğu varsayılmaktadır. Buna ilave olarak, söz konusu parametrenin 0.15-0.20 aralığında yer alması diğer mikro parametre değerlerinin kalibrasyonunu değiştirmeyecektir.

Tablo 5. Ayrık elemanlar yöntemine (DEM) göre kalibre edilen sayısal modellerin mikro parametreleri.

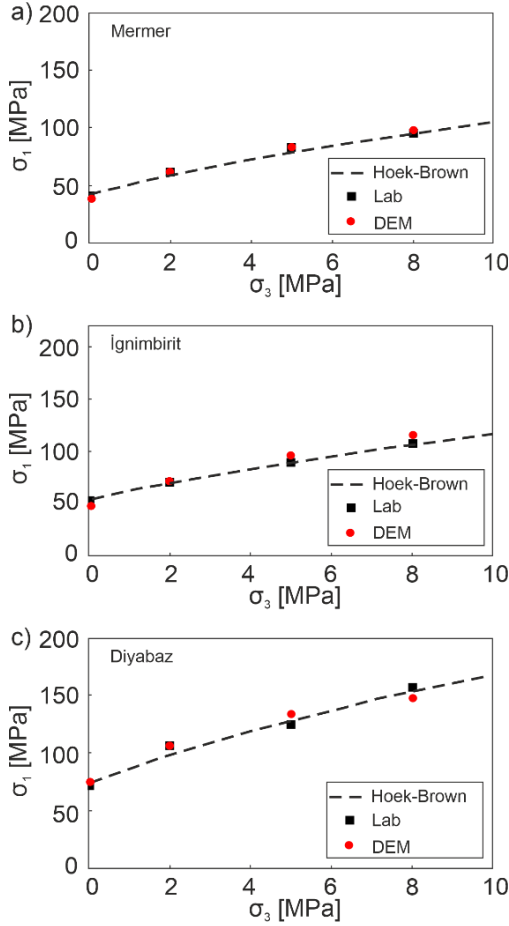
Table 5. Calibrated microparameters of the numerical modes based on the discrete element method (DEM).

| Parameter | Diyabaz | Mermer | İgnimbirit |
|--|---------|--------|------------|
| Elastik Modül Y (GPa) | 13 | 12 | 10 |
| Rijitlik oranı P (-) | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Partiküller arası çekme dayanımı t (MPa) | 11 | 7 | 9 |
| Mikro Kohezyon c (MPa) | 77 | 56 | 74 |
| Mikro içsel sürtünme açısı ϕ (°) | 1 | 1 | 1 |
| Koordinasyon sayısı N (-) | 10 | 9 | 9 |

Tablo 6. Laboratuvar deneyleri ve ayrık elemanlar yöntemine (DEM) dayalı sayısal simülasyonlardan elde edilen her kaya türüne ait makro mekanik parametreler.

Table 6. Macro mechanical parameters of each rock type obtained from laboratory tests and numerical simulations based on the discrete element methods (DEM).

| Kaya | Diyabaz | | | | Mermer | | | | İgnimbirit | | | |
|------|----------------|---------------|----------------|-----------|----------------|---------------|---------------|-----------|----------------|---------------|---------------|-----------|
| | UCS (MPa) | UTS (MPa) | E (GPa) | ν (-) | UCS (MPa) | UTS (MPa) | E (GPa) | ν (-) | UCS (MPa) | UTS (MPa) | E (GPa) | ν (-) |
| Lab | 72.57 ±9.68 | 9.14 ±1.15 | 10.88 ±1.46 | 0.25 | 41.46 ±7.03 | 4.85 ±0.43 | 8.32 ±1.79 | 0.14 | 54.41 ±7.67 | 6.67 ±0.78 | 7.23 ±1.07 | 0.15 |
| DEM | 75.5 | 9.2 | 9.68 | 0.15 | 38.5 | 5.1 | 7.5 | 0.13 | 47 | 6.53 | 6.4 | 0.13 |



Şekil 10. Laboratuvar ve DEM sayısal model analizlerinden elde edilen her kaya türüne ait Hoek-Brown yenilme zarfları.

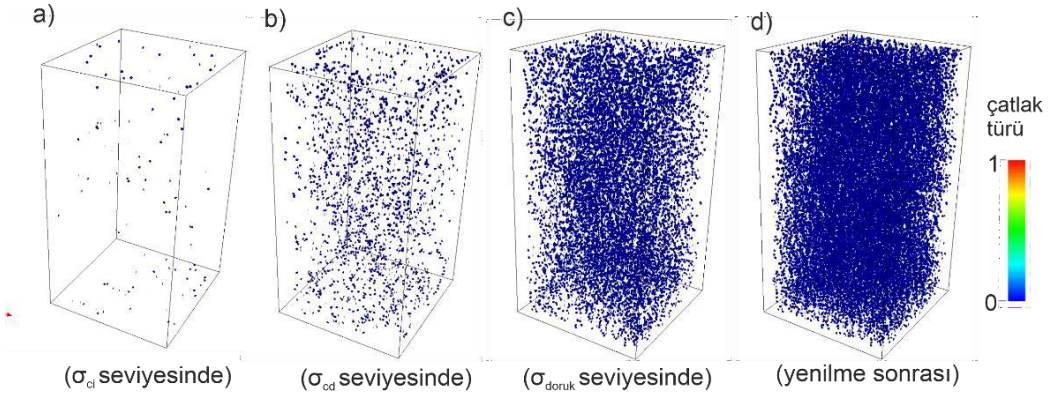
Figure 10. Hoek-Brown failure envelopes of each rock type derived from laboratory and DEM numerical model analyses.

AYRIK ELEMENLER ANALİZİ ve TARTIŞMA

Kaya mühendisliği operasyonlarında yük altındaki kayalar çoğunlukla UCS (doruk dayanımına) değerine henüz gelmeden yorularak yenilmektedir. Bu durum kayanın σ_{cd} gerilme seviyesine ulaşmış olmasından kaynaklanmaktadır (Martin ve Chandler, 1994;

Eberhardt vd., 1998). Dolayısıyla yenilme öncesi deformasyon davranışının tespit edilmesi, yenilmeyle ortaya çıkacak hasarın tahmin edilmesi açısından son derece önemlidir (Lockner vd., 1991; Lei vd., 2000; Zhang vd., 2000, Lei vd., 2006). Bu davranış ise tamamen kayanın yenilme öncesinde mikro çatlaklanma karakterine bağlıdır. Mikro çatlaklanmanın ne zaman ve ne türde geliştiğini anlamak için tek eksenli sıkışma gerilmesi altındaki model örneklerin analizi ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Yapılan DEM sayısal analizlerinde σ_{ci} ve σ_{cd} gerilme seviyelerini belirlemek için modeller Paraview adı verilen açık kaynaklı bir arayüz programında incelenmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi simülasyonlarında her örnek için 150,000 iterasyon yapılmış ve yüklemenin başlangıcından itibaren çatlak oluşumları incelenmiştir. Söz konusu gerilme seviyelerine kadar modellerde yalnızca çekme mikro çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Yüklemenin başından sonuna kadar incelendiğinde ise kaya modellerinde mikro çatlaklanmanın yine baskın olarak çekme mekanizması tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir (Şekil 11). Makaslama çatlakları ise toplam mikro çatlaklanmanın yalnızca %1'lik kısmını oluşturmuştur. Bu durum her üç kaya türünün de gevrek (rijit) bir kaya davranışı sergilenmesinden kaynaklanmaktadır. Analizlerde, her iterasyon adımına karşı modellerdeki çatlak miktarı tespit edilmiş ve o adımdaki birim deformasyona karşılık gelen gerilme seviyesi belirlenmiştir. Örneğin diyabaz kaya türünün mekanik davranışını temsil eden bir sayısal kaya modelinde σ_{ci} ve σ_{cd} değerlerinin iterasyonun 35,000 ve 50,000. zaman adımındaki birim deformasyona karşılık gelen gerilmeler olduğu saptanmıştır (Şekil 11). Bu şekilde sayısal modellerde çatlakların türü, sayısı ve alansal dağılımı net bir şekilde gözlenebilmektedir.



Şekil 11. Tek eksenli sıkışma deneyi simülasyonlarında diyabazı temsil eden bir sayısal kaya modelinde mikro çatlak dağılımı (a) σ_{ci} seviyesinde (b) σ_{cd} seviyesinde (c) σ_{doruk} seviyesinde (d) yenilme sonrasında (mavi (0): çekme mikro çatlakları, kırmızı (1): makaslama mikro çatlakları).

Figure 11. Microcrack distribution during the uniaxial compressive strength test simulation (a) at the σ_{ci} level (b) at the σ_{cd} level (c) at the σ_{peak} level (d) after failure in diabase model sample (blue (0): tensile microcracks, red (1): shear microcracks).

Yüklemenin ilksel aşamalarında σ_{ci} değerine kadar tüm kaya örnekleri doğrusal-elastik davranış sergilemiştir (Şekil 12). Eksenel gerilmadaki artışla beraber mikro çatlaklanma yoğunluğu da artmış ve bu durum malzeme rijitliğini bozarak gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusallıktan sapmasına neden olmuştur. Önceki çalışmalarla (Guo vd., 2017; Dinc ve Scholtes, 2018; Zhang vd., 2021; Dinç Göğüş ve Avşar, 2022) uyumlu olarak doğrusallıktan sapılan bu nokta söz konusu kayanın σ_{cd} gerilme seviyesine de işaret etmektedir. Hem Paraview programındaki çatlak analizlerinde hem de modellerin gerilme-birim deformasyon eğirileri incelendiğinde yaklaşık olarak ignimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyabaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olduğu bulunmuştur. Bu verilerden σ_{cd} değerleri UCS parametresiyle normalize edildiğinde her üç kaya türü de düşük poroziteli olan rijit kaya türlerini temsil etmektedir (Xue vd., 2014). Her üç kayada da yaklaşık olarak

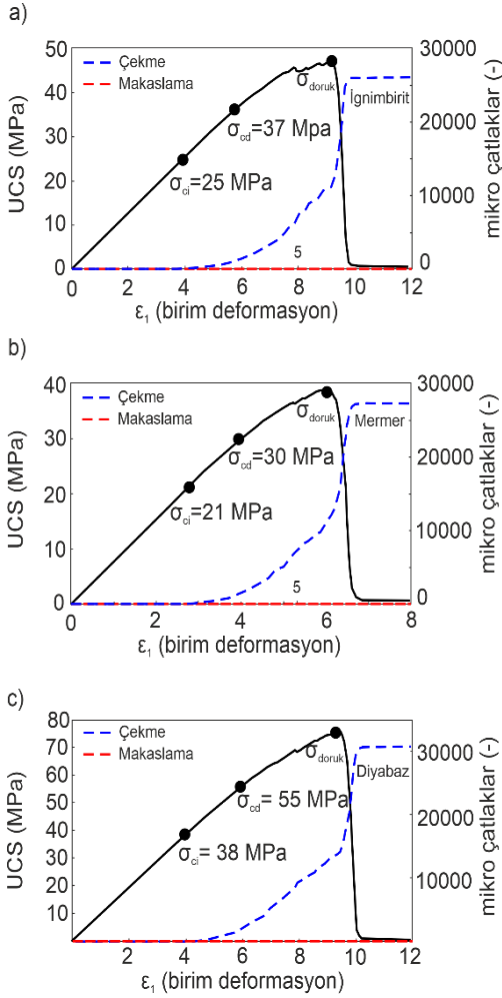
UCS'nin %50'sine denk gelen gerilmelerde çatlaklanma başlamıştır (σ_{ci}). UCS'nin %75'i ise çatlaklanmanın kayada kalıcı hasara neden olduğu ve plastik deformasyona geçtiği gerilme seviyesine (σ_{cd}) denk gelmektedir.

Tüm kaya türlerine ait σ_{ci} ve σ_{cd} gerilme seviyeleri ve kayaların mekanik davranışını gösteren gerilme-birim deformasyon eğirileri Şekil 12'de sunulmaktadır. Burada her iki türdeki mikro çatlaklanma mekanizması mavi ve kırmızı (çekme ve makaslama) eğrilerle gösterilmiş olup, yükleme boyunca çekme mikro çatlaklarının sayısı giderek artarken, makaslama mikro çatlaklarının çok az sayıda geliştiği görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada gerilmeyle tetiklenen kaya deformasyonu 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmiştir. Mikro çatlaklanma sürecinin ayrıntılı olarak analiz edildiği araştırma kapsamında ignimbirit, diyabaz ve mermerden oluşan üç farklı kaya türüne ait örnekler

kullanılmıştır. Bu örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmış ve deneylerden belirlenen mekanik özellikler 3 boyutlu DEM modellerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Araştırmadan elde edilen tüm sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:



Şekil 12. Sayısal model analizlerinde elde edilen her kaya türüne ait gerilme-birim deformasyon ve mikro çatlak yoğunluk eğrisi.

Figure 12. Stress-strain and microcrack intensity curves derived from numerical model analyses for each rock type.

i. Model sonuçları, laboratuvar ölçümlerinden elde edilen UCS, UTS, E ve ν parametreleriyle ve Hoek-Brown yenilme zarflarıyla karşılaştırılmış ve her iki yöntemden belirlenen bulguların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum sayısal modelin kaya deformasyon karakterini etkili bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

ii. Tek eksenli sıkışma deneyi simülasyonları ayrıntılı olarak incelendiğinde yenilme öncesinde mikro çatlaklanmanın temel olarak çekme mekanizması tarafından kontrol edildiği görülmüştür. Toplam mikro çatlaklanma yoğunluğunun %99'u çekme, %1'i makaslama çatlaktır. Bu sonuç her üç kaya türünün de kırılğan (gevrek) kaya davranışı sergilediğinin de bir göstergesidir. Dolayısıyla kayalarda mikro çatlaklanma evriminin belirlenmesinde DEM tabanlı model örnekler üzerinde sayısal analizler güvenli bir şekilde uygulanabilir.

iii. Tek eksenli sıkışmayla yüklenen örneklerde kritik çatlaklanma gerilme seviyeleri sırasıyla ignimbirit için $\sigma_{ci} = 25$ MPa ve $\sigma_{cd} = 37$ MPa; mermer için $\sigma_{ci} = 21$ MPa ve $\sigma_{cd} = 30$ MPa ve diyabaz için $\sigma_{ci} = 38$ MPa ve $\sigma_{cd} = 55$ MPa olarak tespit edilmiştir.

iv. DEM tabanlı bu modelleme tekniği çatlaklanmanın alansal dağılımını ve yoğunluğunu net bir şekilde göstermesi açısından AE laboratuvar ölçümlerine alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Ayrıca yöntem, çözümlene akışının kolaylıkla takip edilebilmesi ve hızlı sonuçlar üretmesiyle kullanıcıya bağımlılığı en aza indirerek kolay ve pratik bir analiz platformu sunmaktadır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK 121Y031 no'lu Kariyer Geliştirme Projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar yapıcı eleştirileri için hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- ASTM, 2000. Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction vol. 04.08. ASTM Publications, Philadelphia.
- Baud, P., Klein, E., and Wong, T., 2004. Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity. *Journal Structural Geology*, 26:603–624.
- Besuelle, P., Desrues, J., and Raynaud, S., 2000. Experimental Characterisation of the Localisation Phenomenon Inside a Vosges Sandstone in a Triaxial Cell. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (8): 1223-1237.
- Bieniawski, Z.T., 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. Part I: Theory of fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4: 395-430.
- Brace, W.F., 1964. Brittle fracture of rocks. *State of Stress in the Earth's Crust*, edited by W.R. Judd. American Elsevier Publishing Company, New York, 111–180.
- Briševac, Z., Kujundžić, T., Čajić, S., 2015. Current cognition of rock tensile strength testing by Brazilian test. *Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, <https://doi.org/10.17794/rqn.2015.2.2>.
- Cheng, H., Yang, X., Zhang, Z., Li, W., and Ning, Z., 2021. Damage evaluation and precursor of sandstone under the uniaxial compression: Insights from the strain-field heterogeneity. *Plos One*, 16(12): e0262054. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262054> PMID: 34965268
- Desrues, J., and Andò, E., 2015. Strain localisation in granular media. *Comptes Rendus. Physique, Académie des sciences*, Paris, 16 (1): 26-36.
- Diederichs, M.S., 2007. The 2003 CGS Geocolloquium Address: Damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 9: 1082-1116.
- Dinç Göğüş Ö., 2021. Mikro Parametrelerin Makro Mekanik Kaya Davranışı Üzerindeki Etkisi: Ayrık Elemanlar Yöntemiyle Model Kalibrasyonu. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45: 67-82.
- Dinç Göğüş Ö., and Avşar, E., 2022. Stress levels of precursory strain localization subsequent to the crack damage threshold in brittle rock. *Plos One*, 17(11): e0276214. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276214>.
- Dinç, Ö., and Scholtès, L., 2018. Discrete Analysis of Damage and Shear Banding in Argillaceous Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51:1521–1538.
- Dyskin, A., and Germanovich, L.N., 1993. A model of crack growth in microcracked rock. *International Journal of Rock Mechanic Sciences and Geomechanics Abstracts*, 30(7): 813-820.
- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., and Read, R.S., 1998. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 222–233.
- Germanovich, R.N., Salganik, R.L., Dyskin, A.V., and Lee, K.K., 1994. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression. *Pure Applied Geophysics*, 143:117–149.
- Gorski, B., Conlon, B., Ljunggren, B., 2007. Determination of the direct and indirect tensile strength on cores from borehole KFM01D. Forsmark site investigation, <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-07-76.pdf>, Swedish Nuclear Fuel and

- Waste Management Co, SKB Rapport P-07-76, 28.
- Griffith, A.A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 221:163-198.
- Guo, S., Qi, S., Zou, Y., and Zheng, B., 2017. Numerical Studies on the Failure Process of Heterogeneous Brittle Rocks or Rock-Like Materials under Uniaxial Compression. *Materials (Basel)*, 1; 10(4):378. <https://doi.org/10.3390/ma10040378> PMID: 28772738.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. 2002. Hoek–Brown failure criterion 2002 edition, *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC)*, Toronto: 267–273.
- Holcomb, D., Rudnicki, J.W., Issen, K.A., and Sternlof, K., 2007. Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the research and research directions. *Acta Geotechnica*, 2(1):1–15. doi:10.1007/s11440-007-0027-y.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods*, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group. Kozan Publishing, Ankara, Turkey.
- Jensen, S.S., 2016. Experimental study of direct tensile strength in sedimentary rocks. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 95.
- Ji, Y., Stephen, A.H., Baud, P., and Wong, T.F., 2015. Characterization of pore structure and strain localization in Majella limestone by X-ray computed tomography and digital image correlation. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), 700-719.
- Lei, X., 2006. Typical phases of pre-failure damage in granitic rocks under differential compression. *Fractal Analysis for Natural Hazards*, Geological Society, London, Special Publications, 261, 11–29.
- Lei, X.L., Kusunose, K., Nishizawa, O., Cho, A., and Satoh, T., 2000. On the spatio-temporal distribution of acoustic emissions in two granitic rocks under triaxial compression: the role of pre-existing cracks. *Geophysical Research Letters*, 27, 13:1997-2000.
- Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A., and Sidorin, A., 1991. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 350:39–42.
- Louis, L., Wong, T.F., and Baud, P., 2007. Imaging strain localization by X-ray radiography and digital image correlation: Deformation bands in Rothbach sandstone. *Journal of Structural Geology*, 29:129-140.
- Martin, C.D., and Chandler, N.A., 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31(6): 643-659.
- Moradian, Z., Einstein, H.H., and Ballivy, G., 2015. Detection of Cracking Levels in Brittle Rocks by Parametric Analysis of the Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 785–800.
- Nicksiar, M., and Martin, C.D., 2012. Evaluation of Methods for Determining Crack Initiation in Compression Tests on Low-Porosity Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45:607–617.
- Nicksiar, M., and Martin, C.D., 2012. Evaluation of Methods for Determining Crack Initiation in Compression Tests on

- Low-Porosity Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45:607–617.
- Peng, S., and Johnson, A.M., 1972. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9:37-86.
- Perras, M.A., Diederichs, M.S., 2014. A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32:525–546.
- Potyondy, D.O., and Cundall, P.A., 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8):1329–1364.
- Renard, F., Cordonnier, B., Kobchenko, M., Kandula, N., Weiss, J., and Zhu, W., 2017. Microscale characterization of rupture nucleation unravels precursors to faulting in rocks. *Earth Planet Science Letters*, 476: 69–78.
- Scholtés, L., and Donzé, F.V., 2013. A DEM model for soft and hard rocks: role of grain interlocking on strength. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 61:352–369.
- Shimizu, H., Koyama, T., Ishida, T., Chijimatsu, M., Fujita, T., and Nakama, S., 2010. Distinct element analysis for Class II behavior of rocks under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47: 323–333.
- Shirole, D., Walton, G., and Hedayat, A., 2020. Experimental investigation of multi-scale strain-field heterogeneity in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 127:104212.
- Schubnel, A., Thompson, B.D., Fortin, J., Guéguen, Y., Young, R.P., 2007. Fluid-induced rupture experiment on Fontainebleau sandstone: premonitory activity, rupture propagation, and aftershocks. *Geophys. Res. Lett.* 34, L19307.
- Šmilauer, V., and et al., 2015. *Yade Documentation* 2nd edition. doi:10.5281/zenodo.34073. <http://yade-dem.org>.
- Wang, B., Chen, Y., and Wong, T.F., 2008. A discrete element model for the development of compaction localization in granular rock. *Journal of Geophysical Research*, 113: B03202.
- Wu, H., Guo, N., and Zhao, J., 2018. Multiscale modeling and analysis of compaction bands in high porosity sandstones. *Acta Geotechnica*, 13:575–599. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0560-2>.
- Xue, L., Qin, S., Sun, Q., Wang, Y., Lee, L.M., and Li, W., 2014. A Study on Crack Damage Stress Thresholds of Different Rock Types Based on Uniaxial Compression Tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:1183–1195.
- Yang, W., Li, G., Ranjith, P.G., and Fang, L., 2019. An experimental study of mechanical behavior of brittle rock-like specimens with multi-non-persistent joints under uniaxial compression and damage analysis. *International Journal of Damage Mechanics*, 28(10): 1490–1522.
- Zang, A., Christian, W.F., Stanchits, S., Janssen, C., and Dresen, G., 2000. Fracture process zone in granite. *Journal of Geophysical Research*, 105(23): 651-661.
- Zhang, H., Huang, G., Song, H., and Kang, Y., 2013. Experimental characterization of strain localization in rock. *Geophysical Journal International*, 194: 1554–1558.
- Zhang, L., Scholtés, L., and Donzé, F.V., 2021. Discrete Element Modeling of Permeability Evolution During Progressive

Failure of a Low-Permeable Rock Under Triaxial Compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54:6351–6372. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02622-9>

Zhang, Y., Shao, J., de Saxcé, G., Shi, C., and Liu, Z., 2019. Study of deformation and failure in an anisotropic rock with a three-dimensional discrete element model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 120:17–28.

Zhao, X.G., Cai M., Wang J., and Ma, L.K., 2013. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64:258-269.

Zhu, J.B., Zhou, T., Liao, Z.Y., Sun, L., Li, X.B., and Chen, R., 2018. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behaviour of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 106:198-212.



Engineering Geological Assessment of a Slope Instability: A Case Study in the Guzelyali Region (Canakkale, Turkey) *Bir Şev Duraysızlığının Mühendislik Jeolojisi Değerlendirmesi: Güzelyalı Bölgesinde Bir Vaka Çalışması (Çanakkale, Türkiye)*

MEHMET CELAL TUNUSLUOĞLU ^{1*} 

¹ Canakkale Onsekiz Mart University, Department of Geological Engineering, Canakkale, Turkey

Geliş (*received*): 12 Nisan (*April*) 2023 Kabul (*accepted*): 01 Haziran (*June*) 2023

ABSTRACT

Guzelyali village, 20 km southwest of Canakkale city, is located on the shore of the Canakkale Strait (Dardanelles). The residential area located at the entrance to Guzelyali village has experienced landslides at different times since November 2001. In February 2013, the Güzelyalı landslide was triggered again due to severe rainstorms. As a result of the landslide, deformations and cracks formed in buildings, garden walls and the Canakkale-Guzelyali road. In this study, the aim was to determine the most appropriate improvement method to prevent landslides by determining the depth of the slip surface that caused the Guzelyali landslide and the geotechnical properties of the units. For this purpose, field observations, drilling, obtaining appropriate samples from these works for index and mechanical tests and monitoring studies by using inclinometers were carried out in order to evaluate the instability. As a result of inclinometer measurements, the displacement speed of the landslide was generally determined as 2.5-63.5 cm/year, indicating the landslide moves very slowly. In addition, slope stability analyses were carried out using the limit equilibrium and the finite element methods. To determine the shear strength parameters along the failure surface at the time of the failure, back analyses were performed based on the Janbu model for non-circular failure models in the direction of the landslide movement. It was also proposed to establish drainage systems on slope's surface in the landslide area. However, considering the stability analysis and the land use in the landslide area, it is considered that remediation using micro piles will be a reliable and economical remediation method.

Keywords: Landslide, Non-circular failure, Back analysis, Slope stability, Guzelyali (Canakkale)

ÖZ

Güzelyalı köyü, Çanakkale şehrinin 20 km güneybatısında, Çanakkale Boğazı kıyısında yer almaktadır. Güzelyalı köyünün girişinde yer alan yerleşim alanında Kasım 2001 tarihinden itibaren farklı zamanlarda

heyelanlar yaşanmıştır. Şubat 2013'te, Güzelyalı heyelanı şiddetli yağış nedeniyle tekrar tetiklenmiştir. Heyelan sonucu binalarda, bahçe duvarlarında ve Çanakkale-Güzelyalı yolunda deformasyonlar ve çatlaklar oluşmuştur. Bu çalışmada, Güzelyalı heyelanına neden olan kayma yüzeyinin derinliği ve birimlerin jeoteknik özellikleri belirlenerek heyelanların önlenmesi için en uygun iyileştirme yönteminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, duraysızlığın değerlendirilmesi amacıyla arazi gözlemleri, sondaj çalışmaları, sondaj çalışmaları ile indeks ve mekanik testler için örnek alma ve inklinometre kullanılarak izleme çalışmaları yapılmıştır. İnklinometre ölçümleri sonucunda heyelanın yer değiştirme hızı genel olarak 2,5-63,5 cm/yıl olarak belirlenmiş olup heyelanın çok yavaş hareket ettiğini göstermektedir. Ayrıca, limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şev stabilitesi analizleri yapılmıştır. Yenilme anında yenilme yüzeyi boyunca makaslama dayanımı parametrelerini belirlemek için, heyelan hareketi yönünde dairesel olmayan yenilme modelleri için Janbu modeline dayalı olarak geriye dönük analizler yapılmıştır. Ayrıca, heyelan bölgesinde şev yüzeyinde drenaj sistemlerinin kurulması önerilmiştir. Ancak stabilite analizleri ve heyelan bölgesindeki arazi kullanımı dikkate alındığında mikro kazıklarla iyileştirmenin güvenilir ve ekonomik bir iyileştirme yöntemi olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Dairesel olmayan yenilme, Geriye dönük analiz, Şev stabilitesi, Güzelyalı (Çanakkale)

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1281981>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ctunus@comu.edu.tr

INTRODUCTION

Landslides are defined as one of the most destructive natural disasters following the earthquakes. In studies conducted in Turkey, landslides have first place among natural disasters regarding the number of occurrences (Ercanoğlu and Gökçeoğlu, 2002; Gökçeoğlu et al., 2005). In many countries, economic losses and loss of life caused by landslides exceed the annual losses caused by earthquakes, floods and storms (Guzetti et al., 1999). In Turkey, which is among developing countries, in cities with rapid development, and under threat of potential natural hazard may be permitted for the use without urban planning and without taking any precautions. Thus, the natural environment is disturbed. Canakkale, located in the northwest of Turkey, is one of the cities that has been rapidly developing in the last 15 years. Güzelyalı village is situated on the shore of the Canakkale Strait (Dardanelles). It is one of the most important holiday destinations in the province of Canakkale during the summer months. For this reason, the real estate values

for houses in Güzelyalı village are quite high compared to the Canakkale city center. Since the entrance of Güzelyalı village is the closest place to Canakkale city center, it is the oldest settlement of summer houses. All these conditions have led to the construction of buildings very close to each other on a slope gently inclined toward the shore; hence, the slope is exposed to building loads. The landslides having different dimensions were commonly observed at the entrance to Güzelyalı village during heavy rainy months. Two different landslide events happened in 2008 and 2011 in the military zone located just on the border of the study area. These landslide events were investigated by various researchers at different times. (Yigitbas et al. 2005; Yigitbas et al. 2008; Tunusluoğlu et al. 2009; Tatar et al. 2011; Büyüksarac et al. 2015; Yigitbas et al. 2016; Tunusluoğlu and Karaca, 2018). The studies showed that the main triggering factor in the Güzelyalı landslide region is excessive precipitation. In addition, Yigitbas et al. (2005) stated that possible leaks from septic tanks may be sufficient to trigger

the Guzelyali landslide. The sewerage system in the region did not exist until three years ago, so each building had a septic tank. This study aims to reveal the possible causes and mechanism of a landslide that occurred in Guzelyali village in Canakkale (Figure 1), and to determine the most appropriate improvement method to prevent further landslides.

Detailed information about the geology, geomorphology, and hydrogeological condition of the region and the geotechnical parameters of the units in the landslide area have vital importance for landslide stability analysis. For this reason, disturbed and undisturbed samples were taken during geotechnical drilling studies within the scope of field studies and the groundwater level was measured from boreholes. In addition, inclinometer measurements were carried out at certain drilling locations and the slip surface depth was determined. Within the scope of laboratory studies, the physical and mechanical properties of the units in the landslide area were determined. In order to determine the shear strength parameters at failure, back analyses were performed along cross-section lines. In addition, the limit equilibrium method (LEM) and shear strength reduction analysis (FEM-SSR) based on the finite element method were used for slope stability analysis. Finally, reliable remedial measures were proposed, such as carrying out micro pile works on the Canakkale-Izmir highway, the Canakkale-Guzelyali road and at the toe of the study area to ensure the stability of the landslide area. In addition, it is suggested to control the drainage from the Canakkale-Izmir highway, which played an important role in triggering the landslide in February 2013, and the surface drainage system in the landslide area.

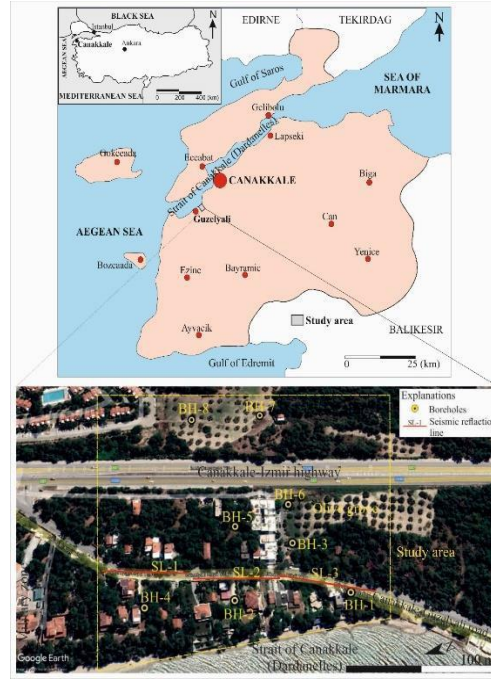


Figure 1. Location map of the study area.

Şekil 1. Çalışma alanının yerbuldurur haritası.

MORPHOLOGY AND CLIMATE

One of the important parameters for landslide analysis is topographic data. The general topographic and morphological features of the Guzelyali landslide area were evaluated using a digital elevation model created from the 1/1000 scale topographic map of the region. The toe area of the Guzelyali landslide is located on the shore of the Canakkale Strait (Dardanelles), and the distance between the crown area of the landslide and the toe area is approximately 250 meters. The topographic elevation of the landslide area ranges from 0 to 35 m. The slope of the study area generally varies up to 15°. However, perpendicular to the coast, the slope increases to about 25° and 36° (Figure 2).

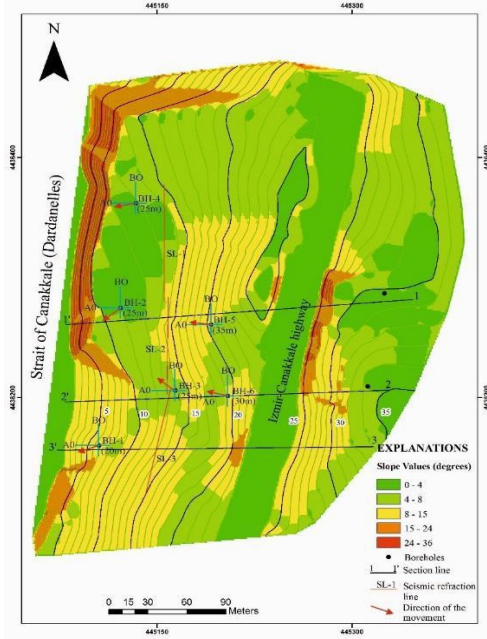


Figure 2. Slope map of the study area with movement direction of the landslide based on the inclinometer data.

Şekil 2. Çalışma alanının eğim haritası ile inclinometre verilerine dayalı heyelanın hareket yönü.

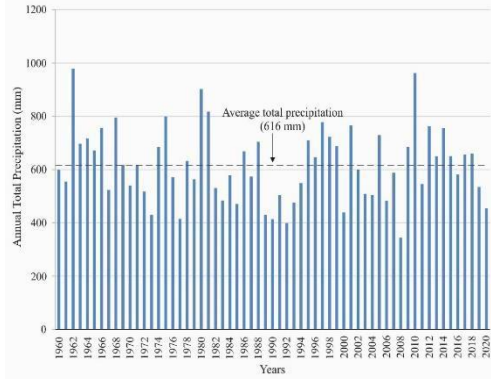
The Guzelyali landslide region has undulating topography. Due to the inability to drain the surface waters, especially on concave slopes, the surface waters infiltrating into the Kirazli Formation cause an increase in the pore water pressure of the soil and become an encouraging factor in the loss of stability of the soil material. Considering the studies conducted in the region, the main cause of landslides is excessive precipitation. Also, landslides after severe rainstorms on different dates caused serious damage in the region. For this reason, precipitation data for the region were examined in detail. In order to evaluate precipitation, data were obtained from the Canakkale Meteorology Station, the closest to the Guzelyali landslide area. Long-term (years 1960-2020) average annual precipitation and average total precipitation data obtained from Canakkale Meteorology Station were

approximately 55 mm and 616 mm, respectively (Figure 3a). When the precipitation data recorded by Canakkale Meteorology Station is examined, the amount of precipitation falling in December 2012 and January and February 2013 was approximately twice as much as the average precipitation amount for the same months between 1960 and 2020. In other words, the total monthly precipitation values recorded by the Canakkale Meteorology Station were 222.7 mm, 167.4 mm and 141.6 mm for December 2012 and January and February 2013, respectively (Figure 3b). However, the long-term (years of 1960-2020) precipitation values for December, January and February obtained from Canakkale Meteorology Station were recorded as 110.8 mm, 88 mm and 71 mm, respectively.

GEOLOGICAL SETTING AND SEISMOTECTONICS

The study area, Guzelyali village in Canakkale and its surroundings, consists of Middle Miocene-Pliocene sedimentary units. These sedimentary units are defined as the "Canakkale Group" (Siyako, 2006). The formations namely the Canakkale Group are composed of 4 litho-stratigraphic units from bottom to top, namely the Gazhanedere Formation, the Kirazli Formation, the Camrakdere Formation, and the Alcitepe Formation (Siyako, 2006). As a result of the field and drilling studies in the study area, the landslide area consists of the Gazhanedere Formation and Kirazli Formation. At the bottom, there is the Gazhanedere Formation consisting of conglomerate, sandstone, reddish-gray colored claystone and marl intercalations, and overlying this is the Kirazli Formation, which is yellowish colored, uncemented sandstone, pebbly sandstone and siltstone lithology. Also, intercalations of siltstone and claystone with conglomerates in the form of channel fillings are sparsely observed in the sandstones (Figure 4).

(a)



(b)

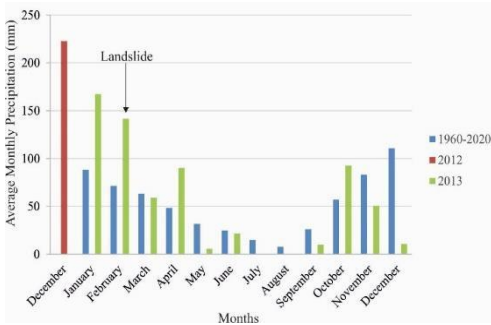


Figure 3. a) Variation of annual precipitation values recorded in Canakkale meteorology station, b) histograms showing long-term (1960–2020 and 2013) monthly precipitation values for Canakkale.

Şekil 3. a) Çanakkale meteoroloji istasyonunda kaydedilen yıllık yağış değerlerinin değişimi b) Çanakkale için uzun dönem (1960–2020 ve 2013) aylık yağış değerlerini gösteren histogramlar.

The North Anatolian Fault Zone (NAFZ) is one of the most important fault systems in the world in terms of earthquake productivity. The central segment of the NAFZ affects the province of Canakkale. The central segment extends in a wide zone between Biga, Can, Yenice, Bayramic, Ezine and Kestanbol as active faults that produce many earthquakes and continue into the Aegean Sea (Gurbuz et al. 2000). According to the Interactive Web Application

for the Turkey Earthquake Hazard Map prepared by AFAD (Republic of Turkey Prime Ministry Disaster and Emergency Management Presidency) in 2018, the peak horizontal ground acceleration value for Guzelyali village, Canakkale province, was determined as 0.296 g (repetition period 475 years).

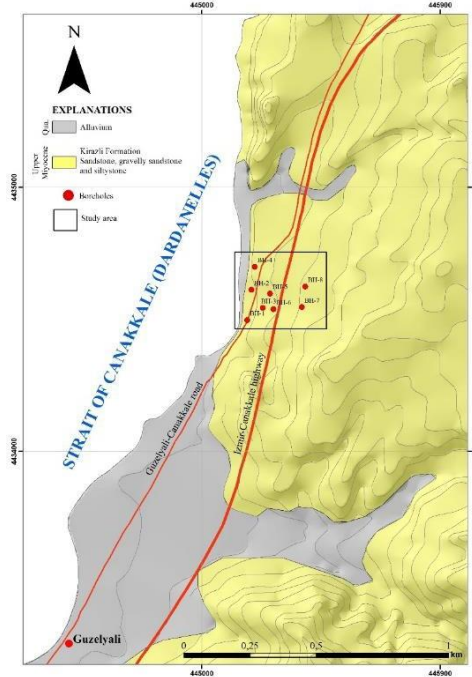


Figure 4. Geological map of the study area.

Şekil 4. Çalışma alanının jeoloji haritası.

LANDSLIDE AND GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS

Guzelyali Landslide

There are approximately 45 summer houses at the entrance of Guzelyali village. About two-thirds of these houses were directly affected by the landslide. The first landslide event at the entrance to Guzelyali village occurred in November 2001, and the landslide recurred in January 2004. As a result of the investigations carried out in the spring of 2005, and autumn of 2008, the landslides in the region were found to coincide with precipitation periods. The

landslides caused separations in adjacent buildings and vertical displacements between 60 and 80 cm from the road level of garage entrances (Figure 5a,b). In addition, some structures in the toe region of the mass movement were tilted backwards close to 7°, and there was settling (15-20 cm) of the building foundations (Figure 5c,d). In February 2013, the Guzelyali landslide reactivated as a result of severe rainstorms and incorrect infrastructure works carried out during the Canakkale-Izmir highway construction (Figure 5a). The drainage of the highway was directed to the landslide area through a culvert in an uncontrolled manner. As a result of the landslide, the Canakkale-Guzelyali road was closed due to settlement and cracks, the drinking water pipeline burst, and deformations occurred in structures and garden walls (Figure 5e, f, g, h).

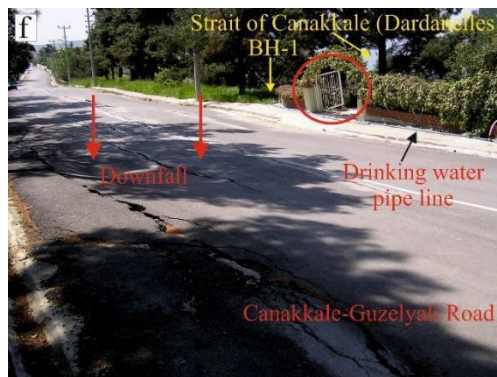




Figure 5. a) Separations in adjacent buildings and incorrect infrastructure, b) vertical displacement of garage entrance from the road level, c-d) building tilted backward by landslide, e-h) deformations of the road, garden walls and structures.

Şekil 5. a) Bitişik binalardaki ayrılmalar ve yanlış altyapı yapıları, b) garaj girişinin yol seviyesinden dikey olarak yer değiştirmesi, c-d) heyelan nedeniyle geriye doğru yatan bina, e-h) yol, bahçe duvarları ve yapılarıdaki deformasyonlar.

Site Investigations and Sampling

The fact that there is a landslide that could trigger at any time in the Guzelyali region revealed the need to examine this region in detail. In February 2015, a research was initiated by Canakkale Municipality to determine the causes of the landslide. Within the scope of these studies, eight geotechnical borehole studies with a depth of 20-36 m and a total length of 231 m were carried out to determine the failure mechanism, the depth of the slip surface and the geotechnical properties of the failure materials for the landslide in the Guzelyali region (Figure 2) (Table 1). In order to determine the physical and mechanical properties of soils in the landslide zone, disturbed and undisturbed samples were taken using an SPT sampler and Shelby tube during drilling studies, and laboratory experiments were carried out. In addition, static groundwater level measurements were made 48 hours after the drilling process was completed (Table 1).

Inclinometer Measurements

Unlike the studies carried out in the region, the inclinometer study was carried out for the first time in this study and the slip surface was determined precisely. Inclinometer pipes parallel to the movement direction of the landslide were placed in 6 boreholes (Figure 2), and inclinometer measurements were recorded at every 0.5 m interval in these boreholes. Also, inclinometer measurements were taken from March to June 2015. As a result of the inclinometer measurements, the depth of the slip zone was determined to be between 6.5 and 25 meters. The high movements were measured in boreholes 1 and 2, and the cumulative displacements were recorded as 36.5 mm and 40 mm, respectively, at the end of the 4th week. In the 5th week, the inclinometer could not be lowered into these boreholes. The velocity of sliding motion in boreholes 1 and 2 was determined as 1.58 mm/day (576.7 mm/year) and 1.74 mm/day (635.1 mm/year), respectively.

Inclinometer measurements were taken at regular intervals in all boreholes and graphs of depth versus cumulative displacement and graphs of depth versus incremental displacement were plotted. The cumulative and incremental displacement data for BH-1 are given in Figure 6. The results of the inclinometer measurements are given in Table 2. From the inclinometer measurements, the landslide progressed slowly (0.16-0.08 mm/day) in the upper sections of the Canakkale-Guzelyali road, but accelerated (1.58-1.74 mm/day) in the lower sections of the Canakkale-Guzelyali road. In addition, the slip surface for the landslide passed through the contact between the Kirazli Formation and Gazhanedere Formation, which is thought to be the path followed by groundwater. As a result of the evaluation of inclinometer measurements, the landslide had a non-circular slip surface.

Table 1. Data from geotechnical boreholes in the study area.*Çizelge 1. Çalışma alanındaki jeoteknik sondajların verileri.*

| Borehole no. | Coordinates (WGS1984 3 ^o) | | | Depth (m) | Groundwater depth (m) |
|--------------|---------------------------------------|--------------|------------------|-----------|-----------------------|
| | X (East) | Y (North) | Z (Elevation) | | |
| BH-1 | 445107.82 | 4436083.89 | 7 | 20 | 14.5 |
| BH-2 | 445124.42 | 4436198.50 | 11 | 25 | 15 |
| BH-3 | 445166.45 | 4436129.85 | 14 | 25 | 10 |
| BH-4 | 445136.33 | 4436285.66 | 13 | 25 | 9 |
| BH-5 | 445194.18 | 4436184.60 | 20 | 35 | 20 |
| BH-6 | 445207.0 | 4436125.23 | 19 | 30 | 7 |
| BH-7 | 445314.60 | 4436133.15 | 34 | 36 | 9 |
| BH-8 | 445327.41 | 4436210.64 | 30 | 35 | 4.5 |

Table 2. Summary of inclinometer results.*Çizelge 2. İnklinometre sonuçlarının özeti.*

| Borehole no. | Depth (m) | Inclinometer casing (m) | Slip surface depth (m) | Measurement duration (days) | Displacement amount (mm) | Rate (mm/day) |
|--------------|-----------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------|
| BH-1 | 20 | 20 | 11 | 23 | 36.5 | 1.58 |
| BH-2 | 25 | 25 | 17.5 | 23 | 40 | 1.74 |
| BH-3 | 25 | 25 | 16.5 | 113 | 18.5 | 0.16 |
| BH-4 | 25 | 25 | 6.5 | 112 | 39 | 0.35 |
| BH-5 | 35 | 35 | 25 | 112 | 9 | 0.08 |
| BH-6 | 30 | 30 | 19 | 111 | 10 | 0.09 |

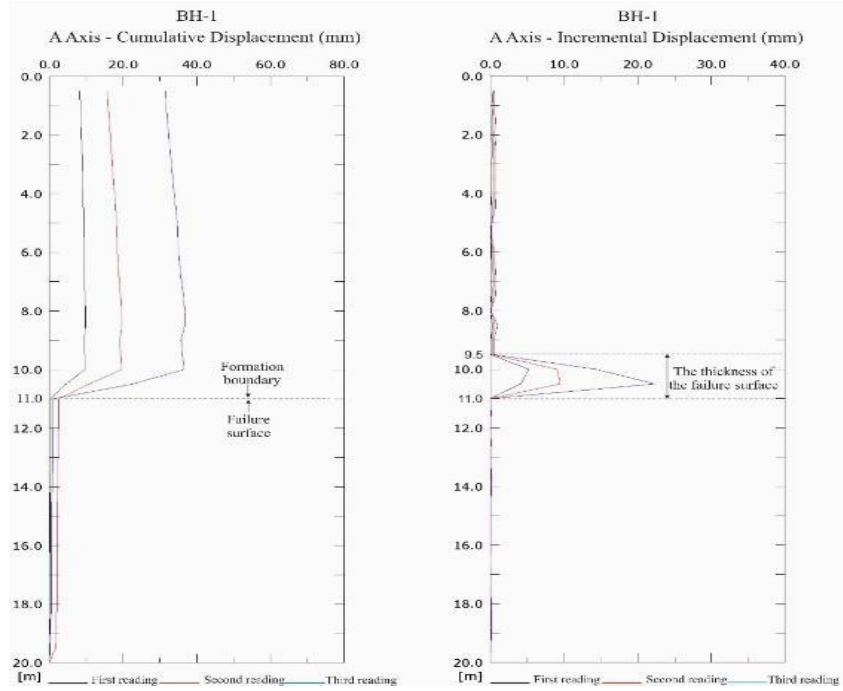


Figure 6. Cumulative and incremental displacement graphic in BH-1.

Şekil 6. BH-1 için kümülatif ve kademeli artışı gösteren yer değiştirme grafiği

Laboratory Studies

Laboratory experiments were carried out on disturbed samples taken with the SPT sampler and undisturbed samples taken with Shelby tube within the scope of drilling studies to determine the physical and mechanical properties of the landslide material. In this study, moisture content, particle size distribution, Atterberg limits, unconfined compressive strength tests and direct shear tests were carried out. The study area generally consists of low-strength clayey units belonging to the group of low plasticity inorganic clays (CL) from the Kirazlı Formation and high plasticity inorganic clays (CH) from the Gazhanedere Formation (Table 3). In order to determine the shear strength parameters of the undisturbed samples taken from the Kirazlı Formation, consolidated-drained (CD) type

direct shear tests were performed. As a result of the experiment, the mean peak and residual shear strength parameters were determined as $c_p=27.2$ kPa and $\phi_p=26.7^\circ$ and $c_r=15.3$ kPa,

$\phi_r=17.3^\circ$, respectively. Also, the natural unit weight (γ_n) was 18.5 kN/m³. The mean unconfined compressive strength values for the undisturbed samples taken from the Gazhanedere Formation were determined as 196.5 kPa, and the natural unit weight (γ_n) was 18.5 kN/m³ (Table 4).

SLOPE STABILITY ASSESSMENTS

The main aim of this study was to use both the classical limit equilibrium method (LEM) and the finite element method-shear strength reduction (FEM-SSR) method to investigate the slope stability of the Guzelyali landslide

area. For this purpose, three different cross-section lines were drawn to define the landslide area. On the cross-sections, the position of the slip surface determined from inclinometer measurements, formation transitions and groundwater level were shown (Figure 7a-c). In addition, due to the presence of two-story buildings

in the landslide area, the building load was defined as 25 kN/m² for limit equilibrium analysis. As a result of the evaluation of the inclinometer measurements, the slip surface continues along the contact of the Gazhanedere Formation and Kirazlı Formation, which is located below the groundwater level.

Table 3. Test results.

Çizelge 3. Deneysel sonuçlar.

| Borehole No. | Sample No. | Depth (m) | Atterberg Limits | | | Soil Classification USCS | Moisture Content (%) |
|--------------|------------|-------------|------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------------|
| | | | LL (%) | PL (%) | PI (%) | | |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 41,8 | 21,6 | 20,2 | CL | 15,2 |
| | UD-2 | 5,50-6,00 | 39,1 | 29,2 | 9,9 | CL | 28,7 |
| | UD-3 | 8,50-9,00 | 42,7 | 22,5 | 20,2 | CL | 41,3 |
| BH-1 | CORE | 10,50-14,00 | 47,3 | 22,6 | 24,7 | CL | 17,7 |
| | SPT-8 | 12,00-12,45 | 38,7 | 21,2 | 17,5 | CL | 26,6 |
| | SPT-9 | 15,00-15,45 | 36,7 | 15,3 | 21,4 | CL | 33,0 |
| | CORE | 15,20-20,00 | 46,2 | 22,5 | 23,7 | CL | 20,2 |

BACK ANALYSIS OF THE SLOPE FAILURE

For determining the shear strength parameters of landslide material at the time of failure by back analyses, LEM is the most widely used method (Chandler 1977; Hoek and Bray, 1981; Sonmez et al., 1998; Ulusay et al., 2001; Isık et al., 2004; Wyllie and Mah, 2004; Topal and Akin, 2009; Kayabasi and Gokceoglu, 2012; Topsakal and Topal, 2014; Ulusay et al., 2014; Topal and Hatipoglu, 2015; Kaya, 2017). In this method, to determine the $c-\phi$ pairs at the time of failure, one of the $c-\phi$ pairs is kept constant and the calculation is made. Thus, the $c-\phi$ pairs that ensure the limit equilibrium condition

(Factor of Safety, $F=1$) are determined. In order to determine the shear strength parameters along the failure surface at the time of the failure, back analyses were performed using three parallel slope sections in the direction of the landslide movement (Figure 2). The position of the slip surface in the sections was determined from the inclinometer measurements. The Janbu method was used for back analysis. The $c-\phi$ pair ($c=17$ kN/m², $\phi=4.7^\circ$) obtained as a result of back analysis (Figure 8) and the peak and residual $c-\phi$ pairs obtained as a result of the direct shear strength test in the laboratory (Table 4) were compared.

The cohesion value, one of the shear strength parameters calculated by back analysis, was compatible with the cohesion values for the residual shear strength parameters, but the internal friction angle value was different. This is explained by the fact that the undrained friction angle (ϕ) value of the clayey soil, which cannot be drained due to excessive precipitation and where pore water pressure increases, is smaller than the effective internal friction angle value (Craig 1992; Parry 1995; Bowles 1996; Teoman et al. 2004). Consequently, the Kirazlı Formation in static conditions had a safety coefficient of 1.0 as a result of the limit equilibrium analysis using the shear strength parameters ($c=17$ kN/m², $\phi=4.7^\circ$) determined by back analysis (Figure 9).

Although the FEM-SSR method has some limitations, it is widely used in current geotechnical applications. The biggest factor in this technique being a strong alternative to the traditional limit equilibrium method (LEM) is the hardware and software development of computer technology. In the last decades, FEM-SSR is used together with LEM in many studies (Isik et al. 2004; Teoman et al. 2004; Cheng et al. 2007; Topal Akin 2009; Topsakal and Topal 2015; Topal and Hatipoglu 2015; Alemdag et al. 2015; Tschuchnigg et al. 2015; Kaya et al. 2016; Kaya 2017). As a result of the comparison of the factors of safety (FOS) obtained from FEM-SSR and LEM in these studies, the factors of safety were generally similar (Chen et al., 2007). In the

FEM-SSR method, unlike the LEM method, the elastic parameters of the soil, in-situ stresses and material weight are also taken into account. PHASE 8.0 (Rocscience Inc., 2011) package program was used for FEM-SSR analysis to investigate the stability of the landslide in the study area. In addition, in the FEM-SSR method, the definition of strength factor reduction (SRF) is used instead of the factor of safety (FOS).

The dynamic elastic parameters (E_{dyn} and u_{dyn}), input parameters for the FEM-SSR method, were determined by using the seismic refraction method from the geophysical studies conducted by Buyuksarac et al. (2015) in the landslide area. Part of the report prepared by Buyuksarac et al. (2015) was published in a study called Canakkale Landslides, prepared by Yigitbas et al. (2016). Data for three seismic profiles with a total length of 330 m in the landslide area were taken from the Canakkale Landslides study. The locations of the seismic profiles are shown in Figs. 1 and 2. When the data obtained as a result of seismic refraction studies were examined, three different layers were determined with the help of three seismic profiles. The mean primary-wave (V_p) and secondary wave (V_s) velocities for the Kirazlı Formation, Kirazlı Formation (saturated) and Gazhanedere Formation in these layers in the study area were found to be 450, 750, and 1150, and 175, 270, and 360 m/s, respectively (Table 5).

Table 3. Test results (continued)*Çizelge 3. Deney sonuçları (devam ediyor).*

| Borehole No. | Sample No. | Depth (m) | Atterberg Limits | | | Soil Classification USCS | Moisture Content (%) |
|--------------|------------|-------------|------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------------|
| | | | LL (%) | PL (%) | PI (%) | | |
| BH-1 | SPT-10 | 19,50-19,95 | 33,0 | 17,5 | 15,5 | SC | 33,5 |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 43,9 | 20,2 | 23,7 | CL | 20,8 |
| | UD-2 | 5,75-6,50 | 73,9 | 28,4 | 45,5 | CH | 21,8 |
| | UD-3 | 8,50-9,00 | 61,8 | 27,8 | 34,0 | CH | 19,3 |
| | SPT-7 | 10,50-10,95 | 33,5 | 17,6 | 15,9 | CL | 22,9 |
| BH-2 | CORE | 12,50-13,50 | 45,8 | 20,6 | 25,2 | CL | 21,3 |
| | UD-4 | 14,50-15,00 | 46,6 | 21,5 | 25,1 | CL | 39,6 |
| | SPT-10 | 15,00-15,45 | 47,6 | 24,5 | 23,1 | CL | 43,2 |
| | SPT-11 | 16,50-16,95 | 33,5 | 19,7 | 13,8 | CL | 38,3 |
| | SPT-12 | 18,00-18,45 | 57,3 | 18,3 | 39,0 | CH | 25,3 |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 69,8 | 28,5 | 41,3 | CH | 20,7 |
| | SPT-2 | 3,00-3,45 | 61,3 | 25,5 | 35,8 | CH | 24,2 |
| | UD-2 | 5,50-6,00 | 56,3 | 25,6 | 30,7 | CH | 25,5 |
| BH-3 | UD-3 | 8,50-9,00 | 62,6 | 27,4 | 35,2 | CH | 23,8 |
| | SPT-7 | 10,50-10,95 | 41,1 | 22,6 | 18,5 | CL | 24,9 |
| | UD-4 | 11,50-12,00 | 47,1 | 25,5 | 21,6 | CL | 22,7 |
| | SPT-10 | 15,00-15,45 | 37,1 | 18,4 | 18,7 | CL | 23,3 |
| | CORE | 16,50-19,00 | 48,5 | 23,5 | 25,0 | CL | 19,5 |
| | SPT-11 | 19,50-19,95 | 45,2 | 25,2 | 20,0 | CL | 24,5 |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 42,0 | 28,5 | 13,5 | ML | 13,6 |
| BH-4 | UD-2 | 5,50-6,00 | 35,4 | 18,5 | 16,9 | CL | 30,7 |
| | UD-3 | 8,50-9,00 | 29,3 | 17,6 | 11,7 | SC | 16,1 |
| | UD-4 | 11,50-12,00 | 33,2 | 28,5 | 4,7 | SM | 21,6 |
| | SPT-10 | 15,00-15,45 | 36,6 | 19,5 | 17,1 | CL | 34,6 |

Table 3. Test results (continued)*Çizelge 3. Deney sonuçları (devam ediyor).*

| Borehole No. | Sample No. | Depth (m) | Atterberg Limits | | | Soil Classification USCS | Moisture Content (%) |
|--------------|------------|-------------|------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------------|
| | | | LL (%) | PL (%) | PI (%) | | |
| BH-4 | SPT-12 | 18,00-18,45 | 35,9 | 19,4 | 16,5 | CL | 33,6 |
| | SPT-14 | 24,00-24,45 | 34,9 | 17,7 | 17,2 | CL | 31,7 |
| | SPT-5 | 7,50-7,95 | 42,6 | 21,3 | 21,3 | CL | 14,8 |
| BH-5 | UD-4 | 11,50-11,80 | 40,0 | 20,5 | 19,5 | CL | 25,6 |
| | SPT-9 | 13,50-13,95 | 46,1 | 20,5 | 25,6 | CL | 33,1 |
| | SPT-10 | 15,00-15,45 | 37,0 | 18,5 | 18,5 | CL | 35,8 |
| BH-6 | UD-1 | 2,50-3,00 | 65,7 | 28,6 | 37,1 | CH | 17,7 |
| | UD-2 | 5,50-6,00 | 63,9 | 27,5 | 36,4 | CH | 21,4 |
| | SPT-4 | 6,00-6,45 | 64,1 | 27,4 | 36,7 | CH | 23,7 |
| | UD-3 | 8,50-9,00 | 71,4 | 30,7 | 40,7 | CH | 20,1 |
| | SPT-7 | 10,50-10,95 | 57,3 | 25,7 | 31,6 | CH | 24,4 |
| | SPT-8 | 12,00-12,45 | 57,5 | 24,7 | 32,8 | CH | 21,7 |
| | CORE | 18,00-19,50 | 63,8 | 26,3 | 37,5 | CH | 22,7 |
| | CORE | 19,50-21,00 | 48,3 | 25,3 | 23,0 | CL | 13,9 |
| | CORE | 23,00-24,00 | 62,2 | 25,4 | 36,8 | CH | 20,9 |
| | CORE | 25,00-27,00 | 59,2 | 30,3 | 28,9 | CH | 30,1 |
| BH-7 | CORE | 27,00-28,50 | 67,8 | 28,1 | 39,7 | CH | 24,5 |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 59,9 | 25,5 | 34,4 | CH | 30,3 |
| | SPT-4 | 6,00-6,45 | 36,1 | 18,7 | 17,4 | CL | 13,7 |
| | UD-2 | 8,50-9,00 | 72,8 | 27,6 | 45,2 | CH | 21,7 |
| | SPT-7 | 10,50-10,95 | 58,9 | 28,6 | 30,3 | CH | 22,1 |
| | SPT-9 | 13,50-13,70 | 64,2 | 27,7 | 36,5 | CH | 24,1 |
| | SPT-10 | 15,00-15,25 | 47,9 | 24,6 | 23,3 | CL | 22,4 |
| | CORE | 16,00-16,50 | 48,2 | 25,4 | 22,8 | CL | 22,0 |

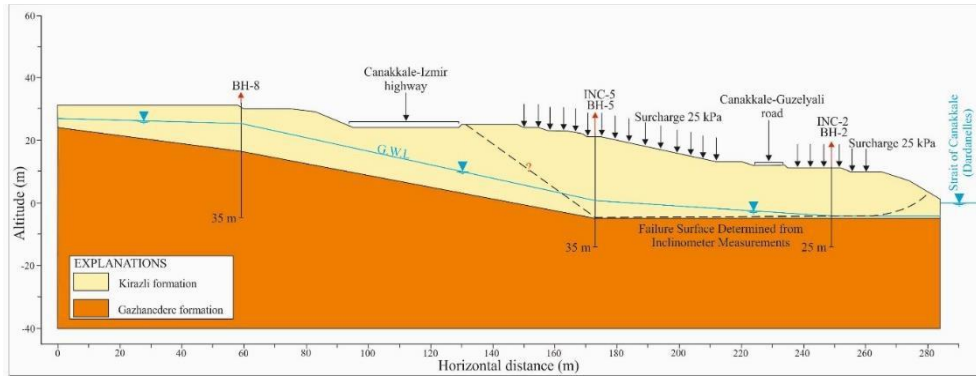
Table 3. Test results (continued)**Çizelge 3.** Deney sonuçları (devam ediyor).

| Borehole No. | Sample No. | Depth (m) | Atterberg Limits | | | Soil Classification | Moisture Content (%) |
|--------------|------------|-------------|------------------|--------|--------|---------------------|----------------------|
| | | | LL (%) | PL (%) | PI (%) | USCS | |
| BH-7 | CORE | 18,00-19,50 | 72,9 | 28,5 | 44,4 | CH | 16,4 |
| | CORE | 28,50-30,00 | 68,7 | 27,5 | 41,2 | CH | 15,9 |
| | UD-1 | 2,50-3,00 | 55,6 | 20,7 | 34,9 | CH | 17,5 |
| | SPT-3 | 4,50-4,95 | 62,3 | 27,0 | 35,3 | CH | 32,0 |
| | UD-2 | 5,50-6,00 | 72,3 | 27,3 | 45,0 | CH | 27,4 |
| BH-8 | SPT-5 | 7,50-7,95 | 41,1 | 27,0 | 14,1 | ML | 19,0 |
| | CORE | 8,70-9,00 | 68,7 | 27,4 | 41,3 | CH | 21,6 |
| | UD-3 | 12,00-12,50 | 69,3 | 28,4 | 40,9 | CH | 31,8 |
| | CORE | 17,00-17,50 | 69,7 | 31,4 | 38,3 | CH | 18,2 |
| | CORE | 23,00-24,00 | 57,5 | 26,6 | 30,9 | CH | 27,1 |
| | CORE | 28,00-28,50 | 43,3 | 24,6 | 18,7 | CL | 24,9 |
| | CORE | 33,00-33,50 | 73,0 | 28,0 | 45,0 | CH | 29,8 |

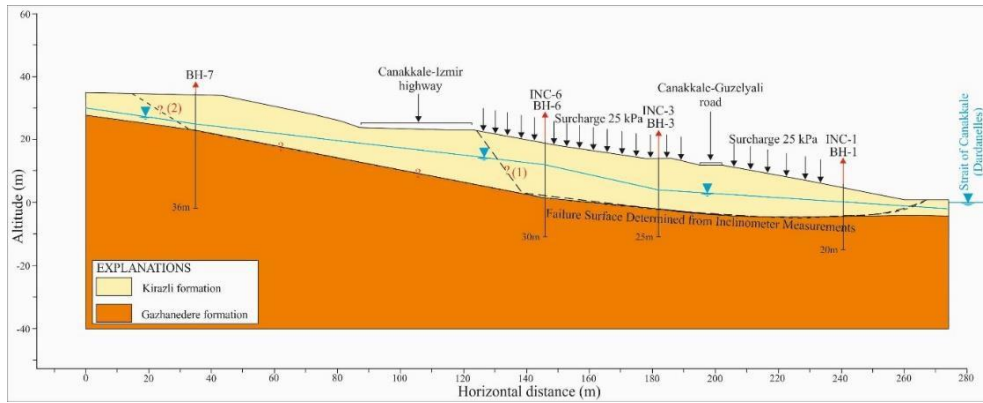
Table 4. Geotechnical properties of the formations.**Çizelge 4.** Formasyonların jeoteknik özellikleri.

| Formation Name | γ_n (kN/m ³) | γ_s (kN/m ³) | Direct Shear Strength | | | | q_u (kN/m ²) |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| | | | Peak Strength | | Residual Strength | | |
| | | | c (average) (kN/m ²) | ϕ (average) (°) | c (average) (kN/m ²) | ϕ (average) (°) | |
| Kirazli formation | 18.5 | 19 | 36.9 – 15.4 (27.2) | 30 – 23.6 (26.7) | 19.6 – 7.6 (15.3) | 21 – 13.9 (17.3) | - |
| Gazhanedere formation | 18.5 | 19 | - | - | - | - | 221.5 – 176.4 (196.5) |

(a)



(b)



(c)

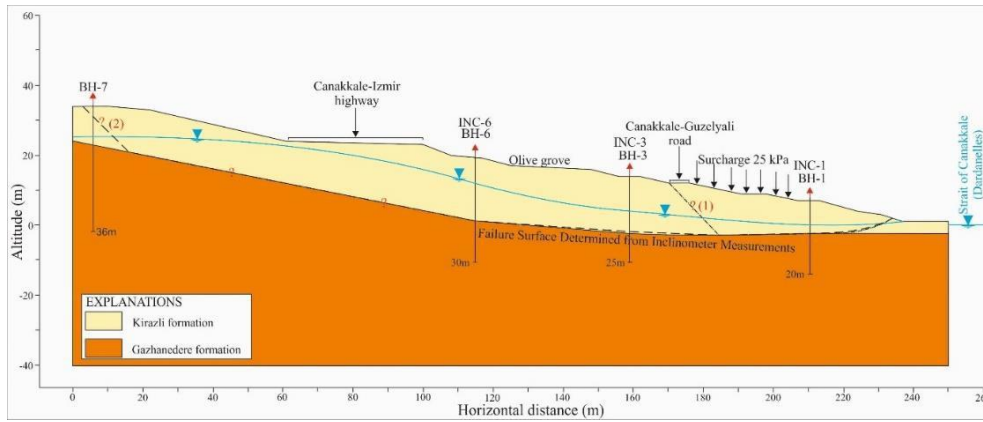


Figure 7. Cross-sections of landslide along section lines a) 1-1', b) 2-2', c) 3-3'.

Şekil 7. Kesit hatları boyunca heyelanın enine kesitleri a) 1-1', b) 2-2', c) 3-3'

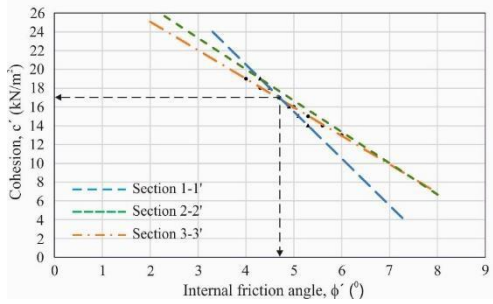


Figure 8. c' - ϕ' pairs at the time of failure with back analysis.

Şekil 8. Geriye dönük analizlerle yenilme anındaki c' - ϕ' çifti.

The obtained velocities (V_p and V_s) were used as input parameters in the following equation suggested by Bowles (1996), and the dynamic elastic parameters (E_{dyn} and v_{dyn}) of the

landslide zone were calculated. E_{dyn} and v_{dyn} are given by Equation 1 and Equation 2.

$$E_{dyn} = G \left[\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right] \quad (1)$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

where V_p : primary-wave velocity (m/s), V_s : secondary-wave velocity (m/s), and G : shear modulus (kN/m^2).

In this study, it is assumed that the material in the landslide area will have elasto-plastic strength and will fail in accordance with the Mohr-Coulomb failure criterion. In the analyses made using the FEM-SSR method, the SRF value was found to be 1.01-1.05 (Figure 9).

Table 5. Material parameters used in finite element method analysis.

Çizelge 5. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.

| Formation Name | Strength type | Material type | Elastic type | V_p (m/s) | V_s (m/s) | Young's modulus (MPa) | Poisson's ratio |
|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| Kirazli formation | Mohr-Coulomb | Plastic | Isotropic | 350-550 (450) | 150-195 (175) | 162.09 | 0.41 |
| Kirazli formation (saturated) | Mohr-Coulomb | Plastic | Isotropic | 650-900 (750) | 264-274 (270) | 402.55 | 0.43 |
| Gazhanedere formation | Mohr-Coulomb | Plastic | Isotropic | 1045-1200 (1150) | 345-382 (360) | 702.84 | 0.45 |

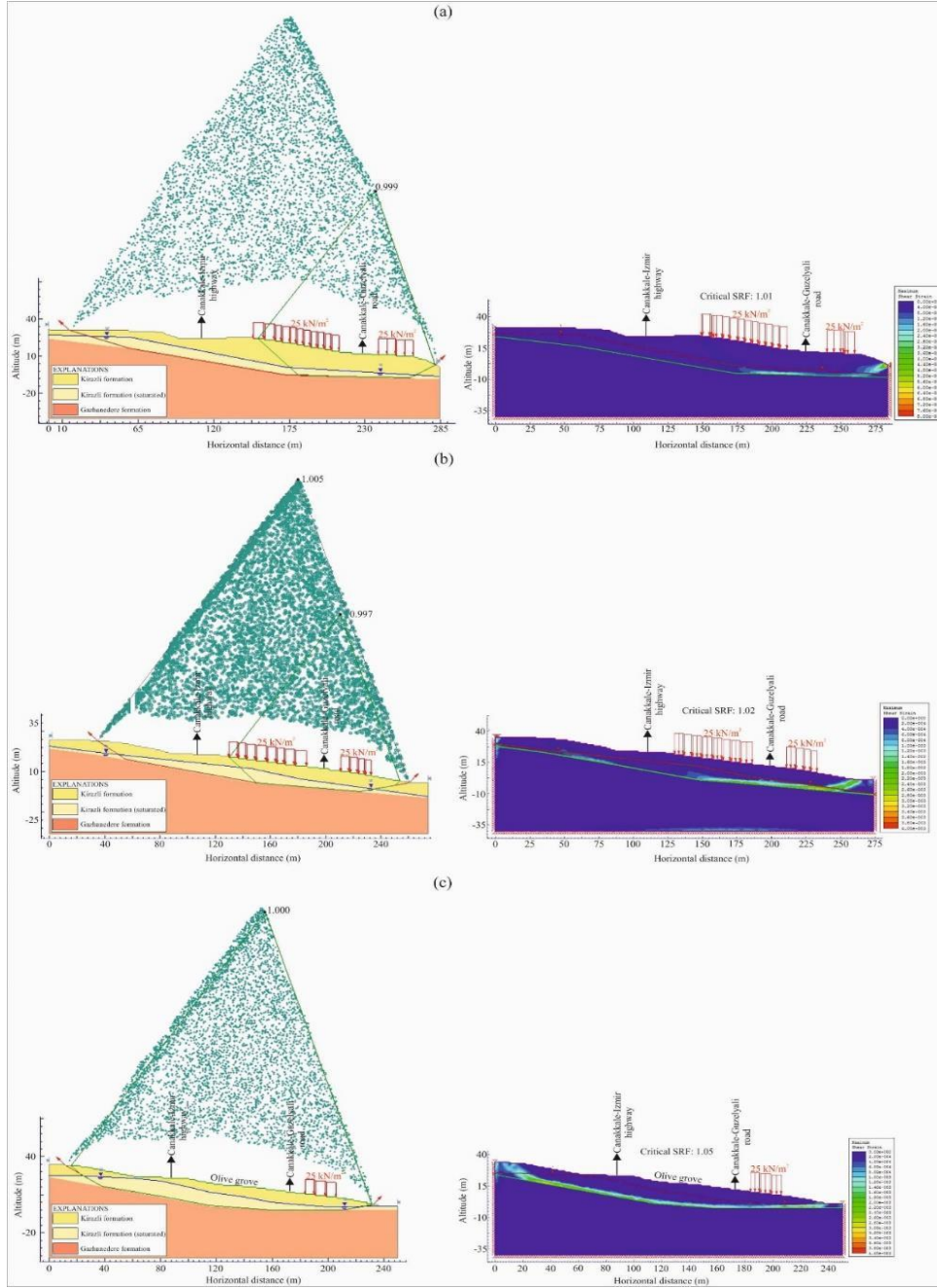


Figure 9. Back analysis results for a) 1-1', b) 2-2' and c) 3-3' cross-sections using LEM and FEM-SSR methods.

Şekil 9. LEM ve FEM-SSR yöntemleri kullanılarak a) 1-1', b) 2-2' and c) 3-3' kesitleri için geriye dönük analizler.

REMEDICATION OF THE GUZELYALI LANDSLIDE

In the literature, there are different applications for the solution of landslide problems, with the aim of reducing driving forces and increasing resisting forces (Turner and Schuster 1996; Topal and Akin 2009; Chowdhury 2010; Fahimifar et al. 2014; Tunusluoglu 2014). Suggestions for slowing down and preventing the Guzelyali landslide can be listed below.

The surface waters collected through the surface drainage system and surface drainage canals built on the Canakkale-Izmir highway and surroundings and the Canakkale-Guzelyali road should be directed towards the Canakkale Strait (Dardanelles). Thus, the surface waters that infiltrate the landslide area will be reduced and the speed of the landslide will be slowed down. However, to prevent the landslide completely, additional reinforcement work should be done in the region.

Due to the intense construction in the landslide area, land use is extremely limited. In addition, the slip surface passes an average of 18 meters below the surface. For these reasons, it was decided that strengthening with micro piles would be a more reliable and economical reinforcement method in order to stabilize the landslide area. Limit equilibrium (LEM) analyses were used to ensure the stability of the region by safely countering the lateral active forces with micro piles.

The Turkish General Directorate of Highways, in the stability analysis of road slopes, accepts the factor of safety value of 1.5 and higher values as safe for static situations, while the values of 1.1 and higher are considered safe for dynamic situations (General Directorate of Highways 2012). In order to stay on the safe side in this study, values of 1.2 and higher were accepted as safe. Marcuson and Franklin (1983) suggested taking 1/3-1/2 of the peak horizontal ground acceleration (PHGA) value measured in the region to determine the horizontal ground acceleration value used in

stability analysis. Isik et al. (2004) used 1/3 of the PHGA value. However, Topal and Akin (2009) used 1/2 of the PHGA value, staying on the conservative side in long-term slope stability analyses. The PHGA value determined for the study area in the Turkey Earthquake Hazard Map prepared by AFAD (2018) is 0.296 g. In this study, 0.15 g, half of the PHGA value, was used for the long-term slope stability analysis by staying on the conservative side. Although the PHGA value determined by AFAD was used in this study, sensitivity analyses were also performed using different PGHA values for each cross-section line. According to the sensitivity analysis results given in Figure 10, if the values of 0.175 g for cross-section-1 and cross-section-2 and 0.173 g for cross-section-3 are exceeded, the shear strength capacities of the micro piles will be exceeded and failure will be possible.

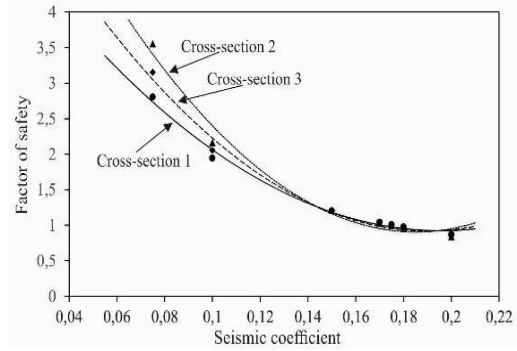


Figure 10. Sensitivity analysis results for the three slope cross-sections stabilized in dynamic conditions by micro-piles.

Şekil 10. Mikro kazıklarla dinamik koşullarda stabilize edilmiş üç şevin enine kesitleri için duyarlılık analizi sonuçları.

In order to ensure the stability of the landslide zone, the LEM analysis method was performed under dynamic conditions by using three cross-section lines. As a result of the LEM analyses for cross-section 1-1', the shear strength capacities of the micro piles designed for the Canakkale- Guzelyali road and the toe region of the landslide should be at least 3450 kN and 4000 kN, respectively. As a result of the LEM

analyses for cross-section 2-2' and cross-section 3-3', the region will be stable if the shear strength capacities of micro piles designed for the Canakkale-Izmir highway, the Canakkale-Guzelyali road and the toe region of the landslide are at least 1900 kN, 3450 kN, 4000 kN and 1500 kN, 3450 kN, 4000 kN, respectively (Figure 11).

DISCUSSION

It was concluded that the main triggering factor for landslides around Guzelyali village from past to present is excessive precipitation, and other triggering factors are anthropological mistakes and excessive construction. The gentle slope of the study area is between 0-15° and the dominant slope shape changes from convex to concave. A rugged landslide topography has developed in the region. Due to the inability to drain surface waters, especially on concave slopes, the surface waters infiltrating the Kirazli Formation cause pore water pressure to increase, which leads to a decrease in the shear strength of the soil material. Since the study area is located in a coniferous pine forest, drying cracks occur on the ground as a result of tree roots absorbing ground water, especially in summer. In addition, tree roots increase the soil's permeability and the infiltration capacity of surface waters (Greenway, 1987). As a result of heavy rains, the surface waters infiltrate towards the claystone and white-colored marl forming the upper layer of the Gazhanedere Formation from the sandstone and silty units of the Kirazli Formation that forms the study area and the cracks seen on the surface. It is thought that the Kirazli Formation started to

move in the direction of slope along the plane formed by the contact of the two formations and caused a landslide. This is also consistent with the inclinometer results.

The classical limit equilibrium method (LEM) and the finite element method (FEM-SSR) were used together to investigate the slope stability of the Guzelyali landslide area. In the back analysis for cross-section 2-2' using the FEM-SSR method, an intense decrease was observed in the shear strength of the soil in the region between BH-6 and BH-1. It was also observed that the shear strength of the soil in the BH-7 drilling site decreased. This showed that there are two different weakness planes. However, in the LEM analysis, movement will occur along a single weakness plane with a factor of safety 0.997. Considering two different slip surfaces obtained as a result of the FEM-SSR method, detailed the LEM analysis was made and the other slip surface (FOS=1.005) was found.

The landslide movement velocities obtained by inclinometer measurements were compared with the landslide velocity classification prepared by Cruden and Varnes (1996) and it was determined that the Guzelyali landslide was in the very slow velocity class. In addition, in the landslide velocity classification, it is stated that people living in regions where landslides are very slow will continue to live in their existing structures by maintaining their homes. This is exactly the case in the Guzelyali landslide region, and people living in the region continue to live in the landslide area by having their houses and gardens repaired every year.

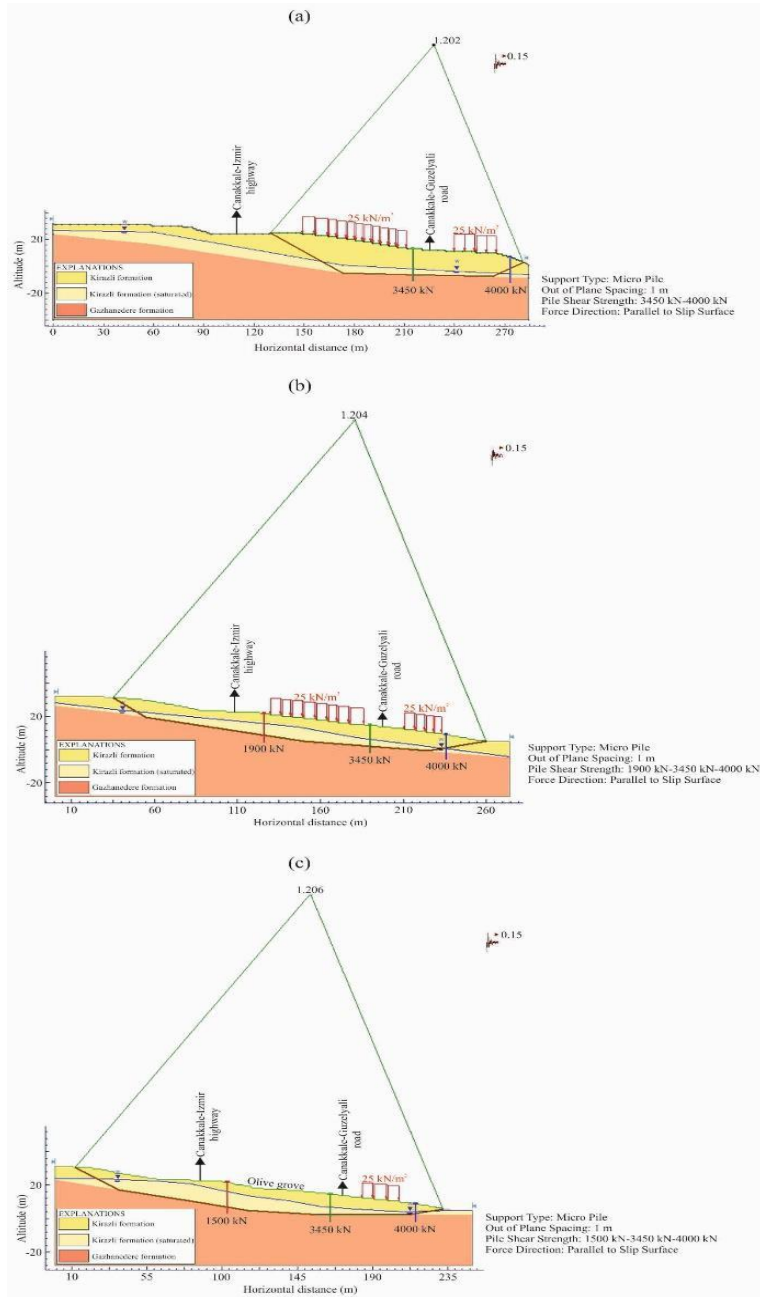


Figure 11. Remediation of the landslide area with micro piles by performing LEM analysis under pseudo-static condition a) 1-1', b) 2-2' and c) 3-3' cross sections.

Şekil 11. Pseudostatik koşullar altında LEM analizi yapılarak heyelan bölgesinin mikro kazıklar ile iyileştirilmesi a) 1-1', b) 2-2' ve c) 3-3' kesitler.

CONCLUSIONS

In this study, the failure mechanism of the landslide affecting part of Guzelyali village in Canakkale province was investigated by the limit equilibrium method and the finite element method. Detailed field and laboratory studies were carried out in the region after the landslide. The results obtained from these studies and analyses can be summarized as follows;

- (a) The landslides in the region until the present day were generally triggered by excessive precipitation. The precipitation amounts falling in December 2012 and January and February 2013 were approximately twice the average for the same months between 1960 and 2020. This situation increases the possibility that the groundwater level in the landslide area rose compared to its current position. For this reason, it is recommended to install systems to ensure surface water drainage in the landslide area.
- (b) To evaluate the instability, field observations, drilling studies, index and mechanical tests and inclinometer measurements were carried out. With the inclinometer studies, the depth of the slip zone was determined to be between 6.5 and 25 meters. According to the inclinometer measurement data, the landslide progresses very slowly (0.16-0.08 mm/day) in BH-6, BH-5 and BH-3 drilling regions, and accelerates (1.58-1.74 mm/day) in BH-1 and BH-2 drilling regions.
- (c) Within the scope of remedial studies, the stability of the landslide area can be ensured with micro-pile designs.
- (d) This study revealed that using the FEM-SSR method, in addition to LEM analyses, is a useful method for determining possible weakness planes and, thus, reliable and

realistic precautions in slope stability studies.

- (e) It is recommended that there should not be any construction in the landslide area in the coming years. Every structure built in the landslide area will increase the driving forces and decrease the factor of safety. This may cause the Guzelyali landslide to reactivate.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to express their gratitude to the municipality of Canakkale for the information and the logs of geotechnical boreholes.

REFERENCES

- AFAD (Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency) 2018. The earthquake hazard map of Turkey, interactive web applications (<https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>). (Accessed 24 November 2021)
- Alemdag, S., Kaya, A., Karadag, M., Gurocak, Z., Bulut, F., 2015. Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi District (NE Turkey). *Journal of African Earth Sciences* 106:134–146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.010>
- Bowles, J., 1996. *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York.
- Buyuksarac, A., Bekler, T., Yalciner, CC., Karaca, O., Ekinci, Y.L., Alper. D., 2015. Geological and geotechnical investigation project report of Guzelyali Village settlement area prepared for Canakkale Municipality and Revealing the Behavior of Canakkale Guzelyali Landslides and

- Investigation of Performance-Based Solution Possibilities, p 155. (in Turkish) <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.011>
- Chandler, R.J., 1977. Back analysis techniques for slope stabilisation works: a case record. *Geotechnique* 27:479–495. <https://doi.org/10.1680/geot.1977.27.4.479>
- Cheng, Y.M., Lansivaara, T., Wei, W.B., 2007. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics* 34:137-150. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>
- Chowdhury, R., 2010. *Geotechnical Slope Analysis*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Craig, R.F., 1992. *Soil mechanics*. Chapman and Hall, London.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. *Landslide Types and Processes*. In: Turner AK, Schuster RL (ed) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report, pp 36-75.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (North of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 41, 720–730. <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0454-2>
- Fahimifar, A., Abdolmaleki, A., Soltani, P., 2014. Stabilization of rock slopes using geogrid boxes. *Arab J Geosci* 7:609-621. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0755-7>
- Greenway, D.R., 1987. *Vegetation and Slope Stability*. In: *Slope Stability*, MG Anderson and KS Richards (ed). John Wiley, Newyork, pp 187-230.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Can, T., 2005. The March 17, 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology* 81(1):65-83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.011>
- Gurbuz, C., Aktar, M., Eyidogan, H., Cisternas, A., Haessler, H., Barka, A., Ergin, M., Turkelli, N., Polat, O., Ucer, S.B., Kuleli, S., Baris, S., Kaypak, B., Bekler, T., Zor, E., Bicmen, F., Yoruk, A. 2000. The seismotectonics of the Marmara region (Turkey): results from a microseismic experiment. *Tectonophysics* 316:1–17.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31:181–216.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock slope engineering*, 3rd edn. Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons Ltd.
- Isik, N.S., Doyuran, V., Ulusay, R., 2004. Assessment of a coastal landslide subjected to building loads at Sinop, Black Sea region, Turkey, and stabilization measures. *Engineering Geology* 75, 69-88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.002>
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., 2012. Coal mining under difficult geological conditions: The Can lignite open pit (Canakkale, Turkey). *Engineering Geology* 135-136, 66-82. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.03.008>
- Kaya, A., Akgun, A., Karaman, K., Bulut, F., 2016. Understanding the mechanism of a slope failure on nearby a highway tunnel route by different slope stability analysis methods: a case from NE Turkey. *Bull Eng Geol Environ*, 75:945-958. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0770-5>
- Kaya, A., 2017. Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale

- residential area (Giresun, NE Turkey). *Bull Eng Geol Environ* 76:875-889. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0896-0>
- KGM (General Directorate of Highways), 2012. Technical specification for highway roadside engineering structures. (in Turkish)
- Marcuson, W.F., Franklin, A.G., 1983. Analysis and remedial measures to improve the stability of existing dams. In: Howard TR (ed) *Seismic design of embankments and caverns*. ASCE, New York.
- Parry, R.H.G., 1995. *Mohr circles, Stress Paths and Geotechnics*. E & FN Spon, An Imprint of Chapman & Hall, London.
- Rocscience, 2011. PHASE2 Version 8.0 - Finite element analysis for excavations and slopes. Rocsciences Inc, Toronto.
- Rocscience, 2012. SLIDE Version 6.0 – 2D limit equilibrium slope stability analysis, Rocsciences Inc, Toronto.
- Siyako, M., 2006. Thracian Basin Tertiary rock units. *Stratigraphy Committee Lithostratigraphic Units Series-2*, pp 43–83. (in Turkish).
- Sonmez, H., Ulusay, R., Gokceoglu, C., 1998. A practical procedure for the back analysis of slope failures in closely jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstracts* 35 (2), 219–233.
- Tatar, O., Perincek, D., Koksall, O., Buyuksarac, A., Berilgen, M., Bekler, T., Tunusluoglu, M.C., Yalciner, C.C., Ekinci, Y.L., Demirci, A., 2011. Geological, Geophysical, Geotechnical and Building Survey Report of the Landslide Occurred on 14 July 2011 at the Gendarme General Command Canakkale Special Education Center Command Facilities, p 231. (in Turkish)
- Teoman, M.B., Topal, T., Isik, N.S., 2004. Assessment of slope stability in Ankara clay: a case study along E90 highway. *Environmental Geology* 45:963–977. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0954-3>
- Topal, T., Akin, M., 2009. Geotechnical assessment of a landslide along a natural gas pipeline for possible remediations (Karacabey-Turkey). *Environmental Geology* 57(3):611–620. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1330-0>
- Topsakal, E., Topal, T., 2015. Slope stability assessment of a reactivated landslide on the Artvin-Savsat junction of a provincial road in Meydancik, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences* 8(3):1769–1786. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1210-0>
- Topal, T., Hatipoglu, O., 2015. Assessment of slope stability and monitoring of a landslide in the Koyulhisar settlement area (Sivas, Turkey). *Environmental Earth Sciences* 74:4507-4522. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4476-6>
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H.F., Sloan, S.W., 2015. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history. *Computers and Geotechnics* 70:178-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.07.019>
- Tunusluoglu, M.C., Karaca, O., Baba, A., 2009. Evaluation of Mass Movement at South-West of Canakkale City (Guzelyali). 62nd Geological Congress of Turkey, Proceedings Book, p 406-407. (in Turkish)
- Tunusluoglu, M.C., 2014. Assessment of the instability mechanism of spillway with reference to an earthfill dam in the Northwest Turkey. *Arab J Geosci* 7(1):407–418. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0780-6>

- Tunusluoglu, M.C., Karaca, O., 2018. Geotechnical Assessment of Guzelyali Landslide (Canakkale). 71st Geological Congress of Turkey, Proceedings Book, p 419-420. (in Turkish)
- Turner, A.K., Schuster, R.L., 1996. Landslides, Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Tuncay, E., 2001. Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoglu coal mine and possible remedial measures. *Environmental Geology* 40 (6), 769-786.
- Ulusay, R., Ekmekci, M., Tuncay, E., Hasancebi, N., 2014. Improvement of slope stability based on integrated geotechnical evaluations and hydrogeological conceptualisation at a lignite open pit. *Engineering Geology* 181, 261-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.005>
- Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004. Rock slope engineering: civil and mining, 4th edn. Spon Press, Taylor & Francis Group, London and New York.
- Yigitbas, E., Baba, A., Yilmazer, I., Bozcu, M., Deniz, O., Kurcer, A., Kaya, M.A., Sengul, E., Ekinici, Y., Kose, K., 2005. Guzelyali (Canakkale) Landslide Survey Report in Northeastern Section of Map 27J, p 122. (in Turkish)
- Yigitbas, E., Baba, A., Tunusluoglu, M.C., Karaca, O., 2008. Geological and Geotechnical Investigation Report of the Landslide Occurring at the Gendarme General Command Canakkale Special Education Center Command Facilities. Canakkale Onsekiz Mart University Environmental Problems Research and Application Center, p 41. (in Turkish)
- Yigitbas, E., Bekler, T., Demirci, A., Ekinici, Y.L., Tunusluoglu, M.C., Karaca, O., Alkan, Z., Zirek, I., Yalciner, C.C., Buyuksarac, A., Kurban, Y.C., Oztoprak, S., Arslan, B., Eyisuren, O., 2016. Canakkale Landslides, p 190. (in Turkish)



Makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak Türkiye'nin kuzeybatısı için deprem tahmini

Earthquake prediction for the northwest of Turkey with machine learning methods

AYHAN DOĞAN ^{1*} 

¹ Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Ankara, Türkiye

Geliş (received): 10 Haziran (June) 2023 Kabul (accepted): 15 Ağustos (August) 2023

ÖZ

Depremleri önceden tahmin edebilmek insan yaşamı ve konforu için önemli bir konu olmuştur. Ancak karmaşık bir mekanizmaya sahip olan depremler günümüz bilgi ve teknolojisi ile henüz tahmin edilememektedir. Geçmişte depremleri tahmin edebilmek için farklı yöntemler kullanılırken son zamanlarda yapay zeka yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte, deprem tahminleri yapabilmek için bu yöntemler de kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada Türkiye'nin kuzeybatı bölgesinde gelecekte olma ihtimali bulunan, 6 ve üzeri büyüklükteki depremlerin odak koordinatları ve odak derinlikleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırmalı olarak altı farklı makine öğrenimi yöntemi (Destek Vektör Makineleri, Gradient Boost, Elastic Net, Bayesian Ridge ve XGBoost) kullanılmış ve tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar RMSE, MAE ve Düzeltilmiş R² performans metrikleriyle değerlendirilmiştir. Tahmin sonuçları gelecekte Türkiye'nin kuzeybatı bölgesinde Bursa ili sınırları içerisinde İznik Gölü'nün kuzeyinden başlayarak batıya doğru Ekinli, İmralı adasının kuzeybatısı, Avşa adasının kuzeyi ve Marmara adasının kuzeybatısında 6 ve üzerinde depremler olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenimi, Deprem tahmini, Türkiye'nin kuzeybatısı, Odak konumu, Odak derinliği

ABSTRACT

Being able to predict earthquakes has been an important issue for human life and comfort. However, earthquakes with complex mechanisms are quite difficult to predict. While different methods were used to predict earthquakes in the past, these methods have recently been used to make earthquake predictions with the developments in artificial intelligence methods. In this study, the focal coordinates and focal depths of earthquakes with a magnitude of 6 and above, likely to occur in the northwestern region of Turkey, were tried to be estimated. This study used six different machine learning methods (Support Vector Machines, Gradient Boost, Elastic Net, Bayesian Ridge and XGBoost) and compared the prediction results. Results were evaluated with RMSE, MAE, and Adjusted R² performance metrics. The estimation results show that earthquakes of 6 or more may occur in the future in the northwestern region of Turkey, within the borders of

Bursa province, starting from the north of Lake Iznik and going westwards in Ekinli, northwest of İmralı island, north of Avşa island and northwest of Marmara island.

Keywords: Machine learning, Earthquake prediction, Northwest of Turkey, Hypocenter location, Hypocenter depth

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1325321>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: aydogan@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

Depremler çok eski zamanlardan bu yana insan yaşamını etkileyen çok önemli doğal olaylardan biridir. Bazı araştırmacılar depremin önceden tahmin edilemeyeceğini söylerken (Geller vd., 1997), bazıları ise tahmin edilebilir bir olay olduğunu ileri sürmüşlerdir (Brehm ve Braile, 1998; Kirschvink, 2000; Knopoff, 2000). Geçmişten bu güne depremin tahmin edilebilmesi amacıyla çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Önceleri hayvan davranışları ve diğer doğa olayları gözlemlenmiş ve bunlar anlamlandırılmaya çalışılmıştır (Rikitake, 1968; Barsukov vd., 1984; Kirschvink, 2000). Bilimsel gelişmelerle birlikte radon gazı ölçümleri, sismik ve elektromanyetik yöntemler başta olmak üzere çeşitli bilimsel yöntemler kullanılarak depremler önceden tahmin edilmeye çalışılmaktadır (Whitcomb vd., 1973; Zmazek vd., 2003; Kùlahcı vd., 2009; Moustra vd., 2011). Ancak şimdiye kadar yapılan çalışmalar genellikle depremi çok kısa süre öncesinde bazı belirtiler ortaya çıktıktan sonra olasılıklı olarak tahmin edebilmektedir (Hayakawa ve Hobara, 2010). Depremde P dalgası birincil dalga olduğundan deprem kayıt istasyonlarına ilk önce bu dalgalar ulaşır ve daha yıkıcı etkiye sahip olan S dalgası ise daha sonra ulaşır. Bu iki dalganın ilerleme hızı arasındaki kısa zaman farkı depremler için uyarı ve acil tedbir amaçlı kullanılabilir. Tüm bunlarla birlikte bilim insanları depremin zamanını, odak konumunu, derinliğini ve büyüklüğünü saatler, günler hatta haftalar öncesinden tahmin edebilmek için yoğun bir

çaba sarf etmektedirler (Marzocchi vd., 2017; Michael vd., 2020). Son yıllarda yapay zeka algoritmalarındaki gelişmeler birçok alanda olduğu gibi deprem tahmini konusunda da umut vermekte olup, çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Alarifi vd. (2012) çalışmalarında kuzey Kızıldeniz bölgesinde yapay sinir ağı kullanılarak deprem büyüklüğü tahmini yapmışlardır. Panakkat ve Adeli (2007) çoklu deprem belirteci kullanarak deprem büyüklüğü tahmini için sinir ağı modelleri yapmışlar, Güney Kaliforniya ve San Francisco körfez bölgesi için bir ay sonra olabilecek depremin büyüklüğünü tahmin etmeye çalışmışlar, ancak sonuçlarda yüksek seviyede bir kesinlik bulunmadığını belirtmişlerdir. Kùlahcı vd. (2009) radon gazının değişimini izleyerek deprem tahmini için yapay sinir ağı modeli geliştirmişler ve bunu Doğu Anadolu Fay Sistemi'ndeki deprem tahmin sürecini modellemek için kullanmışlardır. Asencio-Cortés vd. (2017) yapay sinir ağları ile Tokyo'da büyüklüğü 5'in üzerindeki depremleri yedi günlük periyotta tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmada Gutenberg – Richter yasasına ait parametrelerle birlikte bazı sismik parametreler kullanılmıştır. Sonuçlar en yakın komşular destek vektör makinesi, bayes ağları ve karar ağaçları yöntemleriyle karşılaştırılmış ve genel olarak bu yöntemlerden daha başarılı sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Essam vd. (2021) Malezya için deprem tahmininde yapay sinir ağları (YSA) ve rastgele orman (RO) tekniklerinin güvenilirliğini

araştırmışlar, YSA yönteminin daha iyi tahmin performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bhatia vd. (2023) yapay zeka tabanlı gerçek zamanlı deprem büyüklüğü tahmini için Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemini ve özellik sınıflaması için uç katmana iletilen gerçek zamanlı sensör verilerini elde etmek amacıyla da yeni bir Bayes yöntemi kullanmakla birlikte, sonuçların kesinlik, duyarlılık ve özgünlük değerlerinin oldukça iyi olduğunu belirtmişlerdir. Shiuly vd. (2020) yapay sinir ağı ve genetik algoritma kullanılarak Himalaya bölgesi için en yüksek yer ivmesini (PGA) tahmin etmişler, sonuçların diğer zayıflama ilişkileri ile tutarlı olduğunu söylemişlerdir. Bazı çalışmalar ise laboratuvar deneylerine odaklanmıştır. Bu çalışmalarda laboratuvar deneylerinden elde ettikleri verileri kullanarak çeşitli yapay zeka yöntemleriyle depreme kalan süreyi ve depremle ilgili diğer konuları tahmin etmeye çalışmışlardır (Rouet-Leduc vd., 2017; Wang vd., 2022). Can vd. (2014) Türkiye'nin kuzeybatısında bulunan Bilecik'teki deprem tehlikesini tahmin etmek için Poisson gizli Markov modelini kullanmışlardır. Bu model ile 2013 ile 2047 yılları arasında büyüklüğü $M \geq 4$ olabilecek depremlerin yıllık frekanslarını tahmin etmişlerdir.

Bu çalışmada makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak Türkiye'nin kuzeybatı bölgesi için gelecekte olma ihtimali bulunan 6 ve üzeri büyüklükteki depremlerin odak koordinatları ve odak derinlikleri tahmin edilmektedir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak, karşılaştırmalı olarak önceki çalışmalarda birlikte veya hiç kullanılmayan makine öğrenimi yöntemleri kullanılmakta, tahmin sonuçları karşılaştırılmakta ve Türkiye'nin kuzeybatı bölgesi için farklı deprem tahminleri sunulmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak Türkiye'nin en etkin sismik aktivitelerinin bulunduğu kuzeybatı

bölgesi seçilmiştir. Çalışma alanı 39.423 - 42.147 Güney-Kuzey enlemleri ile 25.631-32.448 Batı-Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Harita üzerindeki kırmızı çerçeve içerisinde kalan alan çalışma alanını göstermektedir (Şeki11). Bu bölge sismik olarak aktif olan ve büyük depremler üretebilen Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve diğer bölgesel faylar üzerinde bulunmaktadır (Şeki12).

Veri

Çalışma alanı içerisinde 01.01.1900 ile 08.07.2023 tarihleri arasında meydana gelen 3 ve üzeri büyüklükteki depremlere ait katalog bilgileri Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) web sitesinden alınmıştır (USGS, 2023). Belirtilen büyüklük ve tarihler arasında toplam 2240 deprem verisi bulunmaktadır. Tüm veriler aletsel ölçümlere dayanmaktadır ve deprem oluş zamanı, deprem odak koordinatlarına ait enlem ve boylam, odak derinliği ve deprem büyüklüğü bilgilerini içermektedir. Kullanılan deprem verilerinin sıklığını gösteren histogram Şeki31 'te verilmektedir. 1970'li yıllardan itibaren deprem sayısında önemli bir artış görülmektedir. Bu artışın nedenleri arasında deprem kayıt istasyonlarının sayısındaki artışın da etkili olduğu düşünülmektedir. Bir diğer dikkat çeken durum ise 1990 ile 2010 yılları arasında deprem sayısındaki yüksek artışın, bu yıllardan sonra görece azalmasıdır. Çalışmada kullanılan deprem katalog bilgileri incelendiğinde Çizelge 1'de verilen değerler elde edilmektedir. Bu veriler ışığında, 1900-1970 yılları arasındaki yetmiş yıllık dönemde $M \geq 5$ ve üzeri büyüklükte deprem sayısı yıllık ortalama 0.99, 1971-1990 yılları arasındaki dönemde ortalama yıllık deprem sayısı 0.6, 1991-2010 yılları arasındaki dönemde ortalama yıllık deprem sayısı 1.1, 2011-2023 yılları arasındaki dönemde ortalama yıllık deprem sayısı 0.69'dur. Çalışma alanı içerisinde 1900 yılından bu yana USGS verilerine göre büyüklüğü 6 ve üzeri olan yirmi deprem meydana gelmiştir.

Bunlardan altı tanesinin büyüklüğü 7 ve üzeri olan 1912 Malkara ($M_w=7.23$), 1953 Gönen ($M_w=7.3$), 1957 Düzce ($M_w=7.09$), 1967 Hendek ($M_w=7.29$), 1999 Gölcük ($M_w=7.6$), 1999 Düzce ($M_w=7.2$) depremleridir.

Yöntem

Bu çalışmada USGS web sitesinden alınan

deprem verileriyle yapay zekanın alt bir dalı olan makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak tahminler gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenimi işlemleri gerçekleştirilirken verinin %70'i eğitim, %30'u test amacıyla kullanılmıştır. Yapılan tüm eğitim ve testlerin başarı ölçütü olarak performans değerlendirme metrikleri (RMSE, MAE, Düzeltilmiş R^2) kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı

Figure 1. Study area

Çizelge 1. Yıllara göre deprem büyüklük değerlerine göre deprem sayıları

Table 1. Number of earthquakes according to earthquake magnitude values by years

| Deprem büyüklük değerlerine göre deprem sayıları | | |
|--|---------------------|---------------------|
| Yıl aralığı | $M \geq 5$ ve üzeri | $M \geq 6$ ve üzeri |
| 1900-1970 | 69 | 15 |
| 1971-1990 | 12 | 2 |
| 1991-2010 | 22 | 2 |
| 2011-2023 | 9 | 1 |

Makine öğrenimi yöntemi olarak; Destek Vektör Makineleri (DVM), Gradient Boost (GB), Elastic Net (EN), Bayesian Ridge (BR), XGBoost (XGB) yöntemleri kullanılmıştır. Makine öğrenimi modeli için deprem oluş tarihi, saati, enlem, boylam, derinlik ve büyüklük bilgileri kullanılmıştır. Tüm makine öğrenimi yöntemlerinin model eğitimleri ve testleri aynı veri alanlarıyla gerçekleştirilmiştir. Tahminler 6 ve üzeri deprem büyüklüğü için yapılmıştır. Tahminler sonucunda odak koordinatlarına ait enlem ve boylam değerleri ile odak derinlikleri elde edilmiştir.

Destek Vektör Makineleri

DVM ilk kez 1995 yılında ortaya atılmıştır (Cortes ve Vapnik, 1995). Bu yöntemde veriler birbirinden bir hiper düzlem ile ayrılır. Bu işlem, veri noktalarını iki sınıf arasında bir çizgi ile ayırmak şeklinde gerçekleştirilir. DVM

aykırı değerlere karşı dirençli bir yöntemdir. Özellik vektörlerinde aykırı değerleri bulur ve sınıflandırmayı etkilemeyecek şekilde bu aykırı değerleri yok sayar. Bu yöntem sınıflandırma ve regresyon problemlerinde başarıyla kullanılmaktadır (Soman vd., 2009).



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakınındaki fay segmentleri (MTA, 2023)

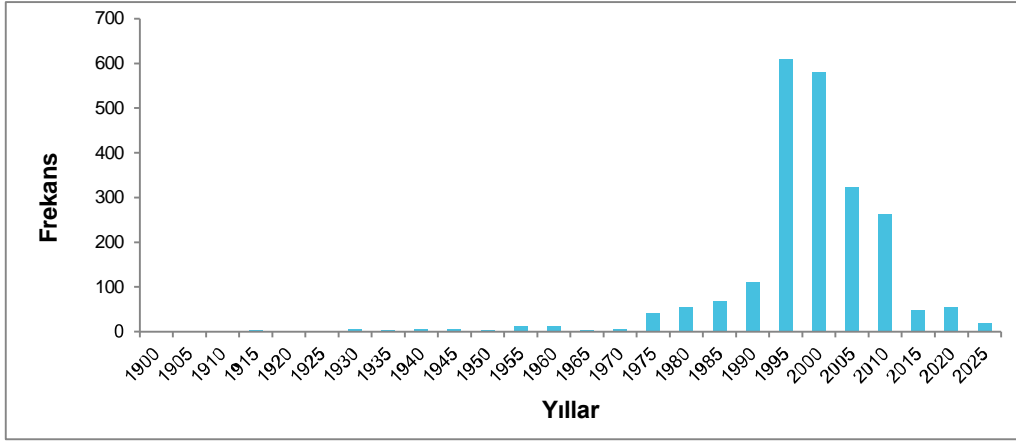
Figure 2. Fault segments in the study area and nearby (MTA, 2023)

Gradient Boost

Gradyan artırma yöntemleri çeşitli pratik uygulamalarda önemli başarı göstermiş güçlü makine öğrenimi tekniklerindedir. Bu yöntemde öğrenme işlemleri, yanıt değişkeninin daha doğru bir tahminini elde etmek için ardışık olarak yeni modeller kullanır. Bu yöntemde temel fikir, yeni temel öğrencileri, tüm toplulukla ilişkili kayıp fonksiyonunun negatif gradyanı ile maksimum düzeyde ilişkilendirilecek şekilde oluşturmaktır. Yöntemde, kayıp fonksiyonu seçilebilir ve bu esneklik model tasarımına önemli düzeyde özgürlük sağlar (Natekin ve Knoll, 2013). GB, hem pratik uygulamalarda, hem de çeşitli makine öğrenimi ve veri madenciliği işlerinde başarı ile uygulanmaktadır (Pittman ve Brown, 2011).

Elastic Net

EN, regresyon modellerini düzenli hale getirmek için lasso ve ridge tekniklerinden gelen cezaları kullanır. Bu yöntem, istatistiksel modellerin daha iyi düzenlenmesi için eksikliklerinden öğrenerek lasso ve ridge tekniklerini birleştirir. EN yönteminin tahmin edicisini bulma prosedüründe, lasso ve regresyon tekniklerini içeren iki aşama vardır. Önce ridge regresyon katsayıları bulunur, ardından katsayıların bir lasso türü büzülmesi kullanılarak ikinci adım gerçekleştirilir. EN yöntemi, değişken seçimi ve düzenlemeyi aynı anda gerçekleştirir. Boyutsal verilerin kullanılan örnek sayısından fazla olduğu durumlarda en uygundur. Gruplamalar ve değişken seçimi, bu tekniğin kilit rolleridir (Zou ve Hastie, 2005; Owen, 2007; De Mol vd., 2009).



Şekil 3. $M \geq 3$ için deprem sıklığı histogramı

Figure 3. Histogram of earthquakes frequency for $M \geq 3$

Bayesian Ridge

BR, nokta tahminleri yerine olasılık dağıtıcıları kullanarak doğrusal regresyon formüle ederek, doğal bir mekanizmanın yetersiz verilerden veya kötü dağıtılmış verilerden kurtulmasını sağlar. Çıktı veya yanıtın, tek bir değer olarak tahmin edilmek yerine bir olasılık dağılımından alındığı varsayılır. Matematiksel olarak, tamamen olasılıksal bir model elde etmek için, yanıtın Gauss dağılımı olduğu varsayılır (Horel, 1962; Hoerl ve Kennard, 1970; Shi vd., 2016). Bu yöntemin hiyerarşik veri yapısıyla başa çıkma kabiliyeti yüksektir (Huang ve Abdel-Aty, 2010).

XGBoost

XGB, en popüler artırma ağacı algoritmalarından biridir. Problem çözmedeki yüksek performansı ve özellik mühendisliği için minimum gereksinimleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Möller vd., 2016;

Tamayo vd., 2016). Bu yöntem derin öğrenme algoritmalarıyla karşılaştırıldığında, XGB işlemci üzerinde çalışan küçük veri kümeleri için kullanımının daha kolay olduğu kabul edilmektedir. XGB'un üstünlüğü, ağaç oluşturmaya yönelik güvenilir amaç işlevinde saklıdır. Ayrıca, maksimum derinlik ve bölme eşiği gibi çeşitli etkili parametrelere hizmet eder. XGB iki aşırı uydurmadan kaçınma stratejisi uygular: büzülme ve sütun alt örnekleme. Büzülme, bir ağacın model üzerindeki etkisinin çok büyük olmasını ve sonraki ağaçlar için daha fazla alan sağlamasını sağlamak için tüm yaprakların puanlarının her yinelemede bir büzülme ağırlığını ile çarpacağını belirtir. Sütun alt örnekleme, rastgele ormanla aynı şekilde, özneliklerin yalnızca bir kısmıyla bir ağaç oluşturmaya olanak tanır (Chen ve Guestrin, 2016; Dong vd., 2020; Song vd., 2020).

BULGULAR

Türkiye'nin kuzeybatısında seçilen çalışma alanına ait 1900-2023 yılları arasındaki büyüklüğü 3 ve üzeri olan depremlere ait katalog bilgileri kullanılarak, gelecekte olabilecek büyük depremlere ait deprem odak konumu ve derinliği tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahminleri yapabilmek için altı farklı makine öğrenme yöntemi kullanılmıştır. Önce eğitimler gerçekleştirilmiş, sonra eğitilen modeller kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanında gelecekte olması muhtemel depremler 6 ve üzeri büyüklükte (Mw) dikkate alınarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda olası depremler için elde edilen tahmin sonuçları Çizelge 2'de verilmektedir. Bu tahmin sonuçlarının harita üzerindeki konumları Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te harita üzerinde görüldüğü gibi büyüklüğü 6 ve üzeri olabilecek deprem tahminlerinin konumları,

aktif fay segmentleri üzerinde veya KAFZ yakınındadır.

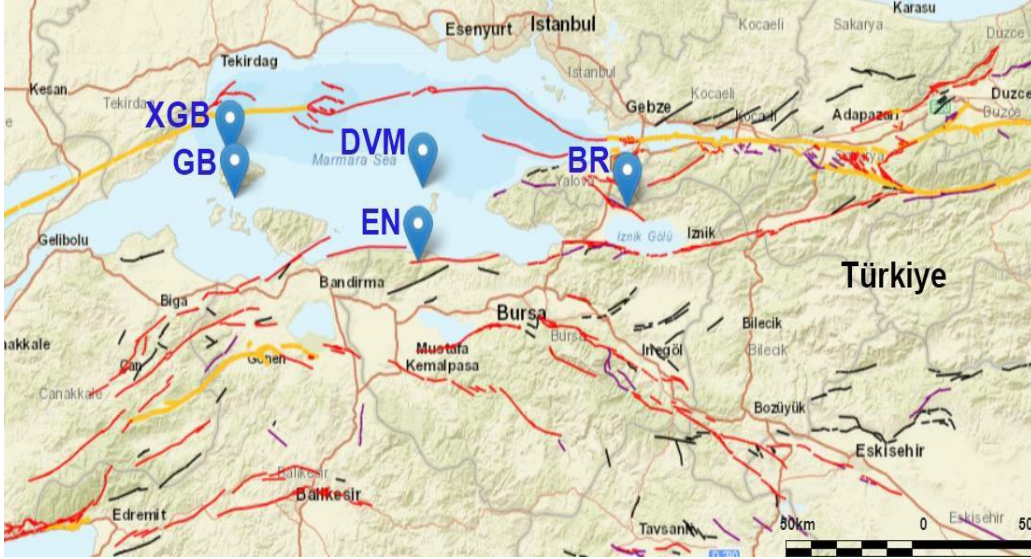
BR ve EN yöntemlerinden elde edilen tahminlere ait koordinatlar fay segmentleri üzerindedir. XGB ve GB yönteminden elde edilen sonuçlar KAFZ'nun Marmara denizi içerisinden geçen kısmına oldukça yakındır. DVM yönteminden elde edilen sonuç ise Marmara denizi ortasında İmralı adası yakınındadır. Depremlerin faylanmalardan kaynaklandığı hipotezi çok uzun süredir kabul görmektedir (Evison, 1963). Bu hipoteze göre çalışmada bulunan tahmin sonuçlarının fay segmentlerine yakın olması sonuçların doğruluğuna katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte bazı tahmin sonuçları sismik boşluklara da işaret ediyor olabilir (McCann vd., 1979).

Deprem büyüklüğü 6 ve üzeri olabilecek depremler için elde edilen tahmin sonuçlarına ait performans metrikleri Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 2. Büyüklüğü 6 ve üzeri olan deprem tahmin sonuçları

Table 2. Earthquake prediction results with magnitude 6 and above

| Makine Öğrenimi Yöntemi | Odak | | |
|-------------------------|-------------|-------------|---------------|
| | Enlem | Boylam | Derinlik (km) |
| DVM | 40.55442646 | 28.42908374 | 14.71953054 |
| GB | 40.5427408 | 27.60509308 | 13.52770139 |
| EN | 40.36743171 | 28.48630377 | 12.69927881 |
| BR | 40.54068591 | 29.46539747 | 16.3778283 |
| XGB | 40.658737 | 27.550915 | 10.055244 |



Şekil 4. Büyüklüğü 6 ve üzeri olabilecek depremlerin farklı makine öğrenim yöntemlerinden elde edilen tahmin sonuçları (Mavi renkli yer işaretleri: DVM, GB, EN, BR, XGB)

Figure 4. Prediction results from different machine learning methods for earthquakes of magnitude 6 and above (Blue landmarks: DVM, GB, EN, BR, XGB)

TARTIŞMA ve SONUÇ

Depremleri önceden tahmin edebilmek can kaybını azaltmak için çok önemlidir. Bu nedenle geçmişten günümüze çeşitli bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Yapay zeka yöntemleri ve onun alt dalı olan makine öğrenimi de son zamanlarda daha çok kullanılmaya başlanan yeni tahmin araçlarıdır. Deprem mekanizmasının karmaşık olması deprem tahminlerini çok zorlaştırmaktadır. Makine öğrenimi yöntemleri bu karmaşık mekanizmayı çok sayıda deprem verisini birlikte kullanarak günümüz bilgisayar teknolojisinin de yardımıyla daha tahmin edilebilir hale getirmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, farklı performans metriklerine

göre tahmin başarıları değişmekle birlikte başarı oranları arasında büyük farklılıklar yoktur. RMSE metriğine göre enlem tahmin başarıları tüm yöntemlerde 0.50-0.54 aralığında, boylam tahmin başarıları 2.09-2.14 aralığında, derinlik tahmin başarıları ise 9.55-9.85 aralığındadır. MAE metriğine göre enlem tahmin başarıları tüm yöntemlerde 0.39-0.41 aralığında, boylam tahmin başarıları 1.86-1.94 aralığında, derinlik tahmin başarıları ise 6.56-7.01 aralığındadır. Düzeltilmiş R^2 metriğine göre enlem tahmin başarıları tüm yöntemlerde 0.04-0.21 aralığında, boylam tahmin başarıları 0.61-0.69 aralığında, derinlik tahmin başarıları ise 0.08-0.15 aralığındadır. DVM ve EN yöntemi ile GB ve XGB yönteminden elde edilen odak koordinatları görece olarak birbirine yakındır.

Çizelge 3. Büyüklüğü 6 ve üzeri olabilecek depremlerin farklı makine öğrenim yöntemlerinden elde edilen tahmin sonuçlarına ait performans metrikleri

Table 3. Performance metrics of estimation results obtained from different machine learning methods of earthquakes with magnitude 6 and above

| | | DVM | GB | EN | BR | XGB |
|-------------------------------|----------|------|------|------|------|------|
| RMSE | Enlem | 0.54 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.51 |
| | Boylam | 2.09 | 2.12 | 2.13 | 2.09 | 2.14 |
| | Derinlik | 9.82 | 9.81 | 9.55 | 9.77 | 9.85 |
| MAE | Enlem | 0.41 | 0.40 | 0.39 | 0.39 | 0.40 |
| | Boylam | 1.86 | 1.92 | 1.94 | 1.90 | 1.93 |
| | Derinlik | 6.56 | 6.97 | 6.72 | 6.88 | 7.01 |
| Düzeltilmiş R ² | Enlem | 0.21 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| | Boylam | 0.61 | 0.66 | 0.67 | 0.61 | 0.69 |
| | Derinlik | 0.14 | 0.14 | 0.08 | 0.13 | 0.15 |

Olası depremlerin odak derinlik tahminleri yaklaşık 10.05-16.42 km arasında değişmektedir. Tüm esnek hesaplama yöntemlerinde olduğu gibi bu çalışmada bulunan tahmin değerleri, performans metrik değerlerinden de anlaşılacağı gibi belirli bir güven aralığında değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte sonuçlar yöneticiler ve planlayıcılar açısından gerekli tedbirlerin alınması için önemli bilgiler sunmaktadır. Zaman içerisinde deprem katalog bilgilerinin artmasıyla tahmin başarı oranlarının yükselmesi de beklenen bir durumdur.

Makine öğrenimi tahmin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde deprem olma ihtimali olan yerler, Türkiye'nin kuzeybatı bölgesinde Bursa ili sınırları içerisinde İznik Gölü'nün kuzeyinden

başlayarak batıya doğru Marmara adasının kuzeybatısına kadar yaklaşık 170 km'lik bir hat üzerinde odaklanmaktadır. Daha önce farklı yöntemler kullanılarak yapılan başka çalışmalarda da Marmara denizinde büyük bir deprem beklentisi olduğu bazı araştırmacılar tarafından dile getirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları da gelecekte Marmara denizi kıyılarında veya içerisinde 6 ve üzeri büyük depremler olabileceği ihtimalini güçlendirmektedir. Tüm bunların yanı sıra deprem mekanizmasının karmaşık yapısı itibarıyla çok sayıda parametreye bağlı olduğu ve bu parametrelere ait tüm verinin elimizde bulunmadığı da unutulmamalıdır. Bu çalışmada sunulan tahmin sonuçları kullanılan deprem katalog bilgileriyle sınırlıdır. Aletsel

dönem öncesine ait veriler çok sınırlıdır ve bu çalışmada kullanılmamıştır. Depremlerin meydana gelme olasılıkları ve bunların dönüş periyotları farklı olduğundan deprem katalog verilerinin artması ve depremle ilişkili başka verilerin yada özelliklerin de kullanımıyla ileride daha doğru tahminler yapmak mümkün olabilecektir.

KATKI BELİRTME

Yazar yapıcı eleştirileri için hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Alarifi, A. S. N., Alarifi, N. S. N., Al-Humidan, S., 2012. Earthquakes magnitude predication using artificial neural network in northern Red Sea area. *Journal of King Saud University - Science*, 24(4), 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2011.05.002>
- Asencio-Cortés, G., Martínez-Álvarez, F., Troncoso, A., Morales-Esteban, A., 2017. Medium-large earthquake magnitude prediction in Tokyo with artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(5), 1043-1055. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-2121-7>
- Barsukov, V. L., Varshal, G. M., Zamokina, N. S., 1984. Recent results of hydrogeochemical studies for earthquake prediction in the USSR. *pure and applied geophysics*, 122(2), 143-156. <https://doi.org/10.1007/BF00874588>
- Bhatia, M., Ahanger, T. A., Manocha, A., 2023. Artificial intelligence based real-time earthquake prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, 105856. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105856>
- Brehm, D. J., Braille, L. W., 1998. Intermediate-term earthquake prediction using precursory events in the New Madrid seismic zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), 564-580.
- Can, C., Ergun, G., Gokceoglu, C., 2014. Prediction of earthquake hazard by hidden Markov model (around Bilecik, NW Turkey). *Open Geosciences*, 6(3), 403-414. [doi:10.2478/s13533-012-0180-1](https://doi.org/10.2478/s13533-012-0180-1)
- Chen, T., Guestrin, C. 2016. Xgboost: A scalable tree boosting system, *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 13-17 August, San Francisco California, 785-794.
- Cortes, C., Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- De Mol, C., De Vito, E., Rosasco, L., 2009. Elastic-net regularization in learning theory. *Journal of Complexity*, 25(2), 201-230. <https://doi.org/10.1016/j.jco.2009.01.002>
- Dong, W., Huang, Y., Lehane, B., Ma, G., 2020. XGBoost algorithm-based prediction of concrete electrical resistivity for structural health monitoring. *Automation in Construction*, 114, 103155. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103155>
- Essam, Y., Kumar, P., Ahmed, A. N., Murti, M. A., El-Shafie, A., 2021. Exploring the reliability of different artificial intelligence techniques in predicting earthquake for Malaysia. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106826>
- Evison, F., 1963. Earthquakes and faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(5), 873-891.
- Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y., Mulargia, F., 1997. Earthquakes cannot

- be predicted. *Science*, 275(5306), 1616-1616.
- Hayakawa, M.,Hobara, Y., 2010. Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(2), 115-155.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2010.486933>
- Hoerl, A. E.,Kennard, R. W., 1970. Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 55-67.
- Horel, A., 1962. Application of ridge analysis to regression problems. *Chemical Engineering Progress*, 58, 54-59.
- Huang, H.,Abdel-Aty, M., 2010. Multilevel data and Bayesian analysis in traffic safety. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1556-1565.
- Kirschvink, J. L., 2000. Earthquake prediction by animals: Evolution and sensory perception. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2), 312-323.
- Knopoff, L., 2000. The magnitude distribution of declustered earthquakes in Southern California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(22), 11880-11884.
<https://doi.org/10.1073/pnas.190241297>
- Külahcı, F., İnceöz, M., Doğru, M., Aksoy, E.,Baykara, O., 2009. Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1), 212-219.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.08.003>
- Luu, Q.-H., Lau, M. F., Ng, S. P.,Chen, T. Y., 2021. Testing multiple linear regression systems with metamorphic testing. *Journal of Systems and Software*, 182, 111062.
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111062>
- Marzocchi, W., Taroni, M.,Falcone, G., 2017. Earthquake forecasting during the complex Amatrice-Norcia seismic sequence. *Science Advances*, 3(9), e1701239.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1701239>
- McCann, W. R., Nishenko, S. P., Sykes, L. R.,Krause, J., 1979. Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries. *pure and applied geophysics*, 117(6), 1082-1147. 10.1007/BF00876211
- Michael, A. J., McBride, S. K., Hardebeck, J. L., Barall, M., Martinez, E., Page, M. T., van der Elst, N., Field, E. H., Milner, K. R.,Wein, A. M., 2020. Statistical seismology and communication of the USGS operational aftershock forecasts for the 30 November 2018 Mw 7.1 Anchorage, Alaska, earthquake. *Seismological Research Letters*, 91(1), 153-173.
<https://doi.org/10.1785/0220190196>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A.,Vining, G. G. 2021. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons, USA, 688s.
- Moustra, M., Avraamides, M.,Christodoulou, C., 2011. Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or Seismic Electric Signals. *Expert Systems with Applications*, 38(12), 15032-15039.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.043>
- Möller, A., Ruhlmann-Kleider, V., Leloup, C., Neveu, J., Palanque-Delabrouille, N., Rich, J., Carlberg, R., Lidman, C.,Pritchett, C., 2016. Photometric classification of type Ia supernovae in the SuperNova Legacy Survey with supervised learning. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(12), 008.
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/12/008>

- MTA. 2023. Geosciences Map Viewer. <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (Erişim Tarihi: 10.07.2023).
- Natekin, A., Knoll, A., 2013. Gradient boosting machines, a tutorial. *Frontiers in neurorobotics*, 7, 21. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00021>
- Owen, A. B. 2007. A robust hybrid of lasso and ridge regression. ss 59-72. Joseph S. Verducci, Xiaotong Shen and Lafferty, J., ed. 2007. *Contemporary Mathematics*, 226s.
- Panakkat, A., Adeli, H., 2007. Neural network models for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicators. *International journal of neural systems*, 17(01), 13-33. <https://doi.org/10.1142/S0129065707000890>
- Pittman, S. J., Brown, K. A., 2011. Multi-scale approach for predicting fish species distributions across coral reef seascapes. *PloS one*, 6(5), e20583. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020583>
- Ricciardi, C., Ponsiglione, A. M., Scala, A., Borrelli, A., Misasi, M., Romano, G., Russo, G., Triassi, M., Improta, G., 2022. Machine learning and regression analysis to model the length of hospital stay in patients with femur fracture. *Bioengineering*, 9(4), 172. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9040172>
- Rikitake, T., 1968. Earthquake prediction. *Earth-Science Reviews*, 4, 245-282. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(68\)90154-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(68)90154-2)
- Rouet-Leduc, B., Hulbert, C., Lubbers, N., Barros, K., Humphreys, C. J., Johnson, P. A., 2017. Machine Learning Predicts Laboratory Earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9276-9282. <https://doi.org/10.1002/2017GL074677>
- Shi, Q., Abdel-Aty, M., Lee, J., 2016. A Bayesian ridge regression analysis of congestion's impact on urban expressway safety. *Accident Analysis & Prevention*, 88, 124-137. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.12.001>
- Shiuly, A., Roy, N., Sahu, R. B., 2020. Prediction of peak ground acceleration for Himalayan region using artificial neural network and genetic algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(5), 215. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5211-5>
- Soman, K., Loganathan, R., Ajay, V. 2009. Machine learning with SVM and other kernel methods. PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, 477s.
- Song, K., Yan, F., Ding, T., Gao, L., Lu, S., 2020. A steel property optimization model based on the XGBoost algorithm and improved PSO. *Computational Materials Science*, 174, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.109472>
- Tamayo, D., Silburt, A., Valencia, D., Menou, K., Ali-Dib, M., Petrovich, C., Huang, C. X., Rein, H., Van Laerhoven, C., Paradise, A., 2016. A machine learns to predict the stability of tightly packed planetary systems. *The Astrophysical Journal Letters*, 832(2), L22. <https://doi.org/10.3847/2041-8205/832/2/L22>
- USGS. 2023. Search Earthquake Catalog,. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search> (Erişim Tarihi: 08.07.2023).
- Wang, K., Johnson, C. W., Bennett, K. C., Johnson, P. A., 2022. Predicting Future Laboratory Fault Friction Through Deep Learning Transformer Models. *Geophysical Research Letters*, 49(12), e2022GL099888. <https://doi.org/10.1029/2022GL099888>

Research Letters, 49(19),
e2022GL098233.
<https://doi.org/10.1029/2022GL098233>

Whitcomb, J. H., Garmany, J. D., Anderson, D.
L., 1973. Earthquake Prediction: Variation
of Seismic Velocities before the San
Francisco Earthquake. *Science*, 180(4086),
632-635.
<https://doi.org/10.1126/science.180.4086.632>

Zmazek, B., Todorovski, L., Džeroski, S.,
Vaupotič, J., Kobal, I., 2003. Application of
decision trees to the analysis of soil radon
data for earthquake prediction. *Applied
Radiation and Isotopes*, 58(6), 697-706.
[https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00094-0)

Zou, H., Hastie, T., 2005. Regularization and
variable selection via the elastic net.
*Journal of the Royal Statistical Society
Series B: Statistical Methodology*, 67(2),
301-320. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>



Ankara Zir Vadisi Kaya Düşmelerinin Üç Boyutlu Analizlerle Değerlendirilmesi

Assessment of Ankara Zir Valley Rockfalls using Three Dimensional Analyses

NURGÜL YEŞİLOĞLU-GÜLTEKİN^{ORCID}

Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 26 Haziran (*June*) 2023 Kabul (*accepted*): 20 Ağustos (*August*) 2023

ÖZ

Kaya düşmeleri büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek doğal tehlikelerdir. Zir Vadisi yamaçları Ankara ili Sincan (Yenikent) -Temelli karayolunun yamaçlarını oluşturmakta olup, özellikle çok sayıda ağır yük, tıbbi atık aracı ile binek aracın yoğun olarak kullandığı bir güzergahtır. Zir Vadisi lav önu çökme ürünleri bölgede yüksek şevler oluşturan peri bacası görünümlü jeolojik oluşumlar meydana getirmiş olup, bu oluşumlarda kaya düşmeleri meydana gelmektedir. Zir Vadisi Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı olarak tescil edilmiş olup; eski bir yerleşime de ev sahipliği yapmaktadır. Bölgenin korunması sadece kaya düşmeleri açısından değil aynı zamanda jeolojik miras anlamında da önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında öncelikle arazi çalışmaları ile bölgede kaya düşmesi kaynak alanları belirlenmiş, düşmüş bloklar ve lokasyonları değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında İnsansız Hava Aracı (İHA) ile uçuş yapılarak bölgenin ve yakın çevresinin sayısal yükseklik modeli (SYM) elde edilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenmiş kaya düşmesi kaynak alanlarından düşme potansiyeli olan kaya bloklarının ilerleme yönü, mesafeleri, sıçrama yükseklikleri, blokların sahip oldukları hızlar ve enerjiler çok sayıda modelleme çalışması ile değerlendirilmiş ve bu değerlerin tahminine yönelik üç boyutlu analizler yapılmış ve haritalanmıştır. Bu değerlendirmelere göre bloklar yüksek hız ve enerjiye ulaşmakta olup, bu durum dikkate alındığında; kaya düşmesi kaynak alanı, risk altındaki eleman olan karayoluna, prefabrik yapılara, su deposu, çeşme, bahçe, ekili tarla gibi alanda bulunan yapılara çok yakındır. Çalışma, yoğun bir araç trafiğinin bulunduğu bir karayolunun ve bölgedeki diğer risk altındaki elemanların kaya düşmelerinden korunması için gereken çalışmaların yapılabilmesi için literatüre önemli katkı sağlayacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Zir Vadisi, İnsansız Hava Aracı (İHA), HY-STONE, 3B Modelleme, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

ABSTRACT

Rock falls are the natural hazards which have potential for structural damages and casualties. The slopes of the Zir Valley, which is the study area, are the slopes of the Ankara province Sincan (Yenikent) -Temelli highway, and it is the route of heavily used by many heavy cargo, medical waste vehicles and personal vehicles. The lava front collapse products of the Zir Valley created fairy chimney-like geological formations that created high slopes in the region. Rock falls occur in these formations. Zir Valley was registered as a Natural Site-Sustainable Conservation and Controlled Use Area and it is also an old settlement area in that region. The protection of the region is important not only for rockfalls, but also for geological heritage. Within the scope of this study, first of all, the rockfall source areas were determined, fallen rock blocks and their locations were assessed by field studies. The digital elevation model (DEM) of the study area and its vicinity was obtained by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The runout direction, runout distance, jump heights, velocities and energies of the rock blocks that have the potential to fall from the rockfall source areas determined within the scope of the study were evaluated by many modeling studies, and three-dimensional analyzes were implemented and mapped for the prediction of these values. According to these assessments, the blocks reach high velocity and energy, and when this situation is considered; the rockfall source area is very close to the highway, which is the element at risk, prefabricated structures, water tanks, fountains, gardens, and the structures in the area such as cultivated field. The study will give significant contribution to the literature in order to carry out the necessary studies for the protection of a highway with a heavy vehicle traffic and other elements at risk in the region from rockfalls.

Keywords: Rockfall, Zir Valley, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), HY-STONE, 3D Modeling, Geographic Information System (GIS)

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1332884>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: nuryesil@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

Dünya, oluşumundan bugüne süregelen doğal olayların etkisi altında kalmıştır. Doğal olayların ve tehlikelerin doğal afetlere dönüşmesinin engellenmesi yerbilimlerine ilişkin temel verilerin doğru derlenip yorumlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Kaya düşmeleri büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek doğal tehlikelerdir. Jeolojik kökenli tehlikelerin özellikle kentsel planlamada dikkate alınması, doğal tehlikelerin yerleşim bölgelerine verdiği zararların gerek toplum gerekse yerel yönetimler tarafından anlaşılması bu alanda yapılan çalışmalarda büyük önem taşımaktadır.

Çalışma konusunu oluşturan kaya düşmelerinin modellenmesi ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yer almakta olup; bu çalışmalardan bir kısmı iki boyutlu modellemeye imkan sunmaktadır (Ulusay vd., 2006; Topal vd., 2007; Tagliavini vd., 2009; Tunusluoglu ve Zorlu, 2009; Sadagah, 2010; Bilgin vd., 2012; Topal vd., 2012; Wang vd., 2012; Yesiloglu-Gultekin vd., 2012; Keskin, 2013). Literatürde özellikle son dönemlerde kaya düşme alanlarının daha temsil edici modellenmesi açısından üç boyutlu (3B) modelleme yöntemleri yaygınlaşmıştır. Guzzetti vd. (2002) çalışmalarında kaya düşme tehlikesinin değerlendirilmesi için üç boyutlu bir benzeştirme yazılımı olan 'STONE' u

geliştirmişlerdir. Bu yazılım ile kaya düşmelerinin modellenmesinin diğer programlarla karşılaştırıldığında daha gerçekçi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Agliardi ve Crosta (2003) merkez Alpler'de yüksek çözünürlüklü 3B kaya düşmesi modellemesi yaptıkları çalışmalarında risk altındaki elemanlar değerlendirilmiş, kaya düşmelerinden korunma ve önlemler üzerinde durulmuştur. Frattini vd. (2008) kaya düşmesi duraylılığının değerlendirilmesi için istatistiksel ve fiziksel tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. HY-STONE kaya düşmesi programı ile kaya düşmelerinin ilerleme mesafeleri ile ilgili üç boyutlu modeller oluşturmuşlar ve bu modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Agliardi vd. (2009) Varenna/İtalya'da meydana gelen kaya düşmeleri için risk değerlendirmesi yaptıkları çalışmalarında üç boyutlu modelleme programı olan HY-STONE'u kullanmışlardır. Çalışma kapsamında risk altındaki elemanlar belirlenmiş, çalışma ile farklı kaya düşmelerinden koruma senaryoları için farklı önlemler değerlendirilmiştir. Assali vd. (2014) Fransa'da Haute-Savoie, Saint-Jeoire yakınlarında kaya düşmeleri riski olan alanları fotogrametrik ve yersel ölçümler yaparak belirledikleri çalışmalarında STONE yazılımını kullanmışlardır. Sarro vd. (2018) doğu İspanya'da kültürel miras olarak kabul edilen bir alanın yanındaki bir köyde meydana gelen kaya düşmelerinin üç boyutlu değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada RocPro3D yazılımı kullanarak blokların ilerleme mesafelerini tahmin etmişlerdir.

Ayrıca yine son dönemde İHA verileri birçok alanda giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Chiabrande vd., 2013; Vasuki vd., 2014; Gonçalves vd., 2015; Ulvi ve Toprak, 2016; Şasi ve Yakar, 2018). İHA kullanılarak yapılan kaya düşmesi analizleri güncelliğini korumaktadır. Giordan vd. (2015) İHA sistemini İtalya'da meydana gelen kaya düşme alanlarından biri olan San Germano'da

uygulamışlardır. Çalışmanın amacı micro-İHA'ların kaya düşmelerinin acil durum senaryolarında uygulanabilirliğine dair metodlar geliştirmektedir. Saroglou vd. (2018) İHA kullanarak erişilmesi güç bir arazinin kaya düşmesi analizlerini yapmıştır. Akın vd. (2019) yapmış oldukları çalışma ile Akköy (Ürgüp) 'de düşmüş olan kaya bloklarının yerleşim alanlarına ulaşmasını engellemek amacıyla inşa edilmiş olan kaya tutma hendeğinin performansını 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmişlerdir. 3 boyutlu RocPro3D yazılımı kullanılan çalışmada kaya düşme analizlerinde kullanılan sayısal yüzey modeli insansız hava aracı ile alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen nokta bulutu verisi ile oluşturulmuştur. Alptekin vd. (2019) Mersin Karahıdırlı kaya düşme alanında yapmış oldukları çalışma ile bölgenin kaya düşmelerinin olumsuz etkilerinin klasik yersel uygulamaların aksine İHA ile daha pratik bir şekilde yapıldığını vurgulamışlar ve önleme yöntemlerinin inşaa edilmesi gerekliliğini belirtmişlerdir. Şener (2019) Kasımlar Köyü Isparta için İHA verileri kullanarak CBS tabanlı 3B modellemeler ile olası kaya düşmelerini değerlendirmişlerdir. Ağca vd. (2020) Mersin Adamkayalar bölgesinde üzerinde tarihi figürlerin yer aldığı kaya yamacının 3B kaya düşmesi modellemesini İHA verileri kullanarak çalışmışlar; blokların ilerleme, mesafesi, sıçrama yükseklikleri ve blokların enerjisini tahmin etmişlerdir. Ayrıca bölgeyi ziyaret edecek turistler için güvenli yürüyüş yolları üzerinde durmuşlardır. Polat (2020) Rockyfor3d yazılımı kullanarak İHA verileri ile Sivas Kavak köyü için 3B kaya düşmesi analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın en zor kısmının bu yazılım ile veri hazırlama süreci olduğunu ifade etmişler ve bu amaçla veri hazırlama aracı geliştirerek analizleri yapmışlardır.

Utlu vd. (2020) Aladağlar'da yer alan Kazıklıalı Kanyonu'nda gerçekleştirdikleri çalışmalarında

İHA teknolojisini kullanarak kaya düşmelerini modellemişlerdir. 3B modellemelerle (RAMMS) blokların hızını, enerjilerini, sıçrama yüksekliklerini, düşme mesafelerini belirlemişler ve bölgenin yüksek kaya düşmesi tehlikesi içinde olduğunu tespit etmişlerdir. Albarelli vd. (2021) süreksizliklerin lokal ölçekte belirlenmesine yönelik yeni bir yöntem önerdikleri çalışmalarında İHA kullanarak Yunanistan'da bir kaya düşme alanına ait 3 boyutlu modelleme yapmışlardır. Aynı çalışmada otomatik olarak süreksizlik setlerinin özelliklerini belirlemişler ve şev analizleri yapmışlar ve duyarlılık değerlendirmesi ile yeni bir kaya düşmesi duraylılık indeksi belirlemişlerdir. Öztürk vd. (2022) Niğde' de gerçekleştirdikleri çalışmalarında İHA verilerini kullanarak 3B modelleme yapmışlardır. Çalışmada RAMMS yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile mühendislik çözüm önerileri sunulmuştur. Dinçer vd. (2022) Kapadokya bölgesinde 3 boyutlu kaya düşme analizlerini İHA verilerinden elde edilen modeller üzerinde RocPro3D yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Kapadokya bölgesindeki kaya düşmelerinin önlenmesi için detaylı kaya düşme analizleri gerçekleştirilerek kaya düşme parametrelerinin belirlenmesi ve koruma ve önleme projelerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Varol vd. (2023) Kayseri-Soğanlı yerleşim alanında meydana gelebilecek kaya düşmelerini ampirik olarak enerji açısı yöntemiyle ve 3 boyutlu olasılıksal kaya düşme modellemeleri ile değerlendirdikleri çalışmalarında İHA verileri ile elde edilen SYM için CONEFALL yazılımı kullanmışlardır.

Çalışma kapsamında üç boyutlu kaya düşmesi modellemesi yapmaya imkan sağlayan HY-STONE simülasyon programı lav önü akıntılarının patlaması sonucu oluşan Zir Vadisi ve yakın çevresini etkileyen kaya düşmelerine uygulanmıştır. Ayrıca İHA'ların

çalışma alanı için hızlı bir ölçüm sağlaması ve bölgenin 3 boyutlu modelinin farklı uçuş açıları ile net bir şekilde ortaya konulması, çalışma konusunu oluşturan 3B kaya düşmesi analizlerinde büyük bir avantaj sağlamıştır. Kaya düşme alanı karayolunun şevlerinde yer almakta olup; büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek potansiyele sahiptir. Bu nedenle düşme potansiyeli olan blokların belirlenmesi, boyutlarının ortaya konulması, ilerleme mesafelerinin, sıçrama yüksekliklerinin, enerjilerinin hesaplanması bölgenin kaya düşmelerinden korunmasında büyük önem taşımaktadır. Kaya düşmeleri ülkemizde araştırmacılar tarafından çalışılmakta olup, bu çalışmayı değerli kılan Zir Vadisi kaya düşme alanının Ankara'nın merkezinde yoğun olarak kullanılan bir karayolunun hemen yanında yer alması ve bu alanda kaya düşme olaylarının yaşanıyor olmasıdır. Ayrıca bu çalışmayı değerli kılan bir diğer husus; kaya düşmelerinin olduğu peribacasını andıran özel jeolojik oluşumların bulunduğu Zir Vadisi ve bu tür alanların korunmasına bilimsel çalışmaların da destek olmasıdır.

ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı olarak seçilen Zir Vadisi ve yakın çevresi Ankara 1/100000 ölçekli İ28 ve İ29 paftaları içinde yer almaktadır. Zir Vadisi yamaçları, Ankara ili merkez sınırları içinde yer alan Sincan-Temelli karayolunun da yamaçlarını oluşturmakta olup, özellikle çok sayıda ağır, orta yük araçlarının ve bunun yanında binek aracın yoğun olarak kullandığı bir güzergahtır. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Zir Vadisi sadece jeolojik açıdan değil, aynı zamanda tarihte bir yerleşime merkezlik etmesi açısından da Ankara İli içerisinde ayrıcalıklı bir öneme sahiptir. Zir Vadisi 2018 yılında "Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak tescil edilmiştir (Çevre,

Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018). Zir Vadisi Ayaş-Beypazarı yolu üzerindeki Yenikent'ten Gökler Köyü istikametinde tarihi Zağar Köprüsü ile başlamaktadır. Zir Vadisi; mağara yerleşimleri, tarihi mezar taşları ve dere boyu ağaçları ile rekreasyonel açıdan da bir nitelik ortaya koymaktadır (Uğur ve Akpınar, 2003).

Zir Vadisi ve yakın çevresi içinde yer alan Zir Vadisi karayolu Sincan-Yenikent-Temelli arası bağlantıyı sağlamakta olup, aynı zamanda ASKİ Tatlar Atık Su Arıtma Tesisi, Sincan Katı Atık Bölgesi, Sincan Hayvancılık Bölgesi ve Malıköy' de yer alan organize bölgelerine ulaşım için kullanılmaktadır. Bu nedenle bu yol yoğun bir trafiğin olduğu bir karayolu olup; risk altındaki eleman sayısı oldukça yüksektir. Ayrıca tıbbi atık taşıyan araçların varlığı sadece araç riski açısından değil bu araçların zarar görmesi ile etrafa yayılacak olan tıbbi atıkların yaratacağı risk açısından da değerlendirilmekte ve çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeolojisi

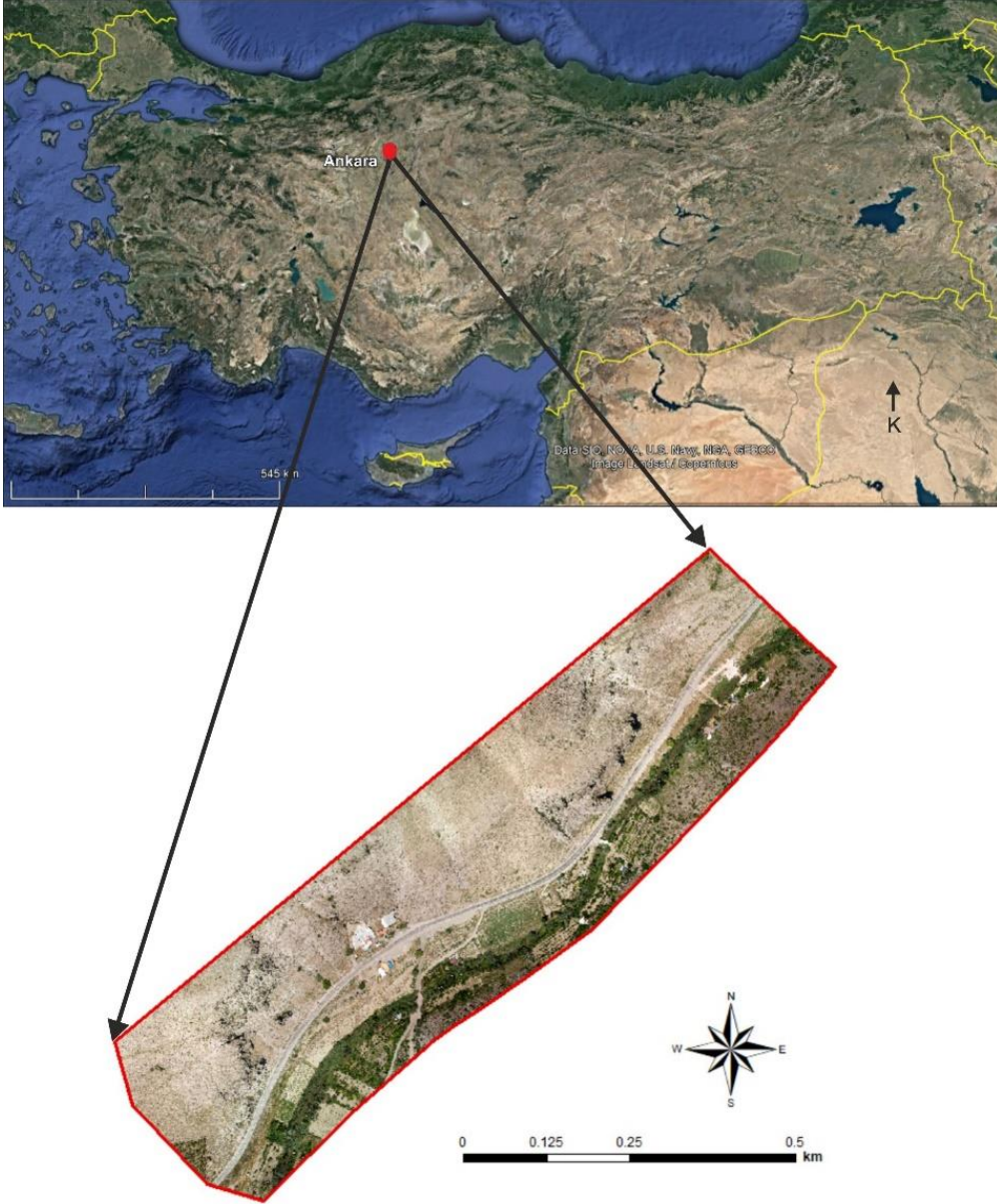
Zir Vadisi ve yakın çevresini içine alan çalışma alanı lav önü çökmesi sonucu oluşan blok ve kül akışlarının meydana getirdiği oluşumları içermektedir (Ersoy, 2003). Çalışma alanı Lütesiyen yaşlı Tekke Volkanitleri (Dönmez vd., 2009) içinde yer alan tuf-aglomera, andezit ve bazalt üyelerinden oluşmaktadır (Bilgin, 2014). Birim tuf-aglomera üyesi (Tetp), andezit üyesi (Teta) ve bazalt üyesi (Tetb) olmak üzere üç üyeye ayrılarak incelenmiştir. Çalışma alanının jeolojisi Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından hazırlanan 1/100000 ölçekli Ankara İ28-Ankara İ29 paftaları içinde yer almaktadır. Çalışma alanının jeoloji haritası Akyürek vd. (1997) ve Bilgin (2014) kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2).

Çalışma alanında tüfler genellikle, gri-beyaz renklere olup, aglomeraları bağlamaktadır.

Aglomeraların çakılları çoğunlukla andezitlerden oluşmaktadır (Şekil 3). Zir Vadisi yamaçlarında lav önü patlaması sonucu tuf-aglomera birimleri peri bacası şeklinde morfolojik şekiller oluşturmaktadır (Şekil 4). Çalışma kapsamında değerlendirilen kaya düşmeleri tuf-aglomera birimlerde gerçekleşmekte olup; oluşumların bağlayıcı malzemesi ise küldür.

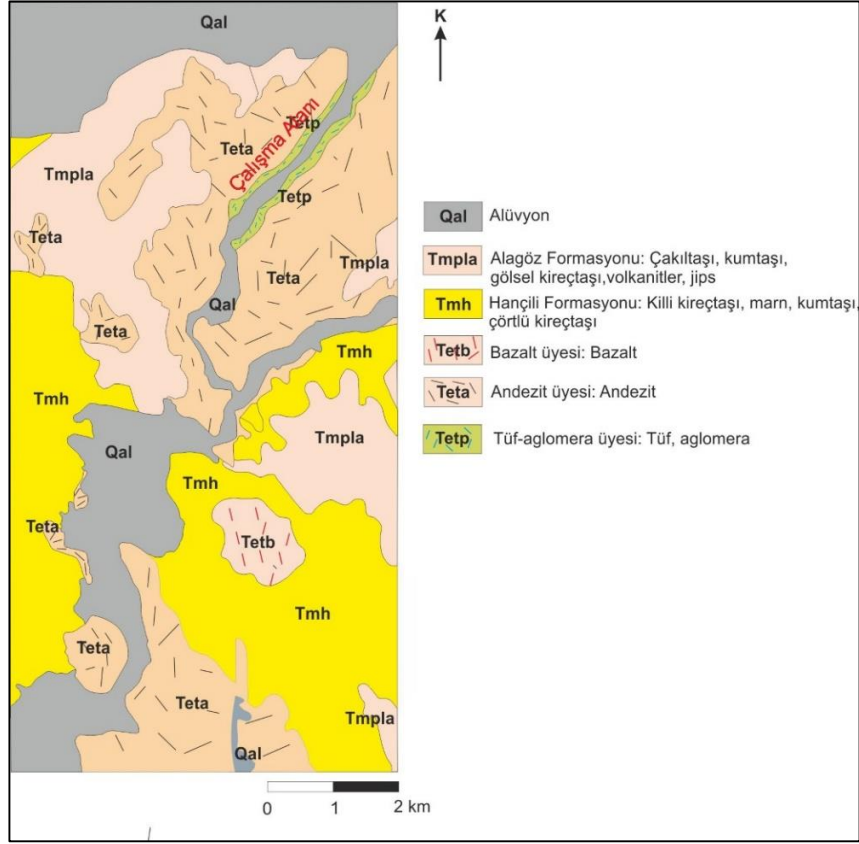
ARAZİ ÇALIŞMALARI VE FOTOGRAMETRİK ANALİZLER

Çalışma kapsamında arazi çalışmaları ve fotogrametrik analizler eş zamanlı yürütülmüştür. Arazi çalışmaları ile Zir Vadisi ve yakın çevresi için tehlike yaratan kaya düşmesi kaynak alanları tespit edilmiştir. Yine arazi çalışmaları ile düşen blokların çok yoğun olduğu alanlarda lokasyonları GPS (Global Positioning System-Global Konum Belirleme Sistemi) ile belirlenmiş ve boyutları ölçülmüş, ayrıca İHA verileri kullanılarak elde edilmiş ortofoto ile de düşen bloklar belirlenmiş CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında sayısallaştırılmıştır. Geriye dönük analizlerde düşen blokların lokasyonlarından faydalanılmıştır. Bu amaçla çalışma alanında düşen blokların ortalama boyutları belirlenmiştir. Yine CBS ortamında sayısallaştırılan bloklardan faydalanılarak bu veriler arazi ölçümleri ile birlikte kullanılarak çalışma alanı için ortalama blok boyutu tahmin edilmiştir (Şekil 5). Çalışma alanı için yapılan modelleme çalışmalarında kaya düşmelerinde blokların şekli için arazi gözlemleri etkili olmuştur. HY-STONE yazılımında küre, silindirik ve disk şeklinde örnekler için analizler gerçekleştirilmekte olup, araziye en iyi temsil ettiği düşünülerek blokların şekli küre olarak seçilmiştir. Blokların çapı olarak arazide düşmüş bloklara ve CBS ortamında sayısallaştırılmış bloklara ait ölçümler alınmış, hacimleri hesaplanmış bu arada bu hacime eşit kürenin çapı belirlenmiştir. Buna göre ortalama yarıçap 0.5 m alınmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (Google Earth, 2023)

Figure 1. Location map of the study area (Google Earth, 2023)



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresine ait jeoloji haritası (Akyürek vd. 1997; Bilgin, 2014)

Figure 2. Geological map of the study area and its vicinity (Akyürek vd. 1997; Bilgin, 2014)



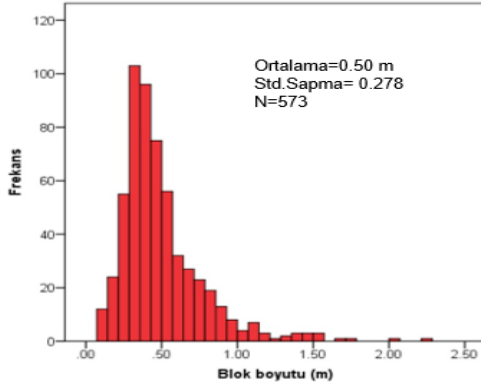
Şekil 3. Çalışma alanında gözlenen tüf-aglomera birimi

Figure 3. Tuff-agglomerate group in the study area



Şekil 4. Çalışma alanında gözlenen morfolojik oluşumlar (a,b)

Figure 4. Morphological units observed in the study area (a,b)



Şekil 5. Düşen blok boyutları

Figure 5. Dimensions of fallen blocks

Arazi çalışmaları ile alanı temsil edecek bloklar, kaya düşmesi modelleme çalışmaları için gerekli olan kaya düşmesi yüzey özellikleri, arazi kullanım haritası ve jeomorfoloji haritalarının hazırlanması için gerekli veriler alınmış, İHA verileriyle desteklenerek haritaların hazırlanmasına katkı sağlanmıştır. Kaya düşmesi analizlerinin en önemli ayaklarından birini arazi çalışmaları oluşturmuştur. Zir Vadisi ve yakın civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları esnasında düşmüş, hemen yol kenarında çok sayıda birikmiş blok gözlenmiştir (Şekil 6). Yola düşen bu kaya bloklarının yol kenarına alındığı açıktır.



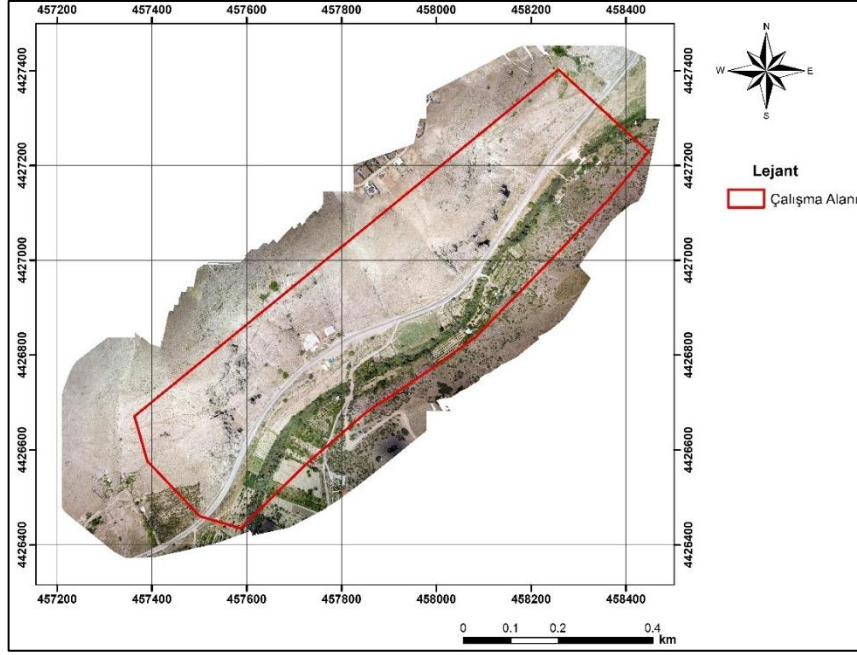
Şekil 6. Düşmüş kaya blokları

Figure 6. Fallen rock blocks

Çalışma alanında kaya düşmelerinin meydana geldiği şevler boyunca İHA ile uçuş yapılmış, uçuş verileri yardımıyla araziye ait yüksek çözünürlüklü ortofoto ve sayısal yükseklik modelinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen uçuş alanı Şekil 7'de verilmiştir. Uçuş alanı içinde analizlerin yapıldığı kırmızı ile çizilmiş çalışma alanı yer almaktadır. Çalışma alanı toplam 36.59 ha'dır. Çalışma kapsamında uçuşlar Yuneec H520 E RTK İHA ile gerçekleştirilmiştir.

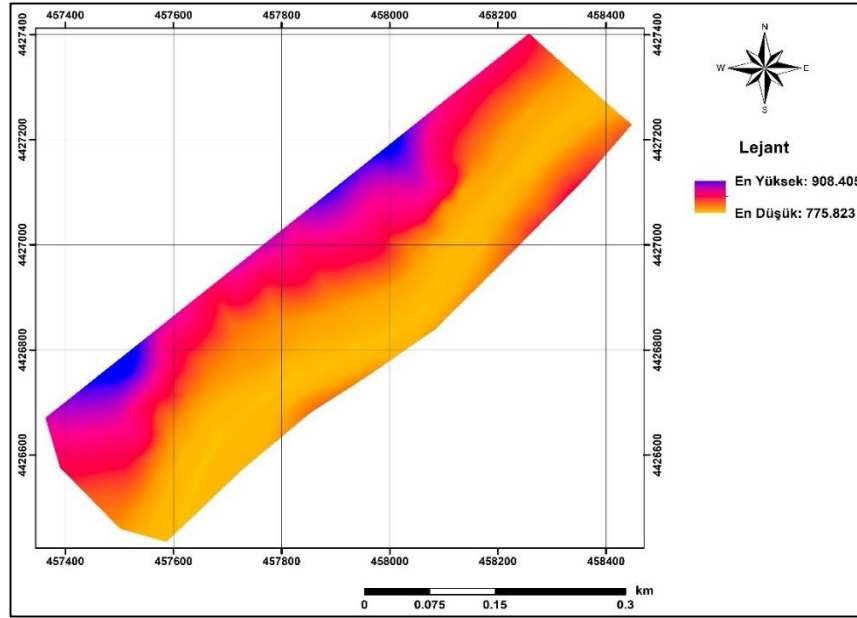
İHA kullanılarak Zir Vadisi'nde bulunan kayalık yamaçların görüntü alımı gerçekleştirilerek, elde edilen verilerin fotogrametrik yazılım ile değerlendirilmesi sonucu bölgenin ortofotosu, nokta bulutu ve katı modeli elde edilmiştir. Bu kapsamda çalışma sahasına homojen dağılımlı Yer Kontrol Noktaları (YKN) tesis edilmiştir. Tesis edilen noktaların koordinatları TUSAGA-Aktif sisteminden faydalanılarak TERSUS

Oscar GNSS alıcısı ile ITRF96 2005.00 koordinat sisteminde ölçülmüştür. Çalışmanın ED50 koordinat sisteminde sonuç ürünlerinin elde edilebilmesi için Harita Genel Müdürlüğü'nün ITRF-ED50 datum dönüşüm parametreleri kullanılarak YKN koordinatları ED50 koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Alanda nadir görüntüleme ile uçuş yapılmış, sonrasında da oblik (45°) görüntü alınmıştır. Nadir uçuşlar %80-%80 ileri ve yan bindirmeli, 3 cm GSD (Ground Sampling Distance-Yer Örnekleme Aralığı) çözünürlüğünde; oblik uçuşlar 1.5 cm GSD ile %80 yan bindirmeli olarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme aşamasında kullanılan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Şekil 8'de verilmiştir. Çalışma kapsamında İHA verileriyle hazırlanan 0.15 m x 0.15 m çözünürlüklü SYM kullanılmıştır (Şekil 8).



Şekil 7. İHA verilerinden elde edilmiş çalışma alanına ait ortofoto

Figure 7. Orthophoto of the study area obtained from UAV



Şekil 8. Çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)

Figure 8. Digital Elevation Model (DEM) of the study area

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

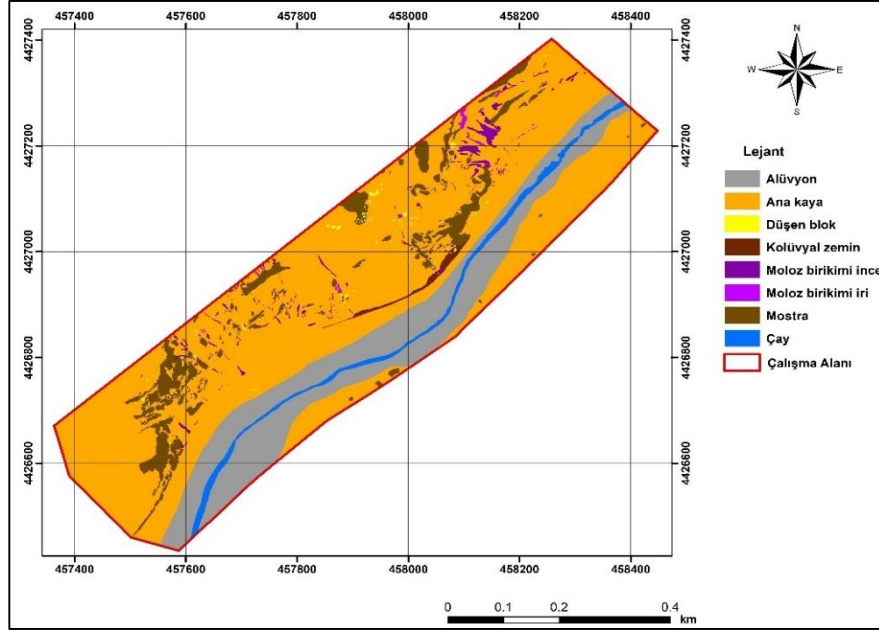
Çalışma alanında daha zayıf özellikte olan bağlayıcı malzemeden ayrılan bloklar kaya düşmelerine neden olmaktadır. Bu kapsamda kaya düşmelerine neden olan Lütésiyen yaşlı Tüf-Aglomera Üyesi'nden örnek alınmaya çalışılmıştır. Bu nedenle gerek bu ayrılan bloklardan ve gerekse bağlayıcı malzemeden alanı temsil eden örnekler alınmış ve değerlendirilmiştir. Ancak bu volkanitlerin bağlayıcı malzemesi kül olup; tüf-aglomera andezit yapısındaki malzeme bağlayıcısı ile örneklenememektedir. Çalışma kapsamında bağlayıcı malzemeden alınan örnek Hacettepe Üniversitesi HÜNİTEK bünyesinde yer alan Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-Scanning Electron Microscope) kullanılarak malzeme ile ilgili petrografik değerlendirme yapılmıştır. Buna göre, birim petrografik olarak serbest mineraller ve mono litolojik kırıntılardan ibarettir. Kırıntılar birimin kendisine aittir. Andezitik bileşimde olduğu belirlenen birim sanidin, plajiyoklaz, amfibol, biyotit ve Fe-Ti oksit mineralleri ile temsil edilmektedir. Tali olarak apatit minerali de gözlenmektedir. Ayrıca birimde alterasyon görülmekte olup; alterasyon killeşme ile temsil edilmektedir.

Kaya düşme alanlarında düşmüş olan bloklar ise ayrıca değerlendirilmiştir. Bu amaçla, bu bloklardan karotlar alınmış, alınan karotlar üzerinde kayaların fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler modelleme aşamasında her bir kaya düşmesi kaynak alanından düşürülecek kaya bloklarının yorumlanmasında katkı sağlamıştır ve girdi

parametresi olarak kullanılmıştır. Bu amaçla 20 adet karot örnek üzerinde yoğunluk, gözeneklilik, sonik hız deneyi (P dalga hızı ve S dalga hızı) ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; malzeme için ortalama kuru yoğunluk değeri 2.26 g/cm³, ortalama gözeneklilik % 4.26, ortalama P dalga hızı değeri 3459 m/s, ortalama S dalga hızı değeri 2230 m/s, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 65.78 MPa olarak belirlenmiştir.

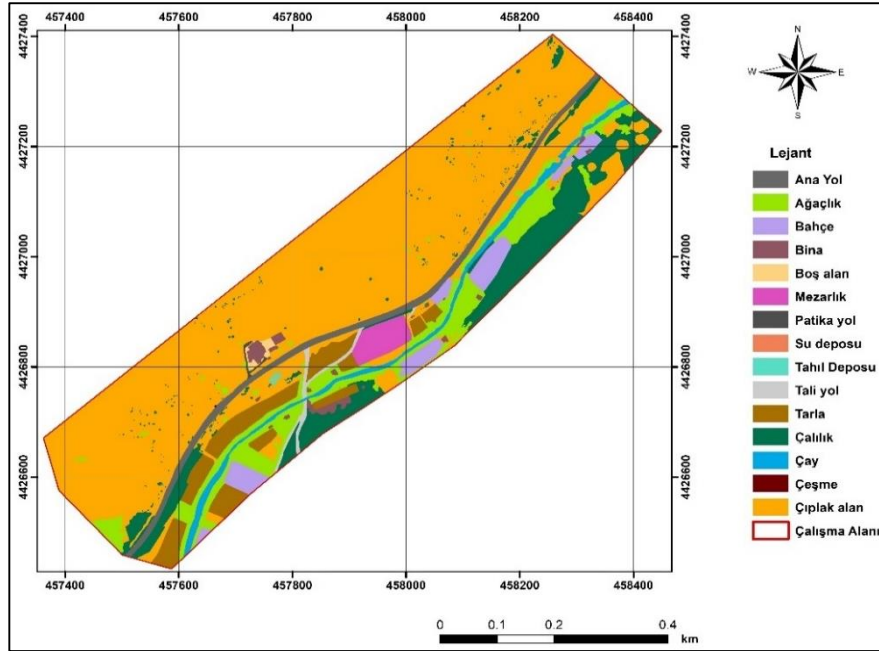
KAYA DÜŞMESİ ANALİZLERİ

Çalışma kapsamında Zir Vadisi ve yakın çevresinde kaya düşmeleri üç boyutlu analizlerle değerlendirilmiştir. Bu amaçla üç boyutlu modellemeye imkan veren ve coğrafi bilgi sistemlerini kullanan HY-STONE (Aglardi vd., 2009) yazılımı kullanılmıştır. HY-STONE Guzzetti vd. (2002) tarafından geliştirilen STONE yazılımının son şeklidir. Çalışmanın bu aşamasında HY-STONE 3B yazılımı için girdi parametresi olacak haritalar hazırlanmıştır. Bu haritaların hazırlanmasında arazi çalışmalarından ve İHA verileri ile hazırlanmış ortofotodan faydalanılmıştır. Böylece çalışma alanında jeomorfolojik açıdan ve arazi kullanımı açısından alan değerlendirilmiş ve CBS yardımıyla sayısallaştırılmıştır. Böylece çalışma alanı için jeomorfoloji haritası (Şekil 9) ve arazi kullanım haritası (Şekil 10) oluşturulmuştur. Yine CBS ortamında jeomorfoloji ve arazi kullanım haritaları çakıştırılarak iki haritanın birleştirilmesinden oluşan özel bir harita olan unique condition haritası elde edilmiştir (Şekil 11).



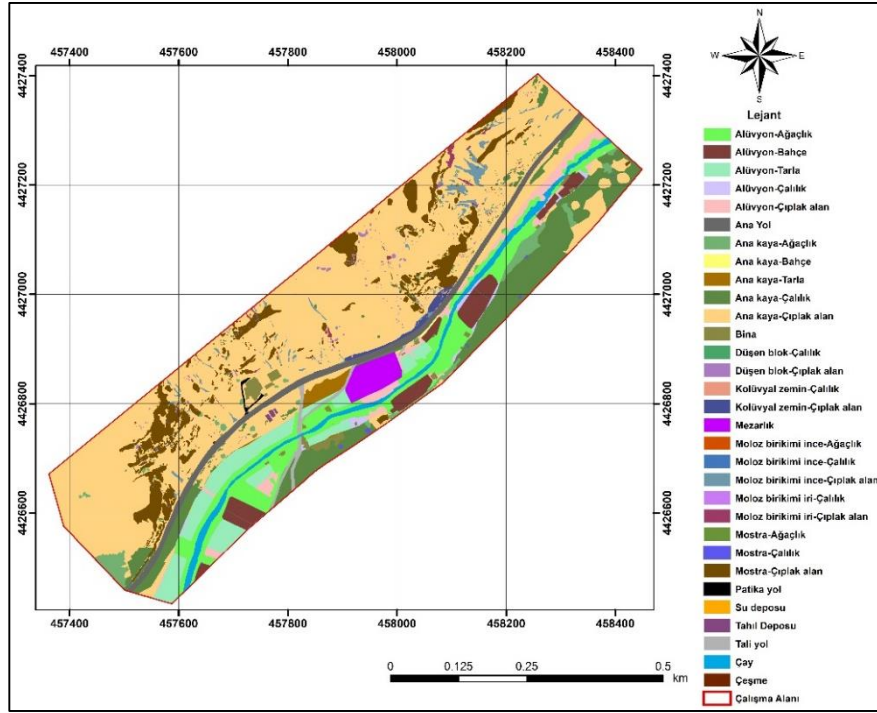
Şekil 9. Çalışma alanı için hazırlanmış jeomorfoloji haritası

Figure 9. Geomorphology map of the study area



Şekil 10. Çalışma alanı için hazırlanmış arazi kullanım haritası

Figure 10. Land use map of the study area



Şekil 11. Çalışma alanı için hazırlanmış unique condition haritası

Figure 11. Unique condition map of the study area

Çalışma kapsamında 3B kaya düşmesi modellemesinde kullanılan HY-STONE yazılımı; sayısal yükseklik modeli (SYM), jeomorfoloji ve arazi kullanım haritalarının birleştirilmesinden elde edilen unique condition haritası, kaya düşmesi kaynak alanı, enerji sönümlenmelerini ifade eden normal ve tanjansiyel katsayılar (normal (E_n) and tangential (E_t) restitution of coefficient) ve yüzey sürtünme açısı (A_t) (rolling friction coefficient), parametrelerini girdi olarak kullanılmaktadır.

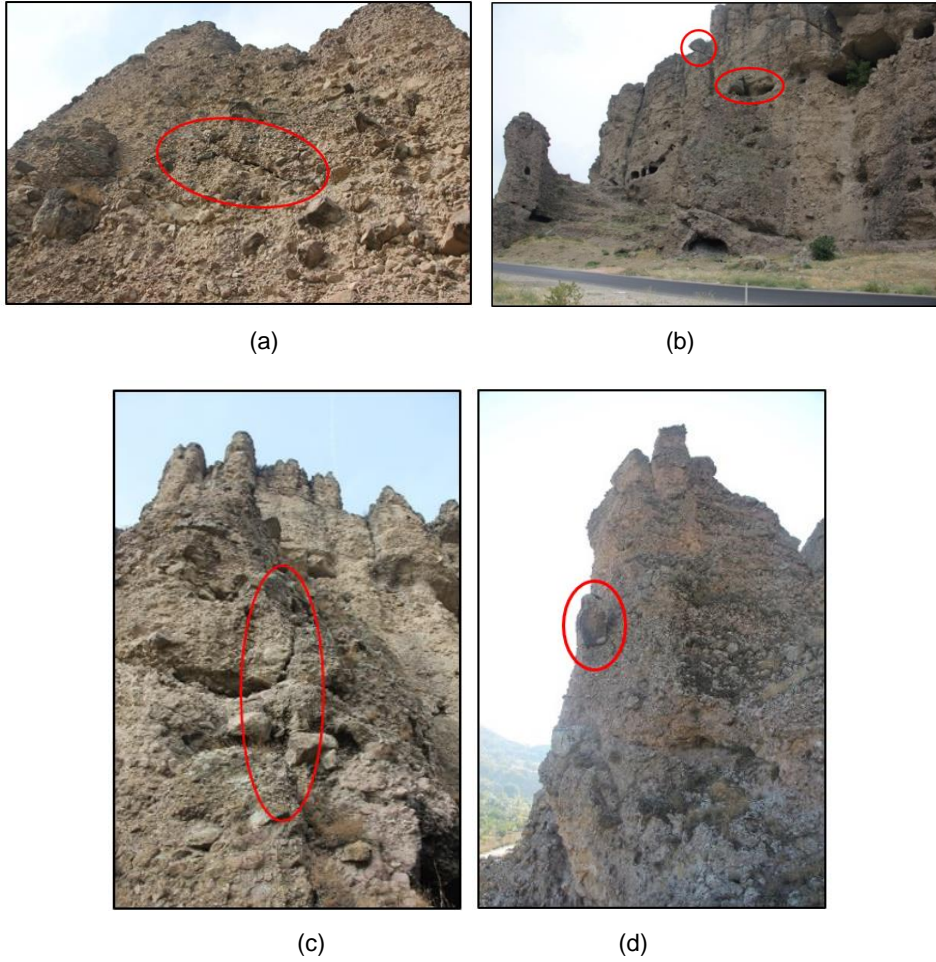
Çalışma kapsamında kaya düşmesi kaynak alanları hem arazi çalışmaları hem de ortofoto kullanılarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda arazi çalışmaları ile, ana kayadan ayrılabilir durumda blok oluşturma potansiyeline sahip ve ayrıca askıda duran çok sayıda alan tespit edilmiştir (Şekil 12). Daha sonra ortofotodan da

yararlanılarak arazide belirlenmiş bu alanlar CBS ortamında sayısallaştırılmış ve çalışma alanı için kaya düşmesi kaynak alanı haritası oluşturulmuştur (Şekil 13).

Çalışma kapsamında kaya düşmesi modellerinin oluşturulması için gerekli girdi parametrelerinden biri de yüzeyle bloklar arasındaki sürtünmeyi ve enerji sönümlenmesini ifade eden parametrelerdir. Kullanılan yazılımda düşen bloğun topoğrafyaya temas ettiği noktadaki enerji sönümlenmelerini kontrol eden normal (E_n) ve tanjansiyel katsayıları (E_t) ve düşen blok ile yüzey arasındaki sürtünme katsayısı (A_t) girdi olarak kullanılmaktadır (Çizelge 1). Bu katsayılar, düşen bloğun ve yüzeyin özelliklerine göre değişim göstermektedir. Literatürde bu katsayıları kontrol eden çok sayıda farklı yüzey tanımları önerilmektedir

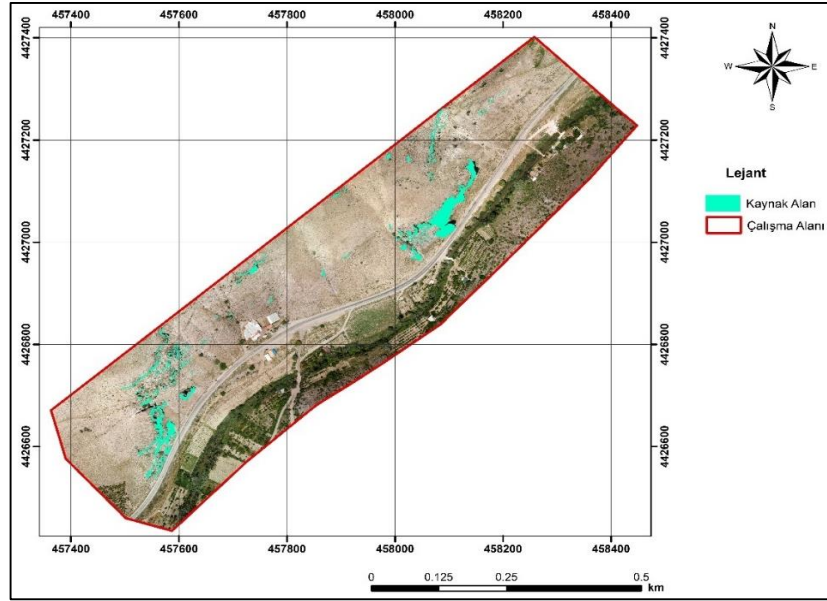
(Crosta vd., 2003; Topal vd., 2007; Frattini vd., 2008; Agliardi vd., 2009; Topal vd., 2012; Dadashzadeh vd., 2014; Agca vd., 2020; Polat, 2020; Dincer vd., 2022). Bu tanımlar; çalışma alanında bulunan jeolojik birimlere ve arazi kullanımına göre değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için çalışılan sayısal arazi modelinin çözünürlüğüne eşit

ya da yakın literatürde kullanılan parametreler değerlendirilmiş ve unique condition haritasında yer alan yüzey özelliklerine göre sönümlenme katsayıları ve sürtünme açıları belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca geriye dönük analizlerle sönümlenme katsayıları kalibre edilmiştir.



Şekil 12. Kaya düşmesi kaynak alanlarında belirlenmiş blok oluşturma potansiyeline sahip alanlar ve askıda duran bloklardan örnekler (a,b,c,d)

Figure 12. Potential rockfall blocks and hanging blocks determined in the source area (a,b,c,d)



Şekil 13. Kaya düşmesi kaynak alanı

Figure 13. Rockfall source area

Kaya düşmesi modellerinde girdi parametresi olan normal ve tanjansiyel sönümlenme katsayıları çalışma alanının uygun olmamasından dolayı arazide elde edilememiş olup; geriye dönük analizlerden ve literatürden belirlenmiştir. Genel olarak sönümlenme katsayıları öncelikle literatürden belirlenmekte ve bu değerler geriye dönük analizlerle kalibre edilmekte ve modellerde kullanılabilir parametrelere ulaşılmaktadır. Düşen blokların lokasyonlarının belirlenmesi; modelleme aşamasında blokların ilerleme mesafelerinin bilinmesi ve modelleme için gerekli parametrelerin kalibre edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu alanda enerji sönümlenme katsayılarının ve sürtünme açılarının belirlenmesine yönelik en önemli sorun düşen blokların orijinal konumlarının tam olarak belirlenemiyor olmasıdır. Çünkü düşen bloklar özellikle düştüğü nokta yol ise trafiğin ilerleyebilmesi için kaldırılmakta, konumları değişmektedir. Bu durum çalışma alanına ait

parametrelerin kalibrasyonunun yapılmasını olumsuz etkilemektedir. Ancak sahada yola düşen bloklar dışında yamaçlara düşmüş ya da yolun karşısına geçmiş ve ilerlemiş bloklar da mevcuttur. Bu alanlar için geriye dönük analizler çok sayıda modelle, olası kaya düşmesi kaynak alanlarından her bir pikselden 20'şer adet blok fırlatılacak şekilde oluşturulmuştur. Böylece çok sayıda farklı iterasyonlar için senaryolar oluşturulmuştur. Blokların hangi kaynak alanlardan düşmüş olabileceği değerlendirilmiş ve böylece sönümlenme katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır. HY-STONE yazılımında 20' yi aşkın model denemesi yapılmış, parametreler için kalibrasyonlar gerçekleştirilmiş ve çalışma alanını en iyi yansıtan parametrelerle analizler gerçekleştirilmiştir. Unique condition haritasında yer alan her bir yüzey özelliğine göre belirlenmiş olan At, En ve Et parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Unique condition haritasında yer alan birimler ile yüzey sürtünme açısı (A_t), normal (E_n) ve tanjansiyel (E_t) katsayılar

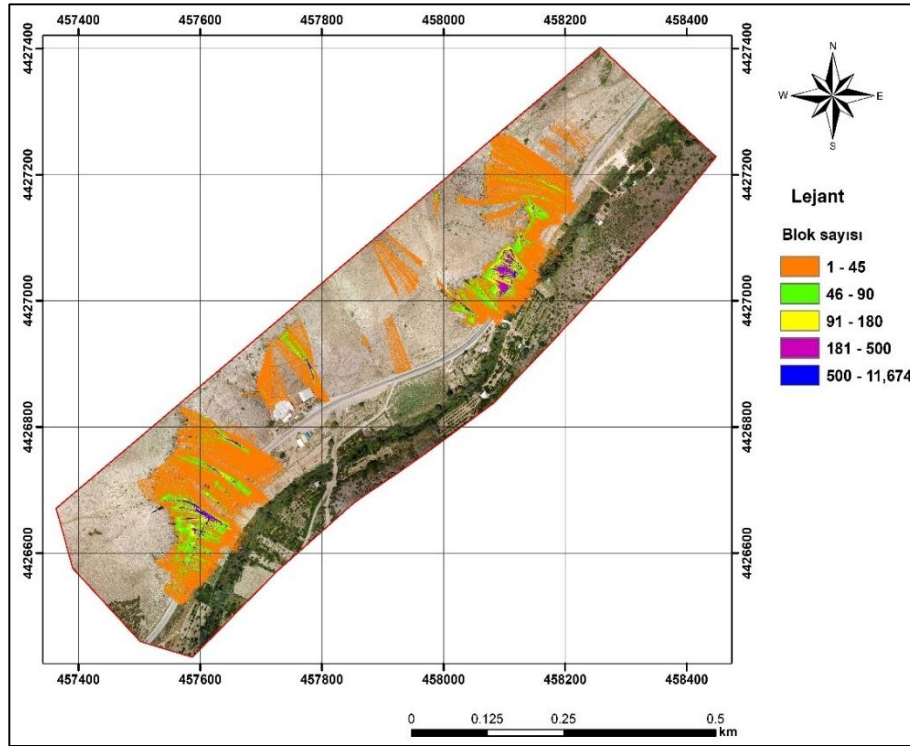
Table 1 . Units of unique condition map and rolling friction (A_t), normal (E_n) and tangential (E_t) coefficients

| Birim | A_t | E_n | E_t |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| Mostra-Çıplak alan | 0.45 | 52 | 75 |
| Mostra-Çalılık | 0.45 | 52 | 68 |
| Mostra-Ağaçlık | 0.55 | 52 | 70 |
| Moloz birikimi ince-Çıplak alan | 0.60 | 37 | 65 |
| Moloz birikimi iri-Çıplak alan | 0.45 | 32 | 65 |
| Ana kaya-Çıplak alan | 0.50 | 47 | 70 |
| Düşen blok-Çıplak alan | 0.45 | 52 | 75 |
| Moloz birikimi ince-Çalılık | 0.63 | 25 | 60 |
| Düşen blok-Çalılık | 0.45 | 52 | 68 |
| Moloz birikimi ince-Ağaçlık | 0.50 | 32 | 60 |
| Ana Yol | 0.30 | 35 | 80 |
| Kolüvyal zemin-Çıplak alan | 0.60 | 27 | 65 |
| Kolüvyal zemin-Çalılık | 0.63 | 27 | 60 |
| Ana kaya-Çalılık | 0.50 | 47 | 66 |
| Alüvyon-Tarla | 0.63 | 27 | 63 |
| Alüvyon-Çalılık | 0.63 | 25 | 60 |
| Çay | 0.30 | 35 | 70 |
| Alüvyon-Çıplak alan | 0.63 | 27 | 65 |
| Ana kaya-Ağaçlık | 0.55 | 44 | 65 |
| Ana kaya-Bahçe | 0.50 | 47 | 67 |
| Bina | 2.00 | 10 | 10 |
| Mezarlık | 1.00 | 30 | 30 |
| Patika yol | 0.30 | 30 | 70 |
| Tali yol | 0.30 | 35 | 80 |
| Su deposu | 2.00 | 10 | 10 |
| Tahıl Deposu | 2.00 | 10 | 10 |
| Ana kaya-Tarla | 0.45 | 52 | 75 |
| Çeşme | 2.00 | 10 | 10 |
| Ana kaya-Çalılık | 0.50 | 47 | 66 |
| Düşen blok-Çalılık | 0.45 | 52 | 68 |
| Moloz birikimi iri-Çalılık | 0.43 | 32 | 64 |
| Alüvyon-Bahçe | 0.62 | 25 | 60 |
| Alüvyon-Ağaçlık | 0.63 | 25 | 61 |

Kaya düşmesi analiz çıktıları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kaya düşmesi analizleri için çok sayıda model çalışması yapılmış olup, araziye en iyi yansıtan model belirlenmiş ve ona ait sonuçlar verilmiştir. Çalışma alanında kaya düşmesi kaynak alanlarından blokların düşmesi durumunda ilerleme mesafesine yönelik değerlendirmeler yapılmış, çalışma alanını en iyi yansıtan model için belirlenen blok sayısı haritası sunulmuştur (Şekil 14). Hazırlanan bu haritaya göre; kaya blokları kaynak alanlarından karayoluna düşebilmekte, hatta bazı alanlarda karayolunu aşıp Ova Çayı'nın bulunduğu alanlara ulaşabilme potansiyeline

sahiptir. Analiz sonuçlarına göre blokların bir kısmı serbest düşme ile parçalanmakta, parçalanmış bloklar düştüğü zeminin sönümlenme özelliğine göre sıçrayabilmekte ve daha küçük bloklar halinde yuvarlanarak enerjilerinin bittiği yere kadar ilerleyebilmektedirler. Modelleme çalışmasında blokların ilk harekete geçebilmesi için sembolik bir hız kazandırılmıştır. Modelleme aşamalarında her bir kaya düşmesi kaynak alanının içindeki her bir pikselden düşürülen blokların izlediği yollar belirlenmiş ve haritalanmıştır. Çalışma kapsamında sunulan model için 4588824 adet kaya düşmesi güzergahı ile çalışılmıştır.



Şekil 14. Blok sayısı ve blok ilerleme mesafesi

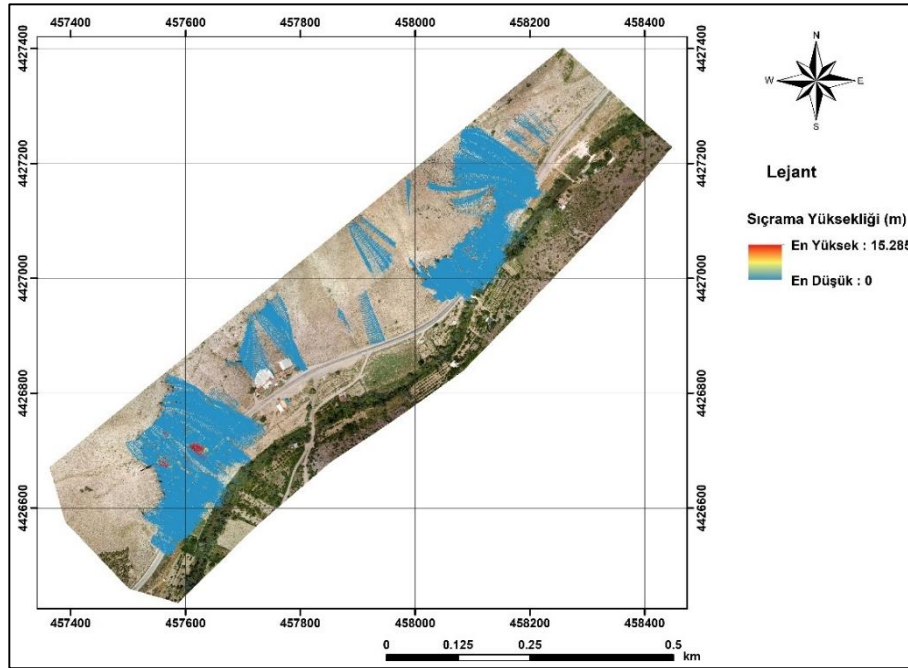
Figure 14. Number of blocks and runout distances

Çalışma kapsamında düşen blokların sıçrama yükseklikleri için de simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve haritalanmıştır. Buna göre; bloklara ait sıçrama yüksekliklerine bakıldığında 15.285 m' ye ulaşan değerler yer almaktadır (Şekil 15). Bu yüksek değerler özellikle şevin en dik ve peri bacası oluşumlarının olduğu kesimlerde yer almaktadır. Çalışma alanında kaynak alanlardan düşen malzemelerin ilerleme yolu incelendiğinde çoğunlukla mostra vermeyen alanlarda yuvarlanma şeklinde ilerlediği, hızının azaldığı, kayaların mostra verdiği alanlarda düşüp enerjisini azaltıp, sekerek yoluna devam ettiği görülmektedir. Yine çalışma alanında her bir pikselden 20'şer adet blok düşürülerek gerçekleştirilen üç boyutlu kaya düşmesi simülasyonu çalışmasında düşen blokların kinetik enerjileri de değerlendirilmiş, buna göre en yüksek toplam kinetik enerji

haritası oluşturulmuştur (Şekil 16). Buna göre düşen blokların yüksek bir kinetik enerji ile hareket edebileceği görülmektedir.

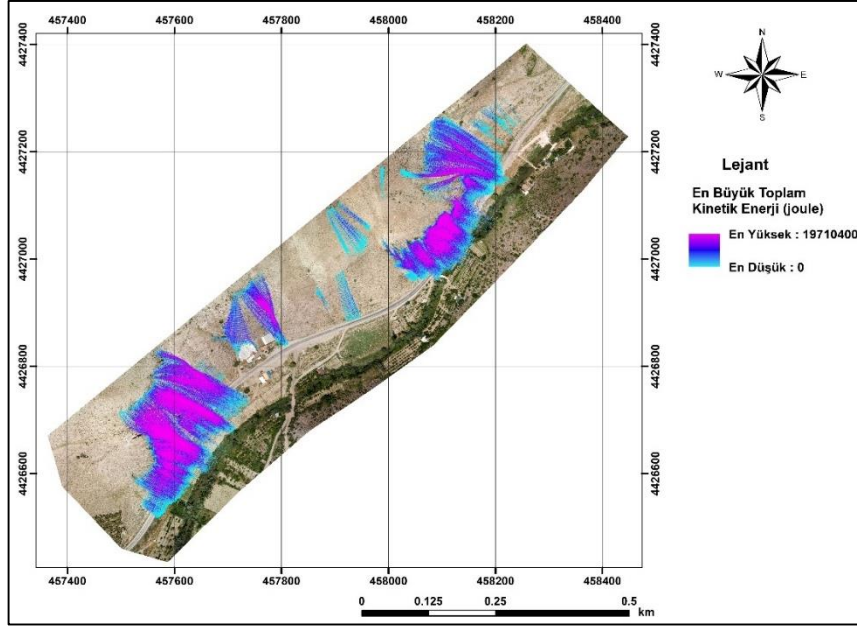
Eğimin özellikle yüksek olduğu kesimlerde kinetik enerji çok yüksektir. Eğimin düştüğü noktalarda, mostralarda ve yola geldiğinde sönümlenme etkisiyle kinetik enerji değerlerinde ani düşüşler gözlenmektedir.

Çalışma alanında, düşmesi olası bloklar için gerçekleştirilen modelleme çalışmasında blokların sahip oldukları hızlar da değerlendirilmiş ve haritalanmıştır (Şekil 17). Buna göre; en yüksek hız değeri bu modelleme için yaklaşık 31 m/s olarak belirlenmiştir. Yine kinetik enerjilere benzer şekilde hızın en fazla olduğu ve hızın arttığı alanların eğimin çok yüksek olduğu ve mostra bulunan alanlardan hızla sekip ilerlediği alanlar olduğu izlenmiştir.



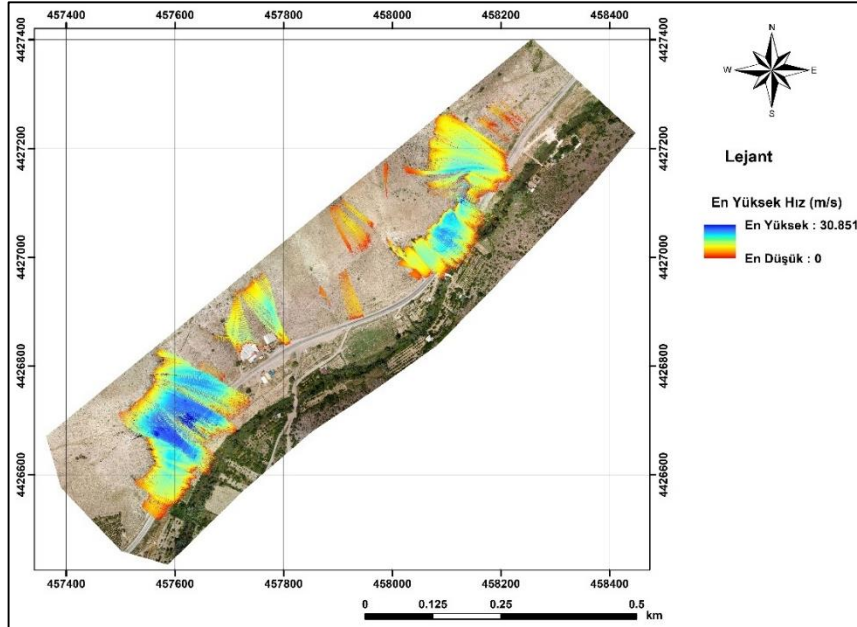
Şekil 15. Blok sıçrama yüksekliği (m)

Figure 15. Block jump height (m)



Şekil 16. Kaya düşme modellemesine ait en yüksek toplam kinetik enerjiler

Figure 16. Maximum total kinetic energy values of rockfall modeling



Şekil 17. Kaya düşme modellemesine ait en yüksek hızlar

Figure 17. Maximum velocities of rockfall modeling

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Zir Vadisi ve yakın civarının kaya düşmesinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada; üç boyutlu kaya düşmesi analiz programı HY-STONE kullanılmıştır. HY-STONE blokların düşme sonrasında izleyeceği yolu üç boyutlu izleme imkanı verebilmekte, tek bir profil üzerinden değil sayısal yükseklik modeli üzerinden çalışmaktadır. Bu durum gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının daha temsil edici sonuçlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Çalışma kapsamında sayısal yükseklik modelinin belirlenmesi amacıyla İHA verilerinden faydalanılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında düşmüş ve potansiyel kaya düşmesi kaynak alanları yerinde tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında Zir Vadisi şevlerinde toplam 36.59 ha alanda kaya düşmesi analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında alanın kaya düşmelerinin mühendislik önlemleri için gerekli karakteristik bilgileri (sıçrama yüksekliği, enerjisi, hızı, yayılma alanı) çıkarılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarından görüldüğü üzere bloklar yüksek hız ve enerjiye ulaşmakta olup, bu durum dikkate alındığında; kaya düşmesi kaynak alanı, risk altındaki eleman olan karayoluna, prefabrik yapılara, su deposu, çeşme, bahçe, ekili tarla gibi alanda bulunan yapılara çok yakındır. Karayolunun hemen kenarında yer alan kaya düşmesi kaynak alanları tehlikenin boyutunu artırmaktadır. Bu nedenle bu alanlarda hasar görme riski artmaktadır. Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen blok ilerleme mesafesi haritasına göre; blokların bir çok alanda karayolunu geçtiği veya karayoluna düştüğü görülmektedir. Kaya düşmeleri özellikle şevlerin hemen eteğinde yer alan karayolunu tehdit etmektedir. Modelleme çalışmalarında kara yoluna düşen blokların hızları sınırlı bir alanda 30 m/s' yi bulmakta olup; yaklaşık ortalama 13 m/s hızla

karayoluna düşmektedir. Yapılan değerlendirmelerle düşen blokların ortalama boyutu 50 cm olup; yola düşmüş ve sonrasında yol kenarına alınmış bloklara bakıldığında bu ortalamanın üzerine çıkan bloklar da yer almaktadır.

Kaya düşmelerinin kaynak bölgesinde yer alan birim; süreksizlikler ve kaya düşmelerinin gerçekleştiği aglomera-tüf özellikte olan malzeme nedeniyle, yağışlı ve donma-çözünme döngülerinin yaşandığı dönemlerde bir dayanım azalmasına maruz kalmaktadır. Dolayısı ile kaynak bölgede suyun varlığı da kaya düşmelerini tetiklemektedir. Bu alanda suyun drene edilmesine yönelik yapılacak çalışmalar gerek kaya düşmesi ve gerekse yamaçlarda biriken molozların ileride hareketine neden olacak bir başka doğal tehlikenin ortaya çıkmasını önlemede de katkı sağlayacaktır.

Çalışma, doğal sit-sürdürülebilir koruma ve kontrollü kullanım alanı olarak tescil edilmiş bir bölgenin, yoğun bir araç akışının bulunduğu bir karayolunun ve bölgedeki diğer risk altındaki elemanların kaya düşmelerinden korunması için gereken çalışmaların yapılabilmesi için literatüre önemli katkı sağlayacak niteliktedir. Bu çalışma ülkemizde gerek jeolojik miras olarak bulunan doğal oluşumların ve gerekse tarihi ve kültür mirası şeklindeki yapıların korunması konusunda ileride yapılacak çalışmalarda da yol gösterici nitelikte olacaktır. Bu kapsamda gerçekleştirilen modelleme çalışmaları Zir vadisi ve şevleri için yapılan ilk sistematik çalışma olup, bu metodolojinin hem Zir vadisi hem de diğer kültür varlıkları için kullanılması mühendislik uygulamalarının etkinliğini artıracaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi FHD-2022-20045 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Yazar, HY-STONE yazılımının kullanımı için, Prof. Dr. Giovanni Battista Crosta'ya, Prof. Dr. Paolo Frattini'ye ve Doç.Dr. Federico Agliardi'ye, arazi çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisi H. Serkan Tezer'e, laboratuvar çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisi Zeynel Gök ve Jeoloji Mühendisi Serkan Pişmiş'e teşekkürlerini sunar. Ayrıca yapıcı eleştirileri için hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Agliardi, F., Crosta, G., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 455–471.
- Agliardi, F., Crosta, G. B. and P. Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1059–1073.
- Ağca, M., Yeşiloğlu-Gültekin, N., Efdal Kaya, E., 2020. İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. *Geomatik Dergisi*, 5(2); 134-145.
- 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.
- Akyürek, B., Duru, M., Sütçü, Y.F., Papak, İ., Şaroğlu, F., Pehlivan, N., Gönenç, O., Granit, S., Yaşar, T., 1997. 1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara-F15 Paftası, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Albarelli, D. S. N. A., Mavrouli, O. C. Nyktas, P., 2021. Identification of potential rockfall sources using UAV-derived point cloud. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80:6539–6561.
- Alptekin, A., Çelik, M.Ö., Doğan, Y., Yakar, M., 2019. Mapping of a rockfall site with an unmanned aerial vehicle, Mersin *Photogrammetry Journal*, 1(1); 12-16 Mersin *Photogrammetry Journal* <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mephoj>
- Assali, P., Grussenmeyer P., Villemin T., Pollet N., Viguiet, F. 2014. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114.
- Bilgin, A.Z., 2014. 1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara İ28 Paftası, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Bilgin, H.A., Düzgün, Ş., Aras, C., Kemeç, S., Gündoğan, Ü., Çakmak, B.B., 2012. Mardin Kalesi Kaya Düşmeleri Analizi ve Alınabilecek Önlemler Raporu, Kuzgun Bilişim Danışmanlık Madencilik İnşaat Enerji Mimarlık Eğitim ve Ticaret Ltd. Şti., Teknokent Projesi.
- Chiabrande, F., Lingua, A., Piras, M., 2013. Direct Photogrammetry using UAV: Tests and First Results. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, 4 – 6 September 2013, Rostock, Germany
- Crosta, G.B. and F. Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 407–422
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü. 2018. <https://tvk.csb.gov.tr/ankara-ili-sincan-ilcesi-zir-vadisi-dogal-sit-alani-dogal-sit->

- surdurulebilir-koruma-ve-kontrollu-kullanım-alani-olarak-tescil-edilmistir.-duyuru-366770 (Erişim Tarihi: 01.05.2023)
- Dadashzadeh, N., C. Aras, C., N. Yesiloglu, N., Bilgin, A., Duzgun, H.S.B, 2014. Analysis of Potential Rockfalls and Protection Measures for the Mardin Castle, Turkey. Eurock 2014 conference proceeding.
- Dinçer İ., Akın M., Orhan A., 2022. Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Analizi: Kapadokya Bölgesinden Bir Örnek. Yer Mühendisliği Dergisi, 46-59.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Türkecan, A., Evcimen, Ö., Atakay, E. ve Görmüş, T., 2009. Ankara ve Yakın Çevresinin Tersiyer Volkanitleri. MTA Rapor No: 11164, Ankara.
- Ersoy, O., 2003. Soğumakta Olan Lav Akıntısının Patlamalı Çökmesi İle Oluşan Blok ve Kül Akışının ve Patlama Zonu Özelliklerinin İncelenmesi. Zir Çayı Lav Akışı Örneği, KB Ankara, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s., Ankara.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94, 419-437.
- Giordan, D., Manconi, A., Facello, A., Baldo, M., dell'Anese, F., Allasia, P., Dutto, F., 2015. Brief Communication: The use of an unmanned aerial vehicle in a rockfall emergency scenario *Natural Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 163–169.
- Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28, 1079–1093.
- Keskin, I., 2013. Evaluation of rock falls in an urban area: the case of Boğaziçi (Erzincan/Turkey). *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-013-2247-9.
- Öztürk, M.Z., Utlü, M., Şimşek, M., 2022. Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde), *Yerbilimleri*, 43 (2), 182-196.
- Polat, A., 2020. CBS Tabanlı 3B Kaya Düşmesi Analizi ve Veri Hızılama Süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, Sayı 3.
- Sadagah, B., 2010. Rockfalls risk reduction and redesign of rock slopes using rockfall program. *ISRM International Symposium 6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering*, New Delhi, India.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M., Tomás, R., Pastor, J.L., Cano, M., Herrera, G., 2018. Rockfall Simulation Based on UAV Photogrammetry Data Obtained during an Emergency Declaration. Application at a Cultural Heritage Site, *Remote Sens.*, 10, 1923; doi:10.3390/rs10121923
- Saroglou, C., Asteriou, P., Zekkos, D., Tsiambaos, G., Clark, M. and Manousakis, J., 2018. UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic rockfall in Lefkada island, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 321-333.

- Şasi, A. and Yakar, M., 2018. Photogrammetric modelling of Hasbey Dar'ülhuffaz (masjid) using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3 (1), 6- 11.
- Şener, E., 2019. İnsansız Hava Araçları Kullanılarak Olası Kaya Düşmelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı 3D Modellenmesi: Kasımlar Köyü (Isparta-Türkiye) Örneği, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23 (2), 419-426.
- Tagliavini, F., Reichenbach, P., Maragna, D., Guzzetti, F. and Pasuto, A., 2009. Comparison of 2-D and 3-D computer models for the M. Salta rock fall, Vajont Valley, northern Italy. *Geoinformatica*, 13, 323–337.
- Topal, T., Akin, M., Ozden, U.A., 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environ Geol*, 53, 191–200.
- Topal, T., Akin, M. K., Akin, M., 2012. Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Nat Hazards*, 62, 255–274.
- Tunusluoglu, M. C., Zorlu K., 2009. Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental Geology*, 56, 963–972.
- Uğur, H., Akpınar, N., 2003. Yenikent Zir Vadisinde Yer Alan Kum Ocaklarının Neden Olduğu Çevre Sorunları ve Bu Alanların Geri Kazanım Olanakları, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 9 (1) 35- 39.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z.A., and Kasmer, Ö., 2006. Assessment of environmental and engineering geological Problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology*, 50, 473-494.
- Ulvi, A. and Toprak, A.S., 2016. Investigation of three-dimensional modelling availability taken photograph of the unmanned aerial vehicle; sample of kanlıdivane church. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 1(1), 1- 7.
- Utlu, M., Öztürk, M.Z., Şimşek, M., 2020. Rockfall analysis based on UAV technology in Kazıklıali Gorge, Aladağlar (Taurus Mountains, Turkey). *International Journal of Environment and Geoinformatics* 7(3): 239-251.
- Varol O.O., Mutluhan, A., Orhan A, Dinçer İ., 2023. Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Olasılıksal Analizlerle ve Ampirik Yöntemlerle Değerlendirilmesi: Kayseri-Soğanlı Yerleşim Yeri Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 47:1–28.
- Vasuki Y., Holden, E., Kovesi, P., Micklethwaite, S. 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22–32.
- Wang, X., Zhang, L., Wang, S., Agliardi, F., Frattini, P., and Crosta, G.B., 2012. Field investigation and rockfall hazard zonation at the Shijing Mountains Sutra caves cultural heritage (China). *Environmental Earth Sciences*, 66, 1897-1908.
- Yesiloglu-Gultekin, N.,Gokceoglu, C.,Sonmez, H., 2012. Geohazard reconnaissance mapping for a settlement area. *Environmental Earth Sciences*, 66, 6, 1653-1666.