

## Üç Boyutlu Kaya Düşmesi Analizlerinde Blok Geometrisi Etkisinin İncelenmesi (Gölbaşı, Ankara)

*Investigation of the Effect of Block Geometry in Three-Dimensional Rockfall Analyses (Gölbaşı, Ankara)*

Ülkü Burcu ZENGİN<sup>1</sup> , Koray ULAMIŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>OCK Madencilik, Çankaya, Ankara, Türkiye e-posta: burcuzengn@hotmail.com

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara, Türkiye

Geliş (Received):26/06/2025 / Düzeltme (Revised): 09/09/2025 / Kabul (Accepted): 07/11/2025

### ÖZET

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinde gelişen en yaygın duraysızlıklardan olan kaya düşmesi, yapıları ve insan hayatını tehdit eden boyutlara varabilmektedir. Kaya düşmesi incelemelerinde süreksizlik karakterizasyonunun ve kaynak kaya alanının dikkatli şekilde incelenmesi gereklidir. Bu çalışmada, Ankara ili Gölbaşı ilçesi sınırlarındaki Oyaca Mahallesi yerleşim alanında andezitler içinde gelişen kaya düşmeleri kapsamında blok geometrisinin üç boyutlu kaya düşmesi analiz sonuçlarına olan etkisi incelenmiştir. Arazide süreksizlik karakterizasyonu hat incelemeleri ile gerçekleştirilmiş ve Barton profilometresi ile pürüzlülük profilleri farklı kesitlerde incelenmiştir. Arazinin güney yamacı andezit, batı yamacında ise kaynak kaya alanı ile yerleşim alanı arasında yamaç molozu olduğu belirlenmiştir. El örneklerinde petrografik tanımlamalar yapılarak, araziden alınan blok örneklerden hazırlanan karot örneklerin birim hacim ağırlık ve tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenmiştir. İnsansız Hava Aracı (İHA) ile elde edilen görüntülerden hazırlanmış olan inceleme alanına ait gerçek ortofoto mozaığı kullanılarak inceleme alanına ait sayısal yüzey modeli (SYM) fotogrametrik yöntem ile elde edilmiştir. Kaynak kaya alanlarından düşebilecek ve halihazırda düşmüş olan blokların lokasyonları belirlenmiştir. Andezitlerde süreksizlik yönelimine bağlı olarak güney ve batı yamaçta hem dairesel hem de silindirik blokların bulunması nedeni ile her iki geometrik yapı için üç boyutlu analizler yapılmıştır. Arazide iki yamaçta yapılan üç boyutlu analizler ile blokların kinetik enerji, toplam yuvarlanma hızı, sıçrama yükseklikleri ve kaya düşmesi riskinin alansal dağılımları belirlenmiştir. Sonuç olarak küresel blokların ulaşma mesafeleri ve kinetik enerjilerinin silindirik bloklara göre yüksek olduğu, sıçrama yüksekliğinde belirgin bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya düşmesi, İHA, 3B analiz, blok geometrisi

### ABSTRACT

Rockfall is one of the most significant types of instability within discontinuity bearing rock masses, which might threaten the built environment and human life. Therefore, cautious investigation of discontinuity characterization and source rock areas should be performed. This study aims to investigate the effect of block shape on the results of 3D rockfall analysis within andesites located within Oyaca residential area in Gölbaşı, Ankara. Discontinuity surveys of andesites were performed, and the roughness profiles of several discontinuity sections were determined with a Barton profilometer. The southern slope of the hill is comprised of andesites and slope debris covers the western

*slope between the source rock and residential areas. Hand samples were collected for petrographic evaluations, unit weight and uniaxial compressive strength were tested in cores obtained from the blocks. The precise locations of the fallen blocks and potential blocks within the source rock area were identified using a digital surface map produced from a real orthophoto mosaic based on the photogrammetric method in unmanned aerial vehicle (UAV) studies. Three-dimensional rockfall analyses were carried out using both spherical and cylindrical blocks with respect to discontinuity orientations on the southern and western slopes of the hill. The spatial distribution of kinetic energy, total velocity, bounce height and rockfall risk were specified based on three-dimensional analyses for both slopes. It is concluded that the runout distance and kinetic energy of spherical blocks are higher when compared to cylindrical blocks; however, no distinct variation was observed in terms of bounce height.*

**Keywords:** Rockfall, UAV, 3D analysis, block geometry

## GİRİŞ

Kaya kütlesi, sağlam kaya ve farklı yönelimlere sahip süreksizliklerden oluşmakta olup süreksizliklerin birbirleri ile kesişmesine bağlı olarak farklı geometrik bloklar oluşmaktadır. Eğimli arazilerde yer çekimi başta olmak üzere bozunma/ayırışma, aşırı yağış, kazı ve sismik aktivite gibi etkiler ile kaya blokları serbest hale gelerek, eğim yönünde hareket edebilmektedir. Geleneksel iki boyutlu analizler ile kaya düşmesinin alansal dağılımı belirlenemediğinden, üç boyutlu analizler ile düşen blokların hareket mekanizması daha detaylı anlaşılabilir. İki boyutlu analizler kesitler ile sınırlı olduğundan, üç boyutlu analizde elde edilen alansal dağılıma göre önlem yöntemlerinin projelendirilmesi daha sağlıklı olmaktadır.

Lan vd. (2007), ArcGIS yazılımı için kaya düşmesinin alansal dağılımını hücre bazında belirleyebilen ve bariyer analizi yapabilen RockFall Analyst eklentisini geliştirerek, Kanada demiryollarındaki bir sahaya uygulamış ve sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Agliardi vd. (2009), Fiumelatte'da (İtalya) gelişen kaya düşmesini inceleyerek, üç boyutlu modelleme ile Kantitatif Risk Analizi yapmış ve uygun önlemleri incelemişlerdir. Üç boyutlu sayısal modellemenin kaya düşmesi alansal afet riskinin belirlenmesinde uygun olduğunu

vurgulamışlardır. Budetta (2011) Salerno Eyaleti'nde (İtalya) meydana gelen kaya düşmesinde uç noktalarının dağılımını elde etmek için afet senaryoları ile eş enerji dağılımı yapmış ve kaya düşmesinde kritik alanları belirleyerek güçlendirilmiş sedde önermişlerdir. Pilz vd. (2011), açık maden işletmesindeki şevde gelişen kaya düşmelerini inceleyerek blokların yuvarlanma hızlarını belirlemişlerdir. Hy\_Stone yazılımına yapılan eklenti ile düşme hareketi esnasında bloktan kopabilecek kaya parçalarının ve parçaların hareket yörüngesinin belirlenebildiğini belirtmişlerdir. Saroglou vd. (2012), güney Yunanistan'da yerleşim alanlarını tehdit eden kaya düşmelerini inceleyerek jeolojik ve iklimsel girdilerin de bulunduğu risk sınıflaması geliştirmişler ve parametrelerin ağırlık değerlerine göre aktif ve pasif kaya düşmesi önlem yöntemlerinin belirlenebileceğini vurgulamışlardır. Chen vd. (2013), kaya düşmesi analizinde hareket yörüngesini belirlemede süreksiz deformasyon analizi yöntemi (DDA) sonuçlarını karşılaştırmışlar ve üç boyutlu analizin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Thoeni vd. (2014), üç boyutlu analiz de ayrık elemanlar yöntemi ile kaya bloklarını rijid kürelerden oluşan bir bütün ve yamacı üçgen elemanlardan oluşan bir bütün olarak modellemiş ve modeli kalibre ederek hem kaya blok yörünge ve hızlarının hem de önlem yöntemi performansının kestirilebileceğini

belirtmişlerdir. Li vd. (2016), farklı geometrik prizmatik kaya bloklarının normal ve teğet sıçrama katsayılarının tayini için deney düzeneği geliştirmişlerdir. Düzenekte farklı yamaç eğimi ve farklı geometrik blokların çarpma açıları, çarpma öncesi ve sonrasındaki kinetik enerji değişimleri incelenerek çarpma esansında en fazla enerji kaybının olduğu vurgulanmıştır. Kalender (2017), Kargabedir Tepe ve Sivrihisar'da belirlenen kaya düşme alanlarında kaya düşmesini konik yayılım ile inceleyerek, kaya düşmesinde önemli parametrelerden olan menzil mesafesi için maksimum menzil puanı (MMP), enerji çizgi açılarının öngörülebileceği (EÇA) ve kaya düşmesi tehlike puanlamasını (RHR) önermiştir. Wendeler vd. (2017) İsviçre'de kireçtaşlarında üç boyutlu kaya düşmesi analizleri için farklı görüntülemeleri inceleyerek, analiz sonuçlarının arazideki gerçek durumu yansıtabilmesi adına 25 cm çözünürlüklü DEM görüntülerinin uygun olacağını vurgulamışlardır.

Çapar (2018) kaya düşmesi analizlerinde blokların sıçrama katsayısını inceleyerek, görüntüleme ile katsayıların belirlenmesinin sorunlu olduğunu vurgulamıştır. Özellikle farklı yazılımlardaki temel girdi parametrelerinden olan normal ve teğet geri sıçrama katsayılarının belirlenmesindeki eksikliklerinin olduğu belirtilmiştir. Akın vd. (2019) Akköy (Ürgüp) yerleşim alanında düşen ve muhtemel düşebilecek kaya bloklarının yerleşim alanlarına ulaşmaması için kaya tutma hendeğinin performansını üç boyutlu kaya düşmesi analizleri ile değerlendirmişlerdir. Polat (2020) Sivas ili Yıldızeli ilçesi Kavak köyü civarındaki kaya düşmelerinin analizi için Rockyfor3D yazılımı ve yazılıma veri hazırlayabilen CBS tabanlı eklentiye kullanarak blokların sıçrama yükseklikleri, kinetik enerjileri, ulaşma mesafeleri ve zamanları gibi parametreleri hesaplamıştır. Utlu vd. (2020) Aladağlar'da yer

alan Kazıklıali civarında arazinin sarp ve dar vadi kesimlerinde kaya düşmesi olasılığının daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Düşen blokların çaplarını sayısallaştırarak blok boyutlarının frekanslarını belirlemişlerdir. Ağca vd. (2020) Mersin, Erdemli, Adam Kayalar bölgesinde kaya düşmesi kaynak alanlarını fotogrametrik analizler ve İHA yardımıyla belirleyerek düşme potansiyeline sahip blokları modellemişlerdir. Peik (2020) üç boyutlu kaya düşmesi analiz yazılımlarını karşılaştırarak Rock Pathfinder yazılımını geliştirmiştir. Knowles vd. (2021) kaya düşmesi önlemlerinden olan gabyon duvarda farklı geometrik blokların çarpması ve enerjilerini sönmelenmesini inceleyerek, gabyon ile blok ara kesitindeki geliştirilen modelin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Alemdağ vd. (2021) Gümüşhane ili Oltanbey ve Hasanbey mahallelerindeki kaya düşmelerinde üç boyutlu analizler yaparak hangi kaynak kaya alanlarının daha yüksek risk taşıdığını incelemişler ve farklı özelliklerdeki bariyer tiplerini önermişlerdir. Keskin ve Polat (2022) Safranbolu doğusunda olası kaya düşmelerinin kinematik kontrollü başlayıp, yuvarlanma ve devamında sıçrama ile devam edeceğini ifade etmişlerdir. Alvioli vd. (2022) İtalya'da kaya düşmelerinin statik ve sismik koşullarda nasıl tetikleneceğini incelemiş ve senaryo deprem girdisi ile olasılıklı haritalar üretmişlerdir. Dinçer vd. (2022) Kapadokya Tatların Yeraltı Şehri ve civarında düşen kaya bloklarının kinetik enerjilerinin çok yüksek olduğunu ve önlem alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Öztürk vd. (2022), Niğde ili merkez ilçede bulunan Murtaza köyündeki yerleşimi tehdit eden kaya düşmelerini inceleyerek, önlem yöntemi olarak istinad duvarı önermişlerdir. Zhang vd. (2022) tünel portalında gelişen kaya düşmelerinin incelenmesinde 2018 yılında geliştirilen ve konvansiyonel düşey ve oblik görüntülemeye

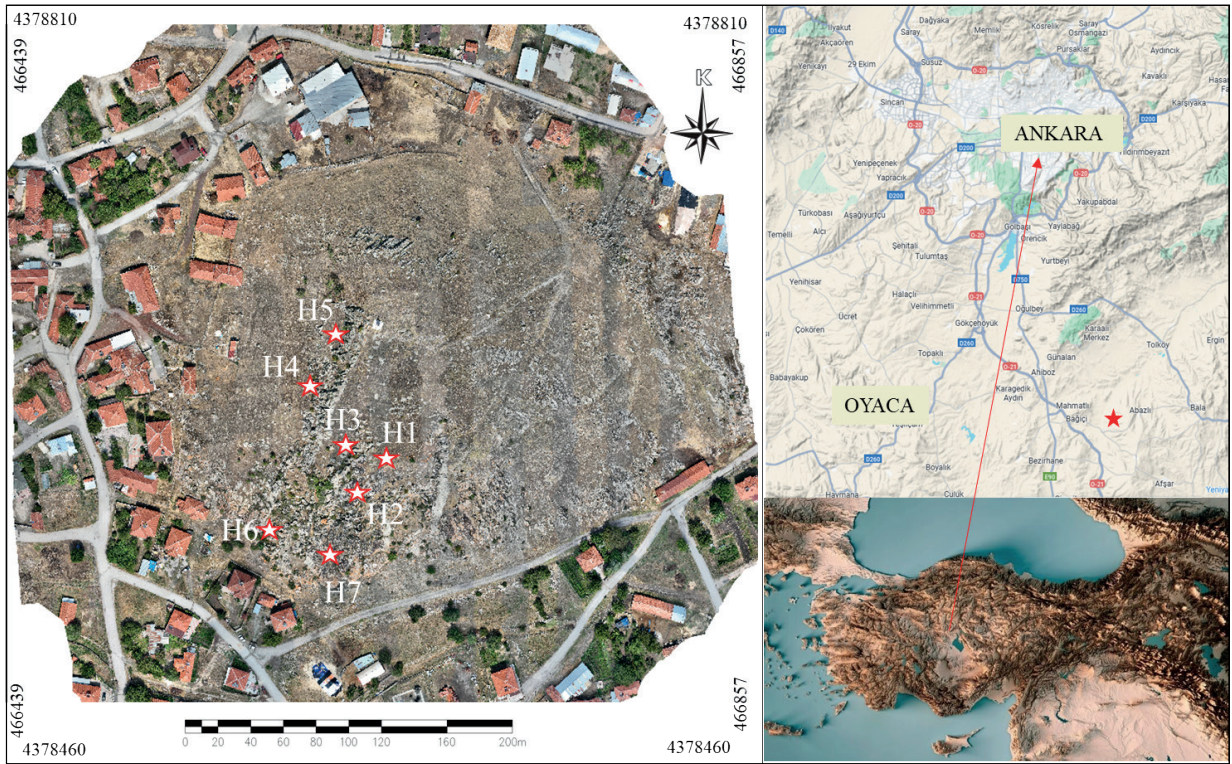
göre özellikle kırık zonlarının da detaylı olarak görüntülenebildiği obje fotogrametrisi ile üç boyutlu model oluşturmuş ve kaya düşmesi analizleri gerçekleştirmişlerdir. Farmakis vd. (2023) Kanada ve ABD’de farklı sahalar için 3B bilgisayar görüntüleme algoritmasını yapay zeka destekli geliştirerek uzun dönem kaya düşmesi hassasiyetini incelemişlerdir. Sonuçta oluşturulan hassasiyet haritalarının performansının başarılı olduğunu vurgulamışlardır. Clemente vd. (2023) İspanya’nın Bask bölgesindeki kumulların çevresindeki doğal yamaçlardan düşebilecek kaya bloklarının hareketini engelleyebilecek doğal bir bariyer görevi yapabileceğini belirlemişlerdir. Analizlerde altlık olarak yersel lazer tarama kullanmışlardır. Caymaz (2023) Mersin ili Erdemli ilçesi, Karahıdırlı mahallesi yerleşim alanını tehdit eden kaya düşmelerinin üç boyutlu analizini gerçekleştirmiş ve iki farklı kaynak kaya için dinamik çelik tel bariyer, güçlendirilmiş sedde ve ankrajlı yüzey örtülmesi olmak üzere iki farklı önlem yöntemi önermiştir. Karahan vd. (2023), Trabzon-Akçaabat Işıklar mevkiindeki kaya şev duraysızlıkları ile kaya düşmelerini inceleyerek üç farklı alan için önlem önerilerini değerlendirmişlerdir. Hacıabdullah köyü (Niğde) çevresindeki kaya düşmeleri incelenerek kaya düşmesi afet haritaları hazırlanmış ve kaya düşmesinin orta-yüksek riskli olduğu belirtilmiştir (Utlı vd., 2023). Varol vd. (2023) Soğanlı (Kayseri) civarındaki kaya düşmelerinin olasılıksal ve enerji hattı ile analizini yaparak ampirik model, üç boyutlu yaklaşım ve düşmüş blok konumlarının uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Yeşiloğlu-Gültekin (2023), Ankara Zir vadisindeki kaya düşmelerini Hy\_Stone yazılımı ile inceleyerek karayolunu tehdit eden kaya düşmelerinin önlenmesi için önerilerde bulunmuştur.

İnceleme alanı ve yakın çevresinde jeolojik ve petrolojik çalışmalar yapılmıştır. Bozkurt

vd. (1999) Oyaca ve Kedikayası dasitlerini inceleyerek kimyasal olarak farklı, ancak aynı magmatik kaynaktan türediğini belirtmiştir. Alıcı Şen (2009); Boyalık volkanik kayaçlarının kökenini ve iz elementlerini inceleyerek kayaçların alkali ve kalk-alkali özellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Şen ve Şen (2013) Oyaca Kedikayası ve Boyalık dasitlerinin alkali ve kalk-alkali Miyosen dasitik kayaçların ise adakit bileşimli olduğunu belirtmiştir. Ankara ili Gölbaşı ilçesine bağlı Oyaca semtinde arazi gözlemlerinde Üst Miyosen yaşlı Tekke volkanitleri içindeki andezitlerden (Akyürek vd., 1997) oluşan yamaçta üç farklı doğrultuda belirlenen kaynak kaya alanlarından geçmişte düşerek ve yuvarlanarak çevre yapılarına ulaşan farklı boyutlarda bloklar tespit edilmiştir. Kaynak alanlarında hareket etmesi muhtemel blokların şekil ve boyutları ulaşılabilen bloklarda ölçülmüş, süreksizliklerin yönelimleri ve karakterizasyonu yapılmıştır. Düşme potansiyeli bulunan kaynak alanlar ve yamaç geometrisinin belirlenmesi için İHA ile ortofoto ve sayısal haritalar üretilmiştir. Üç boyutlu analizler RockPro3D yazılımı ile iki farklı kaynak kaya alanı için küresel ve silindirik şekilli kaya blokları dikkate alınarak yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

## ARAZİ İNCELEMELERİ

İnceleme alanında kaynak kaya alanındaki andezitlerde süreksizlik karakterizasyonu için farklı doğrultularda hat incelemeleri ISRM (1981)’e göre yapılmıştır (Şekil 1). Kaya düşme risk hesaplanmasında kullanmak amacıyla Schmidt çekici ve pürüzlülük profili için Barton profilometresi kullanılmıştır. Laboratuvarda fiziksel ve mekanik deneyler (tiltmetre ve tek eksenli sıkışma dayanımı) için blok kaya örnekleri alınmıştır.

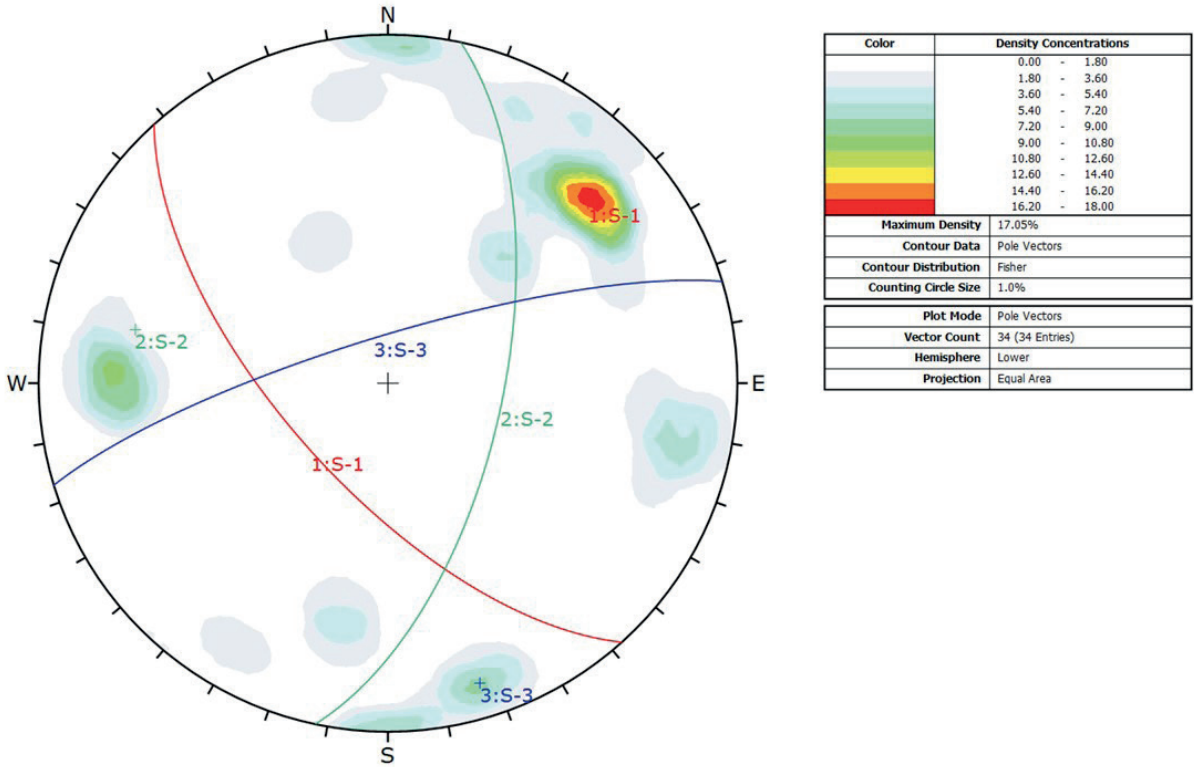


Şekil 1. İnceleme alanı ve hat etütlerinin ortofoto üzerinde gösterimi (Zengin, 2024).

Figure 1. Illustration of the study area and survey lines on orthophoto (Zengin, 2024).

Çalışma alanında süreksizlik konumları ve yönelimlerine göre 7 adet hat için inceleme yapılmıştır. Hat incelemeleri süreksizlik konum ve yönelimlerine göre arazide gerçekleştirilmiştir. Toplam 34 adet süreksizlik yönelimi belirlenerek Schmidt eş alan stereoneti üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2). Süreksizliklerin kutup noktalarının konturlama işlemi Fisher dağılımına göre yapılmıştır. Arazide blok oluşturan üç adet hakim setin yönelimi; S1 ( $66^{\circ}/228$ ), S2 ( $63^{\circ}/102$ ) ve S3 ( $79^{\circ}/34$ ) olarak belirlenmiştir. Hakim setlerden olmasa da  $75^{\circ}/283$  (S4) olan tali bir süreksizlik tanımlanmıştır. S4 süreksizliği arazide diğerlerine göre daha az sayıda ve lokasyonda belirlenmiştir. Ayrıca, devamlılığı birkaç santimetre olan ve hakim olmayan süreksizlikler kapsam dışında tutulmuştur.

İnceleme alanının güney ve batı yamacında Hat-6 ve 7 haricinde süreksizlik aralıkları blok oluşturacak şekilde çok geniştir. Süreksizliklerin sınıflaması ISRM (1981) ölçütlerine göre yapılarak Çizelge 1’de sunulmuştur. Süreksizlik düzlemlerinin dolaylı dayanımını belirlemek ve kaya düşmesi risk sınıflamasında kullanmak amacı ile Schmidt çekici deneyi yapılmıştır. Farklı süreksizlik düzlemlerinde 30 cm’lik Barton profilometresi ile belirlenen pürüzlülük profillerine göre JCS değeri 6-8 ve 8-10 arasındadır. İnceleme döneminde (Ağustos 2024) süreksizliklerden herhangi bir su çıkışı gözlenmemiş olup belirgin bir dolgu malzemesi de bulunmamaktadır.



Şekil 2. Blok oluşturan hakim süreksizliklerin yönelimleri.

Figure 2. Orientations of block-forming discontinuities.

## LABORATUVAR İNCELEMELERİ

İnceleme alanındaki andezitlerden alınan kırmızımsı, gri ve bej renkli üç farklı örnekte kaya düşmesi analizlerinde kayacın sağlam ve/veya altere olarak tanımlanabilmesi için petrografik inceleme yapılmıştır. Bej örnekte killeşme olup hamur tamamen volkan camından oluşmakta iken, kırmızı ve gri örnekler tipik andezit bileşimindedir. Arazideki bloklardan alınan karotların birim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı (ISRM, 1981) ve temel sürtünme

açısı tiltmetre ile üç karot yöntemi kullanılarak (Stimpson, 1981) belirlenmiştir (Çizelge 2). B1 kodlu örnekler gri renkli andezit olup tek eksenli sıkışma dayanımı ve temel sürtünme açıları diğer örneklerle göre daha yüksektir. B2 ve B3 kodlu örneklerde bozunma derecesi renk tonu ve killeşmeye bağlı olarak daha fazla olup özellikle B3 kodlu kırmızı örneklerde yer yer gözenekler izlenmektedir. Laboratuvarda boy/çap oranı dikkate alınarak bazı karot örneklerinde tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenememiştir.

Çizelge 1. İnceleme alanında süreksizlik karakterizasyonu.

Table 1. Discontinuity characterization in the study area.

| Devamlılık              |                                                                                                                                     |                                  |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Süreksizlik uzunluğu, m | Tanım                                                                                                                               |                                  |
| <i>1-3</i>              | <i>Düşük devamlılık</i>                                                                                                             |                                  |
| <i>3-10</i>             | <i>Orta derecede devamlılık</i>                                                                                                     |                                  |
| Açıklık                 |                                                                                                                                     |                                  |
| Açıklık, mm             | Tanım                                                                                                                               |                                  |
| <i>&lt;0,1</i>          | Çok sıkı                                                                                                                            | Kapalı yapılar                   |
| 0,1-0,25                | Sıkı                                                                                                                                |                                  |
| 0,25-0,50               | Kısmen açık                                                                                                                         |                                  |
| <i>0,50-2,5</i>         | <i>Açık</i>                                                                                                                         | <i>Boşluklu yapılar</i>          |
| <i>2,5-10</i>           | <i>Orta derecede geniş</i>                                                                                                          |                                  |
| <i>&gt;10</i>           | <i>Geniş</i>                                                                                                                        |                                  |
| <i>10-100</i>           | Çok geniş                                                                                                                           | Açık yapılar                     |
| 100-1000                | Aşırı geniş                                                                                                                         |                                  |
| >1000                   | Boşluklu                                                                                                                            |                                  |
| Aralık                  |                                                                                                                                     |                                  |
| Aralık, mm              | Tanım                                                                                                                               |                                  |
| <i>600-2000</i>         | <i>Geniş aralıklı</i>                                                                                                               |                                  |
| <i>2000-6000</i>        | Çok geniş aralıklı                                                                                                                  |                                  |
| Ayrışma                 |                                                                                                                                     |                                  |
| Tanım                   | Ölçüt                                                                                                                               | Sınıf                            |
| <i>Az ayrılmış</i>      | <i>Kaya ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi. Tüm kayacın rengi değişmiş olabilir. Kaya taze halinden daha zayıf olabilir.</i> | <i>W2</i>                        |
| Blok boyutu             |                                                                                                                                     |                                  |
| J <sub>v</sub>          | Tanım                                                                                                                               |                                  |
| <b>3-10</b>             | <b>Orta derecede yüksek</b>                                                                                                         | <b>Orta derecede süreksizlik</b> |

Zengin, Ulaş

Çizelge 2. Andezitlerin birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı ve temel sürtünme açıları.  
 Table 2. Unit weight, uniaxial compressive strength and basic friction angle of the andesites.

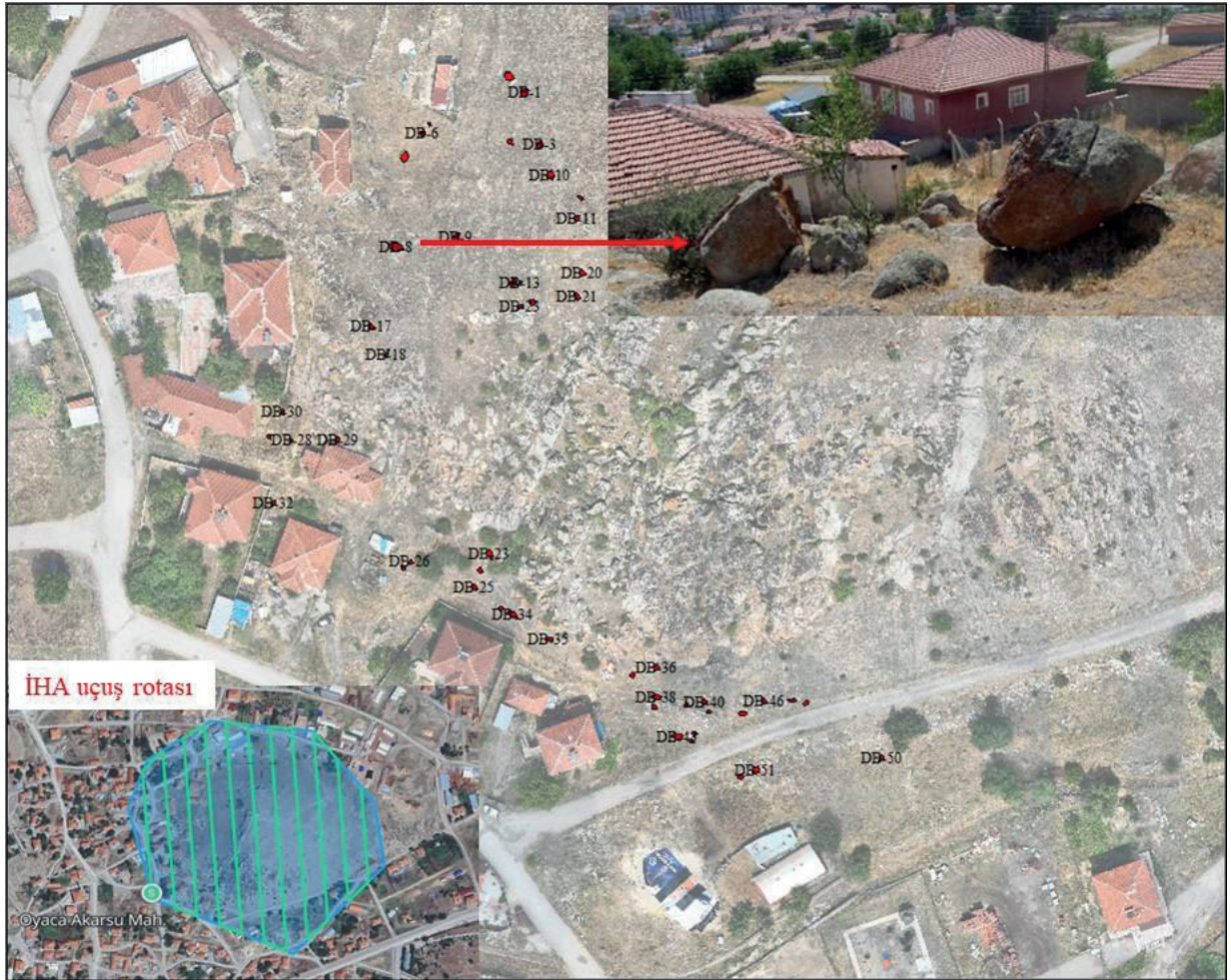
| Örnek No | $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup> | $\sigma_c$ , MPa | $\phi_b$ (°) |
|----------|------------------------------|------------------|--------------|
| B1       | B1-A                         | 23,44            | 43           |
|          | B1-B                         | 23,84            | 57           |
|          | B1-C                         | 23,72            | 38           |
|          | B1-D                         | 23,72            |              |
|          | B1-E                         | 23,32            |              |
|          | B1-F                         | 23,74            |              |
|          | B1-G                         | 23,42            |              |
|          | B1-H                         | 23,79            |              |
|          | B1-İ                         | 23,76            |              |
| B2       | B2-A                         | 22,10            | 34           |
|          | B2-B                         | 21,75            | 32           |
|          | B2-C                         | 19,85            |              |
|          | B2-C1                        | 24,08            |              |
|          | B2-C2                        | 23,74            |              |
|          | B2-C3                        | 22,18            |              |
| B3       | B3-A                         | 22,73            | 53           |
|          | B3-B                         | 22,84            | 37           |
|          | B3-C                         | 22,81            | 33           |

## GÖRÜNTÜLEME ÇALIŞMALARI

İnceleme alanında İHA uçuş rotası kaya bloklarının detaylı görüntülenmesi için zemin takibi seçeneği kullanılarak 70 metre yükseklikten görüntüleme yapılmıştır. Hassasiyeti 2 cm olan 160 adet görüntü elde edilmiş olup ortofoto mozaïği ve üç boyutlu kartezyen koordinatları belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan İHA'nın ön ve yan bindirme oranları

sırası ile %70 ve %80 olup uçuş hızı 13 m/s'dir. İHA uçuşu Türkiye Sabit GNSS Ağı Sistemi'ne (TUSAGA) göre yapılmış olup Terra yazılımı ile 2 ve 3 boyutlu nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Görüntüleme esnasında GNSS kaynaklı olası hataların giderildiği gerçek zamanlı kinematik konumlama (RTK) sistemi kullanılmıştır. Arazide geçmişte düşmüş olan ve kaynak kaya alanında düşebilecek olan blokların konumları ve boyutları ortofoto görüntüleri üzerinde sayısal olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Toplam 32 adet blok dışında çok sayıda bloğun da güney yamaçtaki yol yapımı sırasında taşınmış olduğu düşünülmektedir. Ortalama birim hacim ağırlık değerine göre blok ağırlıkları 0,96 ton ile 14,27 ton arasında değişmektedir.

İnceleme alanında her iki yamaçta 28 adet düşebilecek blok belirlenmiş olup ağırlıkları 5,26 ton ile 32,92 ton arasındadır (Şekil 4). Güney yamaçta genellikle dairesel ve silindirik şekilli andezitlerde yerinde ulaşılabilen blok boyutları sayısallaştırılarak belirlenmiştir. İnceleme alanında üç boyutlu analizlere altlık olması için sayısal arazi modeli hazırlanmıştır. Andezit mostrasının bulunduğu güney yamaçta eğim 56°'ye varmaktadır. Mostranın sonlandığı yamaç topuğunda, yapıların bulunduğu kesime kadar ortalama eğim 5° olup yapı yerleri ve güneye doğru azalmaktadır. Batı yamaçta eğim, yamaç molozu olan kesimde 22,5° kadar olup andezit mostrasında 45°-50° arasındadır. Her iki yamaçta süreksizlik yönelimine göre andezit bloklarında 90°'lik eğimler belirlenmiştir.



Şekil 3. İHA uçuş rotası ve düşmüş blokların sayısallaştırılması.

Figure 3. UAV flight paths and digitization of fallen blocks.

### ÜÇ BOYUTLU KAYA DÜŞMESİ ANALİZLERİ

Kaya düşmesi mekanizması birçok farklı parametre ile kontrol edilmektedir (Asteriou vd., 2012; Giacomini vd., 2012). Yamaç eğimi, topoğrafya ve pürüzlülük değerlerine göre serbest düşme, sıçrama, yuvarlanma ve kayma olarak dört ana grupta gelişmektedir (Basson, 2012; Spadari vd., 2012). Kaya düşmesi şiddeti belirlenirken blokların ulaşabileceği menzil, blok kütlesi, hız, kinetik enerji, rotasyon ve sıçrama

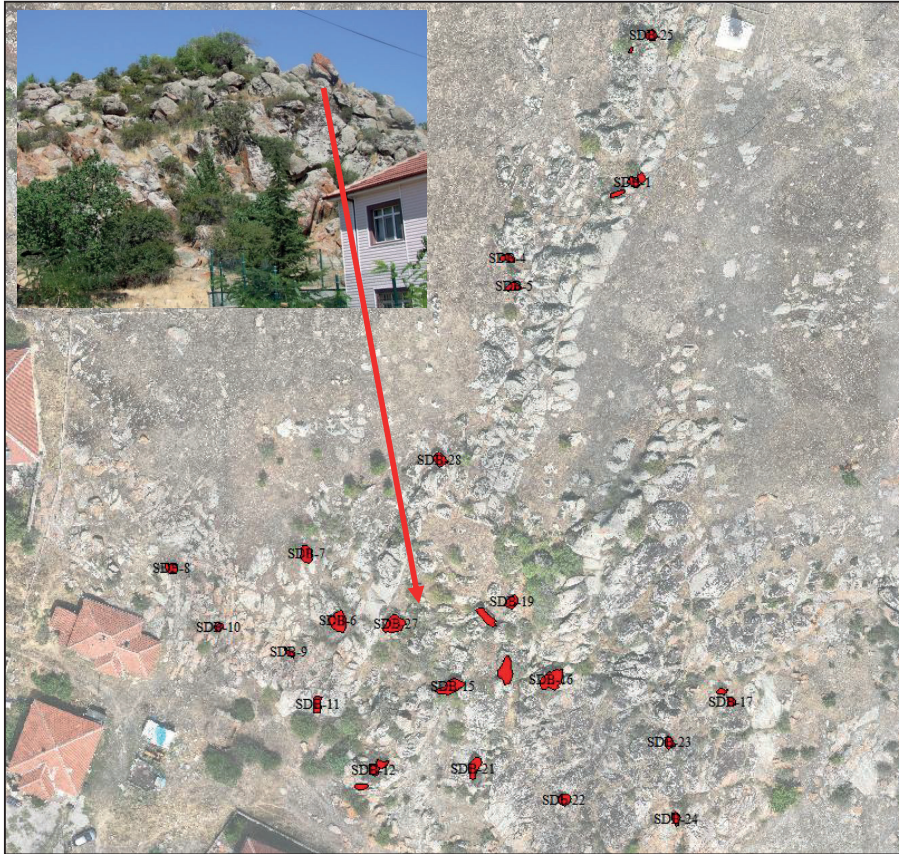
yüksekliğinin dikkate alınması gereklidir (AFAD, 2020; Jaboyedoff vd., 2001). Kaya bloğunun yamaca çarpma açısı, kütle, çarpma hızının önceki ve sonraki değerleri ve yamaç malzemesinin mekanik özelliklerine göre geri sıçrama katsayısının normal ( $R_N$ ) ve teğet ( $R_T$ ) bileşenleri analizlerde önemli parametrelerdir (Wang ve Tonon, 2011). İnceleme alanında güney yamaçta düşebilecek blokların andezit mostrasına, batı yamaçta ise yamaç molozu üzerine düşmesi beklenmektedir. Kaya bloğu

ile yamacın malzeme özelliklerini dikkate alan, girdi parametrelerinin Gauss dağılımının ve ölçeklenmesinin mümkün olduğu rijid blok yaklaşımı ve olasılıklı analiz tercih edilmiştir.

### Küresel Blokların Üç Boyutlu Analizi

Simülasyonda arazideki gerçek koşulların yansıtılabilmesi için 100 adet blok çizgisel kaynak kaya alanından düşürülmüş olup analizler küresel ve silindirik blok geometrisi için yapılmıştır. Her iki yamaç için kaynak kaya mostraları arazi çalışması ile yerinde belirlenmiş olup düşebilecek blokların bulunduğu kesimleri

içeren hatlar boyunca 100'er adet blok düşürülmüştür. Güney yamaçta arazide erişimin mümkün olmadığı kesimde İHA görüntülerinden faydalanılmıştır. Andezit ve yamaç molozu için geri sıçrama katsayıları ( $R_N$  ve  $R_T$ ) ile dinamik sürtünme katsayısı ( $m_k$ ) değerleri önceki çalışmalar dikkate alınarak (Chau, vd., 1996; Topal, vd. 2007) belirlenmiştir (Çizelge 3). Küresel blok çapı ortalama 2 m olup blokların başlangıç düşme yüksekliği  $2 \text{ m} \pm \%25$  olarak tanıtılmıştır. Limit dar açısı ve limit geniş açısı değerleri yuvarlanma ile yamaca çarparak sıçrama arasındaki açılar olup andezit ve yamaç molozu için program kataloğundan seçilmiştir.



Şekil 4. Yamaçtan serbest kalarak düşebilecek bloklar.

Figure 4. View of blocks possibly detached from the hill.

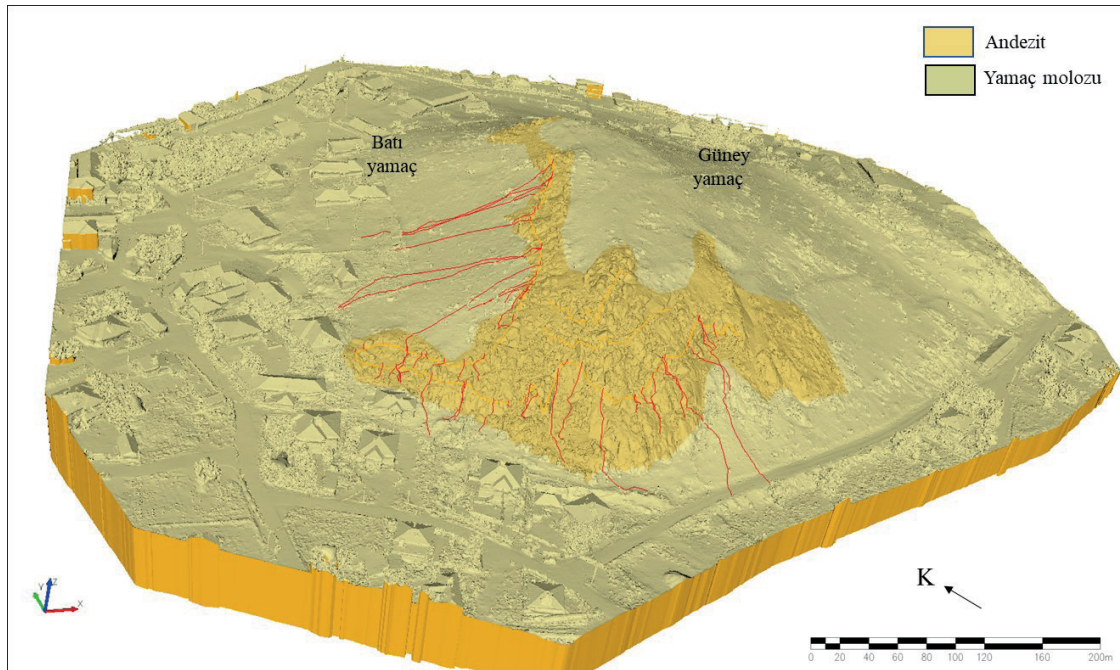
Her iki yamaçta küresel bloklar için üç boyutlu analiz yapılarak kaya bloklarının yörüngeleri ve ulaşabileceği noktalar RockPro3D tarafından oluşturulan sayısal yüzey modeli üzerinde belirlenmiştir (Şekil 5). Analiz

sonucunda, bloklar yapılar kadar ulaşabilecek olup arazide de yapıların yakınında bloklar belirlenmiştir. İnceleme alanında arazi çalışmaları esnasında kaya bloklarının hareketini etkileyecek herhangi bir bitki örtüsüne rastlanmamıştır.

Çizelge 3. Bloklar için üç boyutlu analiz girdi parametreleri.

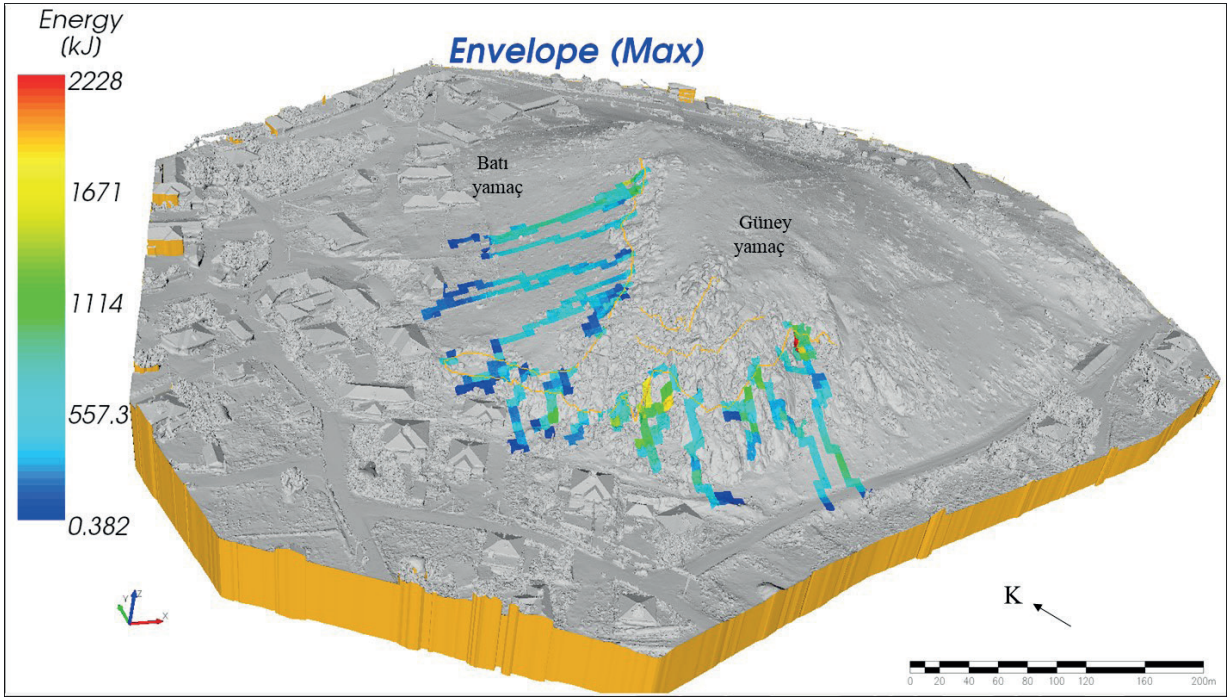
Table 3. Input parameters of the blocks for 3D analysis.

| Batı yamaç       |                  |                    |                     |                       |                    |                     |                       |
|------------------|------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| $R_N$<br>Andezit | $R_T$<br>Andezit | $R_N$<br>Y. molozu | $R_T$<br>Y. molozu  | $m_k$<br>Andezit      | $m_k$<br>Y. molozu | Limit<br>dar aç (°) | Limit<br>geniş aç (°) |
| 0,40             | 0,80             | 0,20               | 0,90                | 0,30                  | 0,15               | 2                   | 15                    |
| Güney yamaç      |                  |                    |                     |                       |                    |                     |                       |
| $R_N$<br>Andezit | $R_T$<br>Andezit | $m_k$<br>Andezit   | Limit<br>dar aç (°) | Limit<br>geniş aç (°) |                    |                     |                       |
| 0,45             | 0,75             | 0,30               | 10                  | 35                    |                    |                     |                       |



Şekil 5. Batı ve güney yamaçta küresel blokların üç boyutlu görünümü.

Figure 5. 3D view of the spherical blocks on the western and southern slopes.



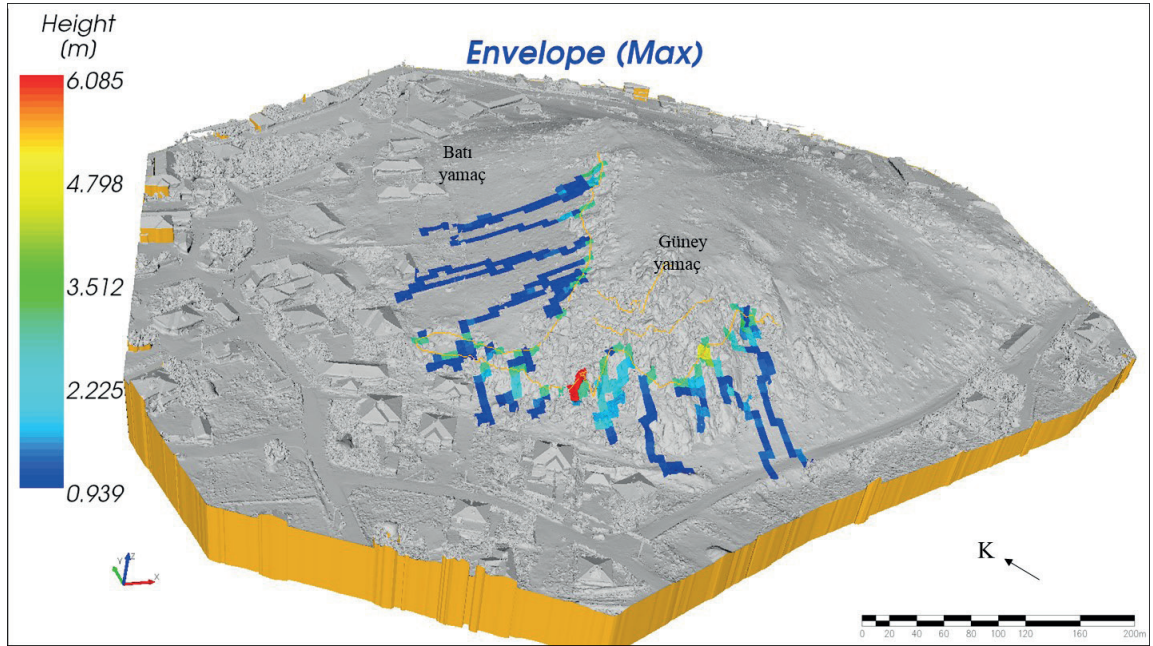
Şekil 6. Küresel blokların toplam kinetik enerji dağılımı haritası.

Figure 6. Total kinetic energy distribution map of the spherical blocks.

Toplam kinetik enerji yuvarlanma sırasında 1200 kJ'e kadar ulaşmakta olup eğimin azalmaya başladığı kesimde 650 kJ ile 950 kJ arasında değişmektedir (Şekil 6). Sıçrama yükseklikleri 1,85 m ile 2,75 m arasında değişmektedir (Şekil 7). Rotasyonel hız dağılımı dikkate alındığında yapıların bulunduğu kesimde blokların hareketi devam etmekte olup özellikle güney yamaçta eğim derecesine de bağlı olarak hızların fazla azalmayacağı belirlenmiştir (Şekil 8). Arazi gözlemlerinde yapıların bahçelerinin sınırında belirlenmiş olan blokların varlığı da blokların hem topoğrafik yapı, hem de insan yapısı unsurlar tarafından yapılara ulaşmadan kinetik enerjilerinin sönmülenererek duracağına işaret etmektedir.

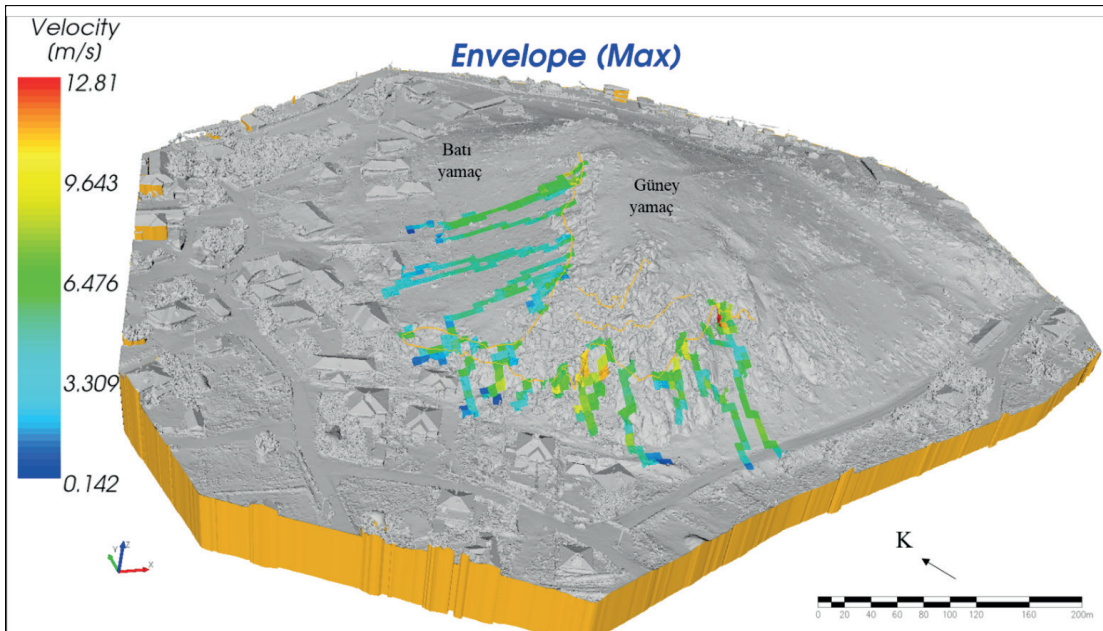
### Silindirik Blokların Üç Boyutlu Analizi

İnceleme alanında yamaçta ve geçmişte düşmüş blokların bazılarının silindirik şekilli olması nedeniyle çap/yükseklik oranı batı yamaç için 2,5/2 ve güney yamaç için 2,5/2,25 olacak şekilde analizler yapılmıştır (Şekil 9). Bu oranlar küresel blokların analizindeki ağırlıklara yakın veya eşit olacak şekilde seçilmiştir. Simülasyonlarda diğer tüm girdi parametreleri (yoğunluk, sıçrama katsayıları ve sürtünme katsayıları) küresel bloklar ile aynıdır.



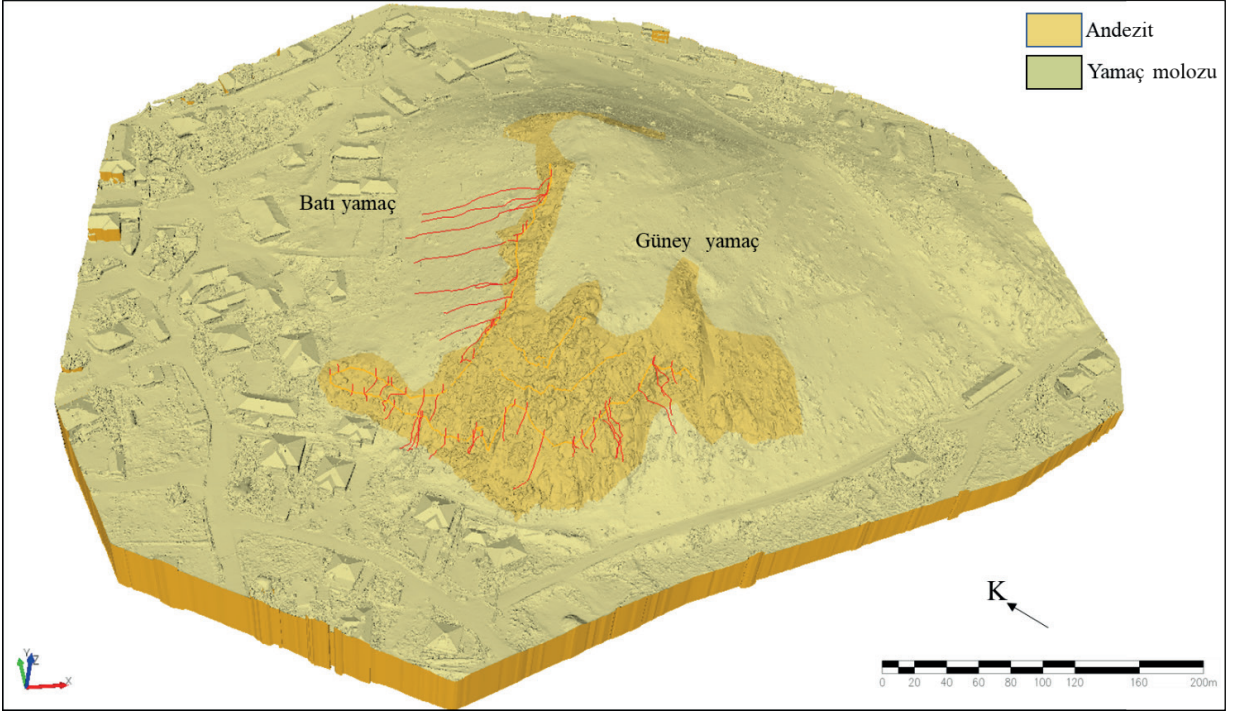
Şekil 7. Küresel blokların sıçrama yüksekliği dağılımı haritası.

Figure 7. Bounce height map of the spherical blocks.



Şekil 8. Küresel blokların rotasyonel (dönel) hız dağılımı haritası.

Figure 8. Rotational velocity map of the spherical blocks.



Şekil 9. Batı ve güney yamaçta silindirik blokların üç boyutlu yörüngeleri.

Figure 9. 3D trajectories of cylindrical blocks on the western and southern slopes.

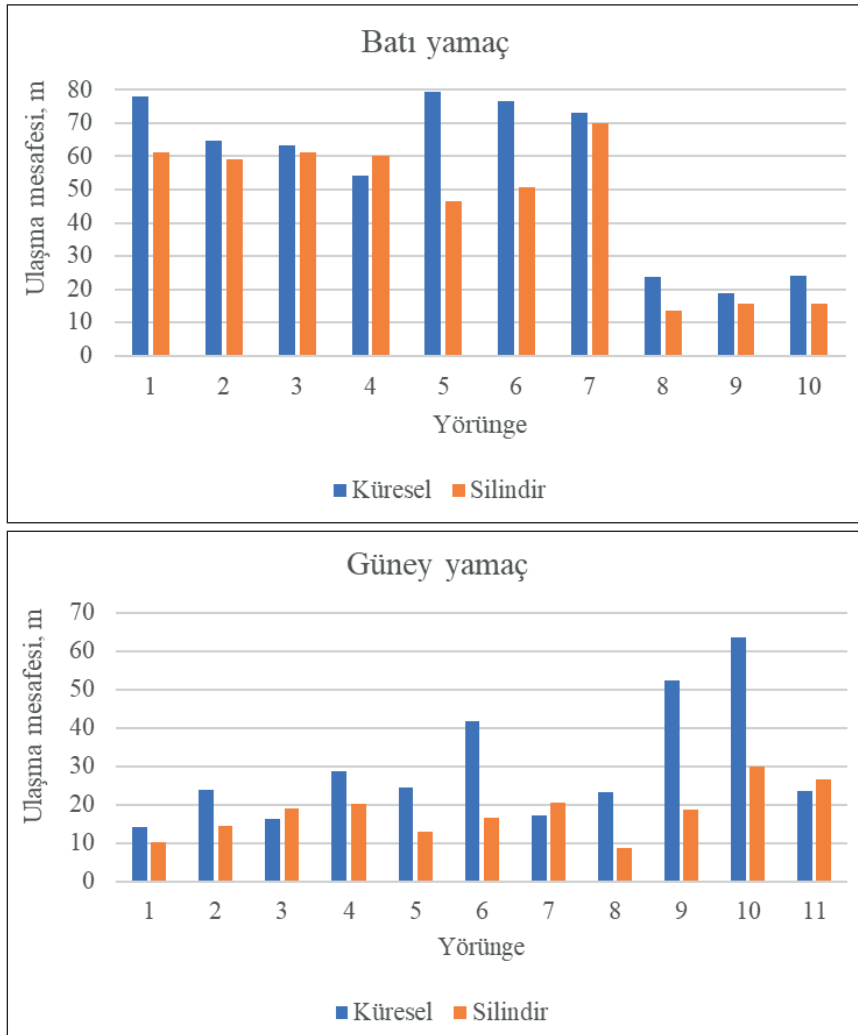
Analiz sonucunda, silindirik blokların ulaşma mesafesinde azalma olduğu belirlenmiştir. Üç boyutlu analizlerden elde edilen küresel ve silindirik blok yörüngeleri ile ulaşma mesafesi iki boyutlu kesitlerde belirlenebilmektedir. Şekil 10'da batı ve güney yamaçtaki yörüngelerde blok ulaşma mesafeleri karşılaştırılmıştır. Küresel bloklar ile karşılaştırıldığında, silindirik blokların ulaşma mesafelerinin daha az olması, çarpma ve yuvarlanma yanında yamaç molozu içine saplanmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Ancak, küresel ve silindirik blokların ulaşma mesafeleri arasında doğrudan bir ilişki kurulamamıştır.

Her iki geometriye sahip blokların analizlerinde yamaçlarda blokların düşebileceği hatlarda analiz yapılmış olup simülasyonlar sonucunda analiz çıktıları olarak elde edilen

blok hareket yörüngeleri kullanılmıştır. Blok geometrileri aynı olmadığından yörüngeler birebir aynı olmamakla beraber, hatlar boyunca aynı noktadan düşen blokların analiz sonuçları olarak ulaşma mesafeleri karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu analiz sonucunda elde edilen sonuçlara göre batı yamaçta kuzeyden güneye doğru 10 adet, güney yamaçta batıdan doğuya 11 adet yuvarlanma yörüngesi boyunca ulaşma mesafeleri karşılaştırılmıştır. Ulaşma mesafesi azalmasına bağlı olarak kinetik enerji, sıçrama yüksekliği ve dönel hızın değişimi de analiz edilerek dağılımları haritalanmıştır. Ulaşma mesafeleri arasında belirgin fark, arazinin topoğrafik yapısına göre hareket yörüngelerinin değişken olmasından kaynaklıdır. Güney yamaçtaki andezit mostrasındaki lokal kesimler haricinde kinetik enerjide belirgin bir azalma

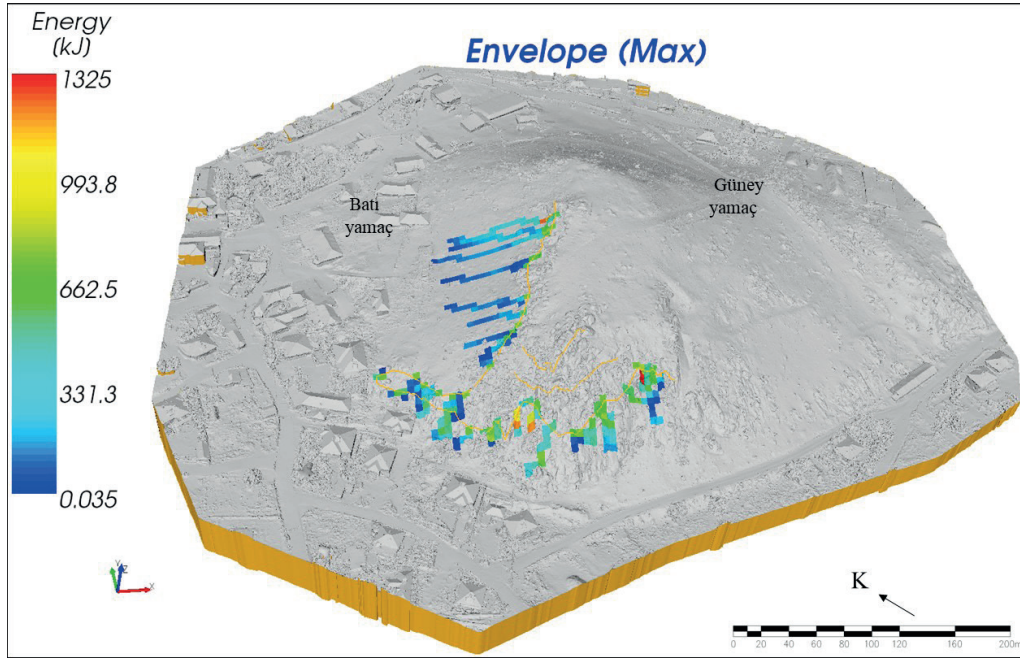
bulunmakta olup (Şekil 11) yine güney yamaçta andezit mostrasına çarpabilecek silindirik bloklarda muhtemel kopma, parçalanma vb. nedenlere bağlı olarak sıçrama yüksekliği de

göreceli olarak azalmıştır (Şekil 12). Dönel hızda çok belirgin bir değişiklik olmasa da küresel bloklara göre enerjiyi de azaltacak şekilde bir azalma gözlenmiştir (Şekil 13).



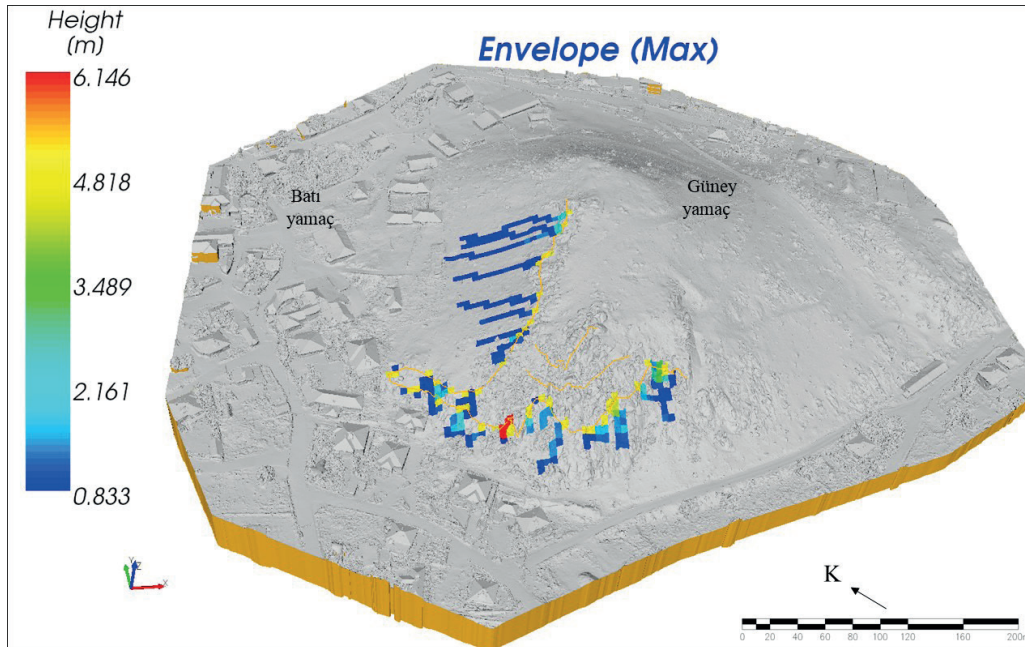
Şekil 10. Batı ve güney yamaçta küresel ve silindirik blok ulaşma mesafelerinin (metre) karşılaştırılması.

Figure 10. Comparison of the runout distances (in meters) of spherical and cylindrical blocks on the western and southern slopes.



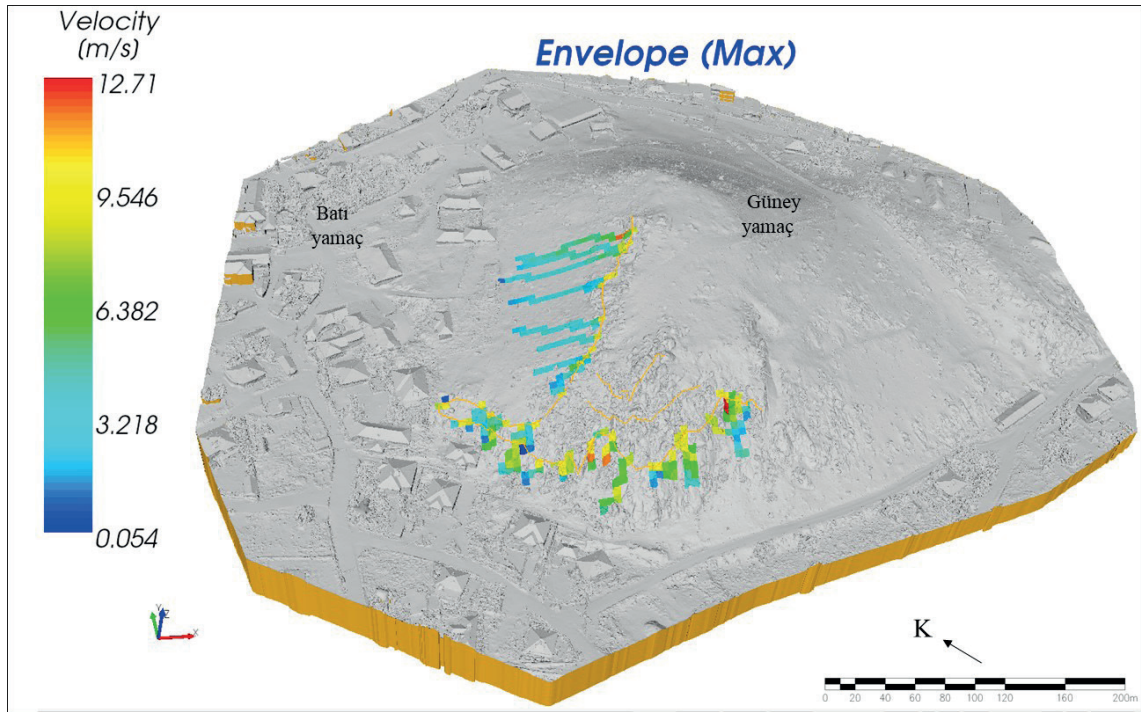
Şekil 11. Silindirik blokların toplam kinetik enerji dağılımı haritası.

Figure 11. Total kinetic energy distribution map of the cylindrical blocks.



Şekil 12. Silindirik blokların sıçrama yüksekliği dağılımı haritası.

Figure 12. Bounce height distribution map of the cylindrical blocks.



Şekil 13. Silindirik blokların rotasyonel (dönel) hız dağılımı haritası.

Figure 13. Rotational velocity distribution map of the cylindrical blocks.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

İnceleme alanında yapılan arazi gözlemleri esnasında farklı noktalarda düşmüş/yuvarlanmış andezit blokları tespit edilmiş olup yamaçta da farklı boyutlarda düşebilecek bloklar olduğu belirlenmiştir. İnceleme alanının güney yamacı tamamen andezit, batı yamacında ise mostra ile yapılar arasında yamaç molozu bulunmaktadır.

İHA görüntülemesi yamaca dik ve özellikle andezit bloklarını net modelleyebilmek adına 45°'lik açı ile yapılmıştır.

Geçmişte düşmüş/yuvarlanmış ve halihazırda düşebilecek bloklar arazi çalışmaları ve sayısal görüntüler kullanılarak boyutlandırılmış ve ağırlıkları belirlenmiştir. Düşmüş blok ağırlıkları 0,96 ton ile 14,27 ton, yamaçtan düşebilecek blok ağırlıkları 5,26 ton ile 32,92 ton arasındadır.

Küresel bloklar ve silindirik bloklar için ayrı analizler yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda küresel blokların daha uzak mesafelere ulaşacağı, dönel hızlarının ve buna bağlı olarak da kinetik enerjilerinin daha fazla olacağı belirlenmiştir.

Küresel bloklar batı yamaçta yamaç molozu üzerinde hareket edecek olup geometrilerinden dolayı daha hızlı hareket ederek kinetik enerjilerini daha uzun süre koruyacak ve dolayısıyla durma mesafeleri de silindirik bloklara göre daha yüksek olacaktır. Sıçrama yüksekliği dağılımı batı yamaçta daha çok yuvarlanmayı ifade etmekte olup güney yamaçta andezit mostrasına çarpabilecek bloklardaki sıçrama yüksekliği dağılımı göreceli olarak daha yüksektir. Dönel hız dağılımı incelendiğinde belirgin bir farklılık bulunmamakla beraber, yuvarlanma mesafesinde

Zengin, Ulaş

kinetik enerji değişiminde hız her ne kadar direkt parametre olsa da her iki yamaçtaki yamacı oluşturan jeolojik yapının ve eğimin de etken olduğunu işaret etmektedir.

Silindirik blokların güney yamacın tamamını kaplayan andezitlere çarptığında küresel bloklara göre daha fazla kırılma, parçalanma olasılığına sahip olduğu düşünülmektedir. Yamaç molozu üzerinde de küresel bloklara göre hareket esnasında yamaca saplanma ve kaymaya maruz kalabilecekleri düşünülmektedir.

İnceleme alanındaki kaya düşmelerinin çevreye ve yapılara zarar vermemesi için öncelikle yamaçtaki blokların dağcı ekiplerce kırılarak temizlenmesi ve işlem sırasında geçici bariyerlerin yapılması gerekmektedir. Geçmişte düşmüş blokların da temizlenmesi gerekmektedir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: FYL-2023-3147). Yazarlar Koordinatörlüğe teşekkür ederler.

## KAYNAKÇA

- AFAD (2020). *Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz*, 169 s., Ankara.
- Agliardi, F., Crosta, G.B., Frattini, P. (2009). Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1059–1073.
- Ağca, M., Gültekin, N., Kaya, E. (2020). İnsansız Hava Aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. *Geomatik*, 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(2), 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 Açınısama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara F15 Paftası*. MTA Jeoloji Etüdleri Dairesi, Ankara, 31 s.
- Alemdağ, S., Kara, R.T., Bostancı, H.T. (2022). Evaluation of potential rock falls with three-dimensional analysis: Example of Oltanbey and Hasanbey districts (Gümüşhane city center). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 169, 87-104.
- Alıcı Şen, P. (2009). Trace element modelling of the origin and evolution of the Oyaca-Boyalık volcanic rocks (NE of Haymana, Ankara, Turkey). *International Geology Review*, 51(2), 116-132.
- Alvioli, M., Matteo de A., Castaldo, R., Tizzani, P., Reichenbach, P. (2022). Three-dimensional simulations of rockfalls in Ischia, Southern Italy, and preliminary susceptibility zonation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2712-2736.
- Asteriou, P., Saroglou, H., Tsiambaos, G. (2012). Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* (54), 103-113.
- Basson, F.R. (2012). *Rigid body dynamics for rock fall trajectory simulation*. 46th US Rock Mechanics/ Geomechanics (1-7). Chicago: American Rock Mechanics Association.
- Bozkurt, E., Koçyiğit, A., Winchester, J., Beyhan, A. (1999). Petrochemistry of the Oyaca-Kedikayası (Ankara) dacites as evidence for the post-collisional tectonic evolution of North-Central Anatolia, Turkey. *Geological Journal*, 34, 223-231.

- Budetta, P. (2011). Application of the Swiss Federal Guidelines on rock fall hazard: A case study in the Cilento region (Southern Italy). *Landslides*, 8(3), 381–389.
- Caymaz, P. (2023). *Karahıdırlı (Mersin) Çevresindeki Kaya Düşmelerinin Üç Boyutlu Analizi ve Koruma Yöntemlerinin Belirlenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 90 s. Ankara.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C., Lee, C.F. (1996). Rockfall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*. 35, (4-5). 662-663.
- Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y., Wu, J. (2013). Numerical simulation in rockfall analysis: a close comparison of 2-D and 3-D DDA. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 527-541.
- Clemente, J.A., Uriarte, J.A., Spizzichino, D., Faccini, F., Morales, T. (2023). Rockfall hazard mitigation in coastal environments using dune protection: A nature-based solution case on Barinatxe beach (Basque Coast, northern Spain). *Engineering Geology*, 314, 107014.
- Çapar, N. (2018). *Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi*. [Doktora Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dinçer, İ., Akın, M., Orhan, A. (2022). Kaya düşmelerinin 3-boyutlu analizi: Kapadokya örneği. *Yer Mühendisliği*, 17 (10), 46-59.
- Farmakis I., Hutchinson DJ, Vlachopoulos N, Westoby M, Lim M (2023) Slope-Scale rockfall susceptibility modeling as a 3D computer vision problem. *Remote Sensing*, (15): 2712.
- Giacomini, A., Thoeni, K., Lambert, C., Booth, S., Sloan, S.W. (2012). Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (56), 171-181.
- Gültekin-Yeşiloğlu, N. (2023). Ankara Zir Vadisi kaya düşmelerinin üç boyutlu analizlerle değerlendirilmesi. *Yerbilimleri*, 44(2), 179-201.
- ISRM, (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. Brown, E., Ed., Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Hantz, D., Heidenreich, B., Mazzoccola, D. (2001). *Terminologie, in: Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises*, edited by Carere, K., Ratto, S., and Zanolini, F.E., 48–57.
- Kalender, A. (2017). *Konik Yayılım Yaklaşımıyla Kaya Düşmesi Potansiyelinin Değerlendirilmesine Yönelik Bir Yöntem Önerisi*. [Yüksek Lisans Tezi]. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Karahan, M., Sünnetçi, M.O., Ersoy, H., İpek, A. (2023). 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile birleşik kaya ıslah uygulamalarının değerlendirilmesi: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 48, 179-202.
- Keskin İ, Polat, A. (2022) Kinematic analysis and rockfall assessment of rock slope at the UNESCO World Heritage city (Safranbolu/Turkey). *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* 46: 367–384.
- Knowles, J., Ma, Y., Evans, T.M. (2021). *DEM modelling of 3D polyhedra with applications to gabion rockfall barriers*. EPJ Web of Conferences, 249, 14008.
- Lan, H., Martin, C.D., Lim, C.H. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers and Geosciences*, 33 (2), 262-279.
- Li, L.P., Sun, S.Q., Li, S.C., Zhang, Q.Q., Hu, C, Shi, S.S. (2016). Coefficient of restitution and kinetic energy loss of rockfall impacts. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (6), 2297- 2307.
- Öztürk, M.Z., Utlu, M., Şimşek, M. (2022). Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde). *Yerbilimleri*, 43 (2), 482-196.
- Peik, N. 2020. *A New Three-Dimensional Rockfall Trajectory Simulator for Open-Pit Mines*. [Master Thesis], University of Nevada Reno, USA.

- Pilz, J., Agliardi, F., Crosta, G.B., Zavodni, Z.M. (2011). *Three-dimensional rock fall simulation in the mining environment using Hy\_Stone*. Slope Stability 2011, International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering.
- Polat, A. (2020). CBS Tabanlı 3B kaya düşmesi analizi ve veri hazırlama süreçleri: Kavak Köyü Sivas Türkiye Örneği. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 1205–1222.
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., Tsiambos, G. (2012). Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1823–1836.
- Spadari, M., Giacomini, A., Buzzi, O., Fityus, S., Giani, G. P. (2012). In situ rockfall testing in New South Wales, Australia. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (49), 84-93.
- Stimpson, B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18(1), 63–65.
- Şen, P., Şen E. (2013). Petrogenetic Characteristics Of Oyaca – Kedikayası – Boyalık Adakites In SW Ankara (Central Anatolia, Turkey): Evidence For Slab Melt Metasomatism. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 81-91.
- Thoeni, K., Giacomini, A., Lambert, C., Sloan, S.W., Carter, J.P. (2014). A 3D discrete element modelling approach for rockfall analysis with drapery systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 68, 107–119.
- Topal, T., Akın, M., Ozden, U.A. (2007). Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environmental Geology*, 53, 191-200.
- Utlı, M., Öztürk, M.Z., Şimşek, M. (2020). Rockfall analysis based on UAV technology in Kazıklı Gorge, Aladağlar (Taurus Mountains, Turkey). *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(3), 239-251.
- Utlı M, Öztürk MZ, Şimşek M, Akgümüş MF (2023) Evaluation of rockfall hazard based on UAV technology and 3D Rockfall Simulations. *International Journal of Environment and Geoinformatics* 10(4): 001-016.
- Varol OO, Akın M, 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.
- Wang, Y., Tonon, F. (2011). Discrete element modeling of rock fragmentation upon impact in rock fall analysis. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 44, 23-35.
- Wendeler, C., Bühler, Y., Bartelt, P., Glover, J. (2017). Application of three-dimensional rockfall modelling to rock face engineering. *Geomechanics and Tunnelling*, 10 (1).
- Zengin, Ü.B., (2024). Oyaca (Gölbaşı) Çevresindeki Kaya Düşmelerinin Modellenmesi ve Üç Boyutlu Analizi. [Yüksek Lisans Tezi], Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 119 s, Ankara.
- Zhang W, Zhao X, Pan X, Wei M, Yan J, Chen J (2022) Characterization of high and steep slopes and 3D rockfall statistical kinematic analysis for Kangyuqu area, China. *Engineering Geology*, (308), 106807.