

Research Article / Araştırma Makalesi

## Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Olasılıksal Analizlerle ve Ampirik Yöntemlerle Değerlendirilmesi: Kayseri – Soğanlı Yerleşim Yeri Örneği

*Evaluation of Rockfalls with 3-Dimensional Probabilistic Analyses and Empirical Methods:  
The Case of the Kayseri – Soğanlı Settlement*

Ogün Ozan VAROL<sup>\*1</sup> , Mutluhan AKIN<sup>2</sup> , Ahmet ORHAN<sup>2</sup> , İsmail DİNÇER<sup>2</sup>

*1 Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye*  
*2 Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Kapadokya Jeolojik Miras ve Kaya Oyma Yapıları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye*

Received (Geliş): 17 Mart (March) 2023, Revised (Düzeltilme): 27 Nisan (April) 2023, Accepted (Kabul): 3 Mayıs (May) 2023

### ÖZ

Bu çalışma kapsamında Kayseri – Soğanlı yerleşim yerinde meydana gelebilecek kaya düşmeleri ampirik olarak enerji açısı yöntemiyle ve 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme modelleri ile değerlendirilmiştir. Yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli (SYM) insansız hava aracı (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofoto yardımıyla elde edilmiştir. SYM üzerinde 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme simülasyonları, CONEFALL yazılımı yardımıyla enerji çizgi açısı yöntemine göre kaya düşme zonları belirlenerek gerçekleştirilmiştir. Geçmişte düşmüş olan kaya blokların en, boy ve yükseklikleri arazi çalışmaları ve İHA ile oluşturulan ortofoto üzerinden belirlenmiştir. 3-boyutlu olasılıksal analizler neticesinde 3 m'lik kaya bloklarının yamaç boyunca hareketi esnasında kinetik enerji değerleri maksimum 15,000 kJ, sıçrama yüksekliği ise 15 m olarak belirlenmiştir. Enerji çizgi açısı yöntemi dikkate alındığında, incelenen yamacın güney kesiminde daha önceden düşen blokların çoğunlukla 40°'lik enerji çizgi açısı zonunda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, 3 m blok boyutu için yapılan olasılıksal 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden elde edilen yuvarlanma hatları en fazla 30°'lik enerji çizgi açısı zonuna kadar ulaşsa da, özellikle yamacın güney kesiminde bu yuvarlanma hatları 40°'lik enerji çizgi açısı zonunda sonlanmaktadır. Buna göre, ampirik yöntem, 3-boyutlu olasılıksal yöntem ve arazide ölçülen blokların konumları genel olarak uyum göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** 3-Boyutlu olasılıksal analiz, CONEFALL, Enerji çizgi açısı, Kaya düşmesi, Ortofoto, RocPro3D

### ABSTRACT

*This study evaluated the potential rockfall hazards in the Kayseri-Soğanlı settlement using the energy angle method and 3-dimensional probabilistic rockfall modeling. The high-resolution digital surface model (DSM) was obtained with the help of unmanned aerial vehicles (UAV) and high-resolution orthophoto. 3-dimensional probabilistic rockfall simulations were conducted on the DSM using the CONEFALL software, and rockfall zones were determined according to the energy line angle method. The dimensions of previously fallen rock blocks were determined using fieldwork and orthophoto generated by UAV. As a result of 3-dimensional probabilistic analyses, the maximum kinetic energy values of 15,000 kJ and bounce height of 15 m were determined during the movement of 3-meter rock blocks along the slope. When the energy line angle method was considered, it was found that the previously fallen blocks were mostly concentrated in the 40° energy line angle zone in the southern part of the slope.*

*On the other hand, although the rolling lines obtained from probabilistic 3- dimensional rockfall analyses for 3 metre block size reach up to the maximum 30° energy line angle zone, these rolling lines end in the 40° energy line angle zone, especially in the southern part of the slope. Therefore, the empirical method, 3-dimensional probabilistic method, and the positions of measured blocks in the field show general consistency.*

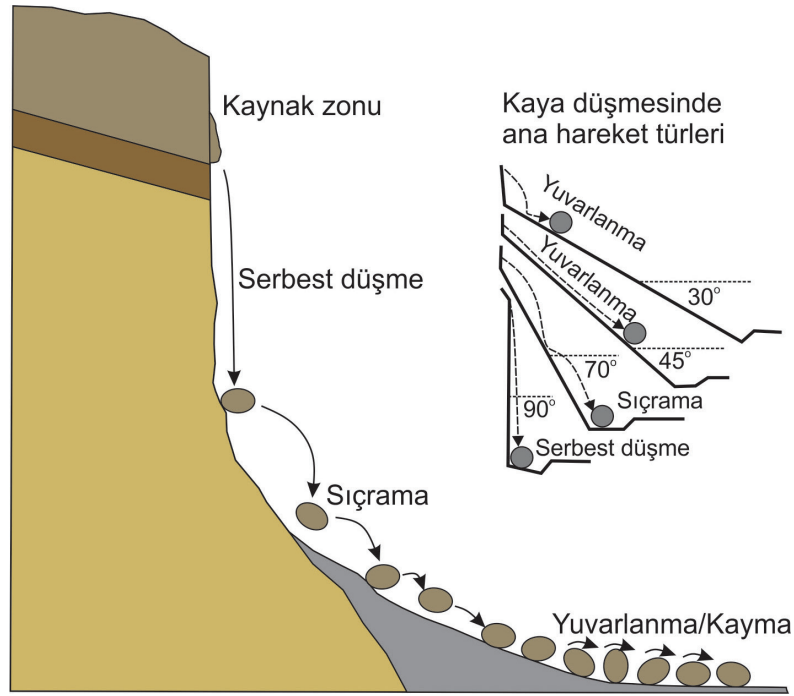
**Keywords:** 3-Dimensional probabilistic analysis, CONEFALL, Energy line angle, Rockfall, Orthophoto, RocPro3D

## GİRİŞ

Dünya Bankası verilerine göre doğal afetlerden kaynaklı can kayıplarının %95'i az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde meydana gelmektedir. Bu sebepten dolayı ülkeler yıllık üretimlerinin yaklaşık %1 - %2'sini doğal afetler neticesinde kaybetmektedirler (Kreimer ve Arnold, 2000). Doğal afetlere neden olan kaya düşmeleri Varnes (1978) tarafından yamaç veya şevlerde süreksizliklerle sınırlı olan kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle kaynak bölgesinden hızlı bir şekilde arazi eğim yönünde hareket ettiği bir duraysızlık türü olarak tanımlanmıştır. Kaya kütleleri, içerdiği süreksizlik yüzeylerindeki suların donma-çözülme etkisiyle oluşturduğu içsel basınçlar, deprem dalgalarının oluşturduğu dinamik yükler, farklı ayrışma ve ağaç köklerinin zamanla büyümesi gibi birçok faktörden dolayı kaynak zondan kopar ve çoğunlukla dik bir yamaçtan serbest düşme hareketi sergiler (Şekil 1). Kaya kütlelerinin hareket ettiği arazinin eğimi azaldıkça kaya bloğunun hareketi önce sıçramaya daha sonra ise yuvarlanmaya dönüşür (Akın vd., 2019; Wyllie, 2014). Kaya düşmeleri, diğer şev duraysızlıkları ile kıyaslandığında gerek tetikleyici unsurları gerekse kaynak zonundan

dolayı kestirilmesi güç bir duraysızlık türüdür (Akın vd., 2019). Dik yamaçlarda uzun süre duraylı konumda kalabilen büyük kaya blokları ani bir tetikleyici unsurdan dolayı ana kayadan ayrılabilen ve bu olay neticesinde ciddi can ve mal kayıpları meydana gelebilmektedir.

Ülkemiz jeolojik ve coğrafik konumundan dolayı çeşitli jeolojik tehlikelerin etkisi altındadır. Etkilediği insan ve konum bakımından her ne kadar depremler ilk akla gelen doğal afet olsa da kaya düşmeleri de ülkemizde sıkça rastlanan önemli bir afet türüdür. Gökçe vd. (2008) yaptıkları çalışmada, 79 ilimizde kaya düşmesi olaylarının yaşandığını ve 1703 yerleşim biriminin bu afetten etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Kaya düşmelerinden etkilenen 1703 yerleşim birimi ülkemizdeki yerleşim birimlerinin %4,76'sına karşılık gelmektedir. Ülkemizin jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel koşullarında dolayı özellikle Karadeniz Bölgesi başta olmak üzere Doğu Anadolu ve Orta Anadolu Bölgeleri'nin yoğun bir şekilde afete uğradığı görülmektedir (Şekil 2). Şekil 3'te görüldüğü gibi özellikle Kayseri bölgesi ülkemizde kaya düşme olaylarının sıkça yaşandığı bir bölgedir. Bu yüzden bu bölgede yapılan ve yapılacak olan çalışmalar oldukça önemlidir.



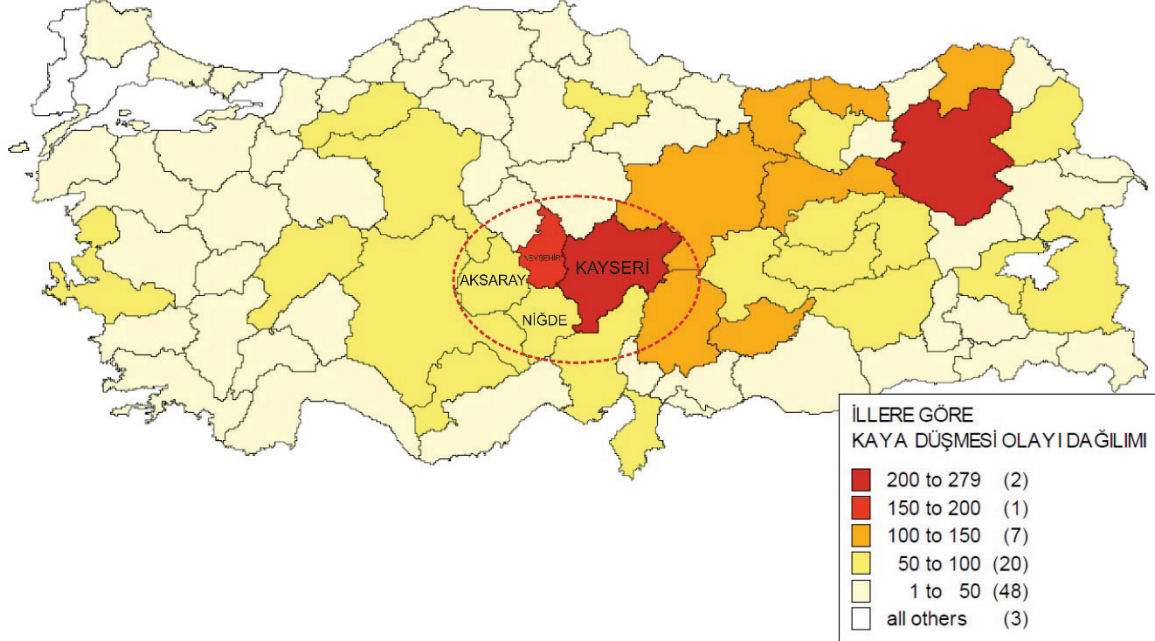
Şekil 1. Kaya düşmesi sırasında kaynak zondan ayrılan kayanın arazi eğime göre sergilediği hareketler (Akın vd., 2019; Ritchie, 1963).

Figure 1. Movement types of blocks detached from a source zone according to slope gradient during rockfall (Akın et al., 2019; Ritchie, 1963).



Şekil 2. 1950- 2008 yılları arasında Türkiye’de yaşanan kaya düşmelerinin mekânsal olarak dağılımı (Gökçe vd., 2008).

Figure 2. Distribution of rockfalls in Türkiye between 1950 and 2008 (Gökçe et al., 2008).



Şekil 3. Kaya düşmesinden etkilenen illerin dağılımı (Gökçe vd., 2008)'den değiştirilmiştir.

Figure 3. Distribution of the provinces affected by rockfall (modified from Gökçe et al., 2008).

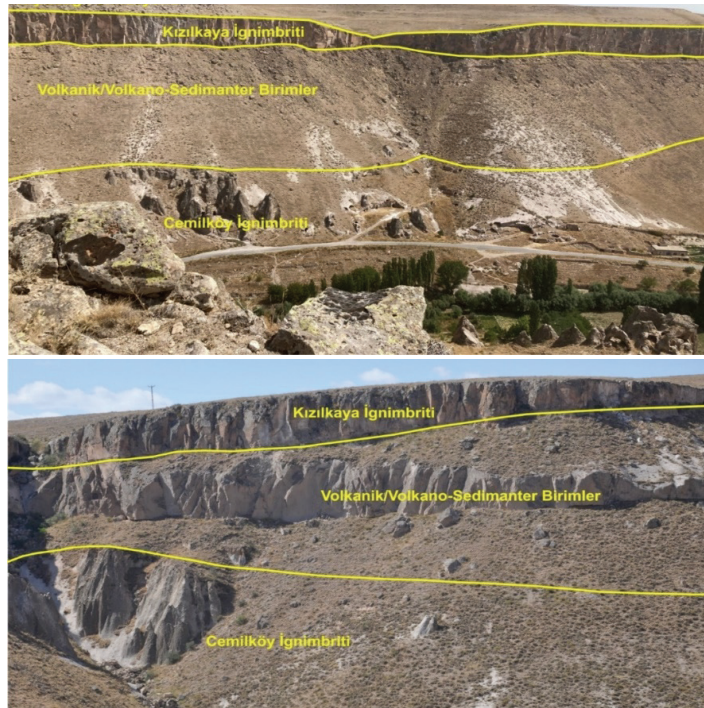
Kaya düşmeleri ile ilgili çalışmalar 1800'li yılların ikinci yarısından itibaren yapılmaktadır (Baltzer, 1875; Bozzolo ve Pamini, 1986; Ritchie, 1963). 2000'li yıllara gelindiğinde teknolojinin ve bilgisayar programlarının gelişmesiyle birlikte kaya düşmeleri hakkında yapılan çalışmalar hızla artmış, kaya düşmeleri 2-boyutlu ve 3-boyutlu olarak modellenmeye başlanmıştır (Akin vd., 2021; Binal ve Ercanoğlu, 2010; Kaya ve Topal, 2015; Polat, 2020; San vd., 2020; Şener, 2019; Ulusay vd., 2006; Volkwein vd., 2011). Özellikle son yıllarda insansız hava araçlarının mühendislik alanlarında daha sık kullanılmasıyla birlikte 3-boyutlu deterministik ve olasılıksal kaya düşmesi analizlerine yönelik modelleme çalışmaları yoğunlaşmıştır (Akin vd., 2014, 2021; Dorren vd., 2007; Guzzetti vd.,

2002; Topal vd., 2006, 2012). Literatürde ampirik yöntemlerle belirlenen kaya düşme zonlarına ait çalışmalar da mevcuttur (Ghani vd., 2022; Hepdeniz, 2019; Kalender ve Sönmez, 2019; Marija vd., 2022; Mutlu vd., 2022). Kaya düşmesi potansiyeline sahip yol güzergahları ve yerleşim yerlerinde kaya düşme analizlerinin yapılarak tehlike haritalarının oluşturulması oldukça önemlidir (Dinçer vd., 2016; Fanos ve Pradhan, 2019; Kalender ve Sönmez, 2019; Topal vd., 2007; Tunusluoglu ve Zorlu, 2009). Bu çalışma kapsamında, Kayseri–Soğanlı yerleşim yerinde geçmişte oluşan ve gelecekte oluşabilecek kaya düşmesi olayları ampirik yöntem (enerji çizgi açısı) ve 3-boyutlu olasılıksal analizler ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

## Çalışma Alanı Jeolojisi

Yapılan arazi çalışmaları sonucunda Soğanlı yerleşim bölgesinde ve yakın çevresinde en üst seviyede Kızılkaya ignimbritleri yer almaktadır. Kızılkaya ignimbritlerinin altında

volkanosedimanter seviyeler yüzlek verirken, Cemilköy ignimbritleri daha alt kotlarda yaygın şekilde gözlenmektedir (Atabey, 1989) (Şekil 4). Vadi tabanına inildiğinde ise akarsuların getirmiş olduğu alüvyonlar gözlenmektedir (Şekil 5).



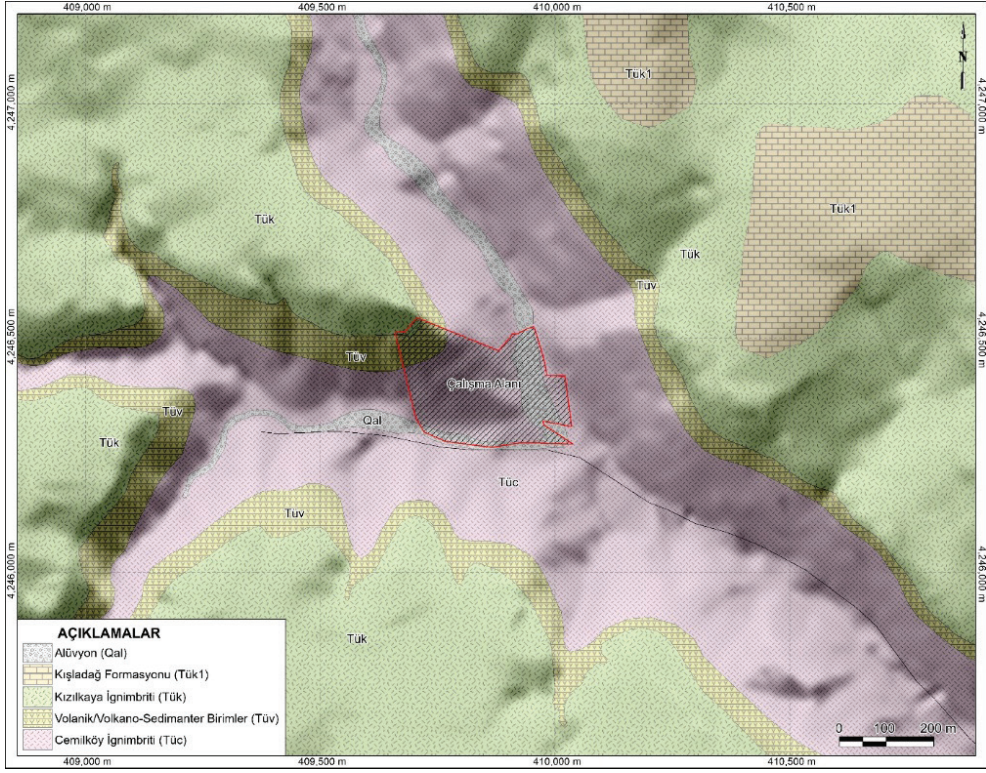
Şekil 4. İnceleme alanındaki jeolojik birimlerin stratigrafik ilişkisi.

Figure 4. Stratigraphic relationship of the geological units in the study area.

## Süreksizlik Çalışmaları ve Kinematik Analizler

Çalışma kapsamın yapılan süreksizlik incelemeleri ISRM (1981; 2007) önerileri doğrultusunda hat etütleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak zonu oluşturan dik yamaç yaklaşık 35 m yüksekliğe sahiptir (Şekil 6). Kızılkaya ignimbritlerinden oluşan kaya düşmesi kaynak zonunun yönelimi değişkenlik gösterdiğinden, söz konusu kaynak zonu iki ayrı sektöre ayrılmıştır. Bu kapsamda birinci sektör güneydoğuya eğimli olup, eğim miktarı  $88^\circ$

iken ikinci sektör güneybatıya eğimli ve eğim miktarı  $86^\circ$ 'dir (Şekil 7). Çalışmaya konu olan yamaçtaki yenilme modellerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen kinematik analizlerde kullanılmak üzere arazi çalışmalarında belirlenen süreksizliklerin yönelimlerinin yanı sıra süreksizliklerin yönelimleri ortofoto mozağından üretilen nokta bulutundan CloudCompare yazılımı kullanılarak Kd-tree yöntemine göre de belirlenmiştir. Nokta bulutundan belirlenen egemen süreksizlik takımları ile arazide ölçülen süreksizlik yönelimlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu saptanmıştır (Çizelge 1).



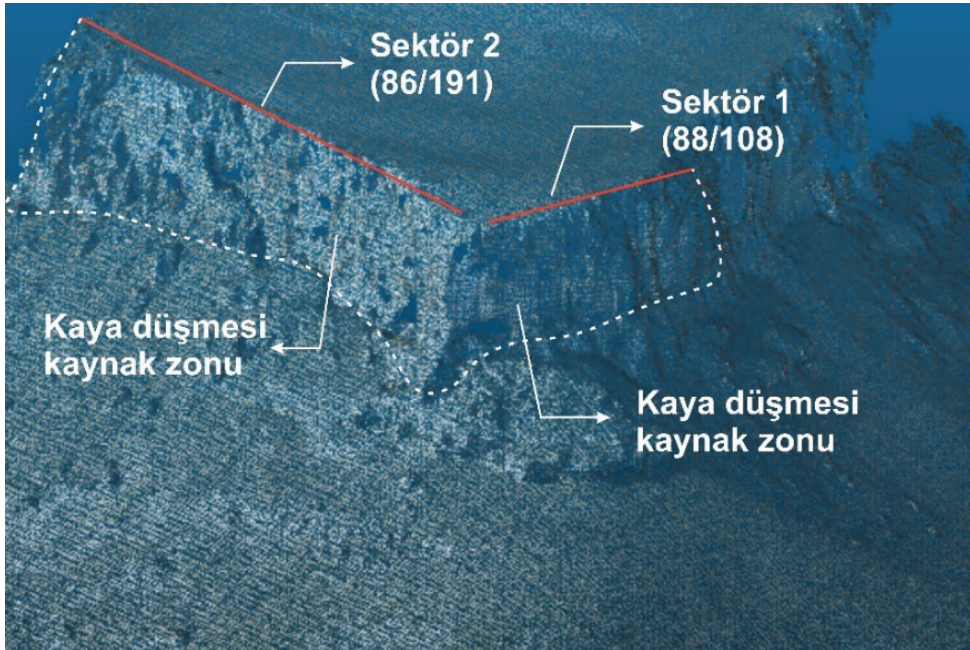
Şekil 5. İnceleme alanı jeoloji haritası (Atabey, 1989'dan değiştirilerek)

Figure 5. Geological map of the study area (modified from Atabey, 1989).



Şekil 6. Kaya düşmesi kaynak zonunu oluşturan dik yamaç.

Figure 6. The steep slope forming the rockfall source zone.



Şekil 7. Kaya düşmesi kaynak zonunda incelenen sektörlerin nokta bulutu üzerinde gösterimi.

Figure 7. Representation of the investigated rockfall source zone sectors on the point cloud.

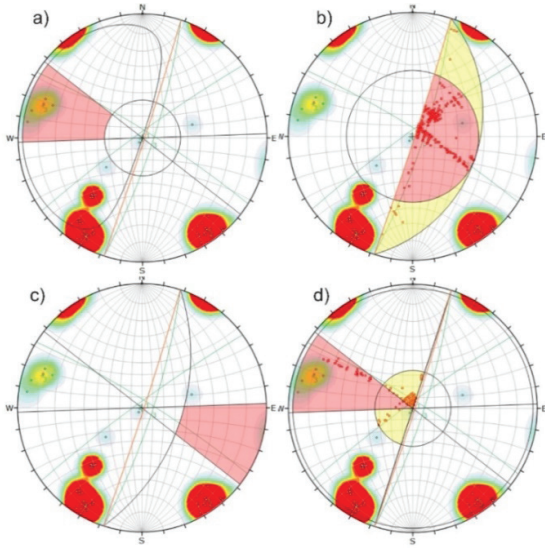
Çizelge 1. Kaya düşmesi kaynak zonunda süreksizlik hat etüdü ve nokta bulutundan belirlenen egemen eklem setlerinin ve yamaçların yönelimi

Table 1. Discontinuity orientation of the dominant sets and slopes at the rockfall source zone derived from scan-line surveys and point cloud

Sektör No	Yamaç eğim yönü/eğim açısı	Egemen süreksizlik eğim yönü /eğim açısı (Arazi ölçüm)	Egemen süreksizlik eğim yönü /eğim açısı (Nokta bulutu)
1	108/88	032/83	116/4
		324/85	358/87
		108/80	101/82
2	191/86	---	086/81
		---	065/26
		---	358/89

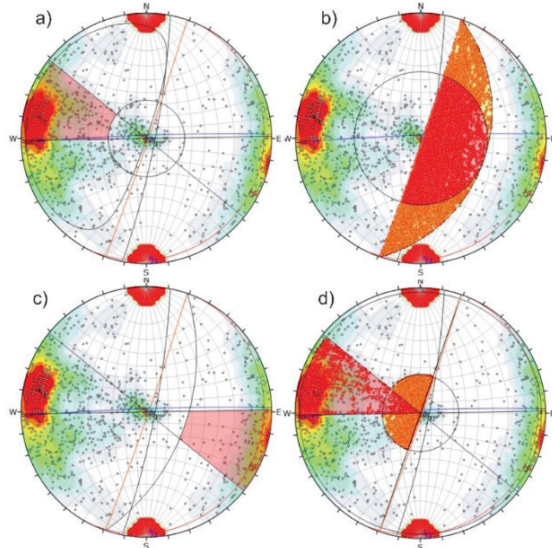
Kinematik analizler Dips yazılımı (Rocscience Inc., 2020) kullanılarak yapılmıştır. Sektör-1'de süreksizlik hat etüdünden elde edilen süreksizlik yönelimleri ile nokta bulutundan belirlenen süreksizliklerin yönelimlerine göre düzlemsel, kama ve devrilme (bükülme ve blok) türündeki muhtemel duraysızlıklara ait kinematik analiz

sonuçları Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Sektör 2'de ise kaynak zonuna ulaşım zorluğundan dolayı arazide süreksizlik hat etüdü yerine, nokta bulutu verisinden süreksizliklerin yönelimleri belirlenmiştir. 2 numaralı sektörde düzlemsel, kama ve devrilme (bükülme ve blok) türündeki muhtemel duraysızlıklara ait kinematik analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 8. Sektör-1 için süreksizlik hat etüdü verisiyle gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları, a) Düzlemsel kayma b) Kama tipi kayma c) Bükülme devrilmesi d) Blok devrilmesi.

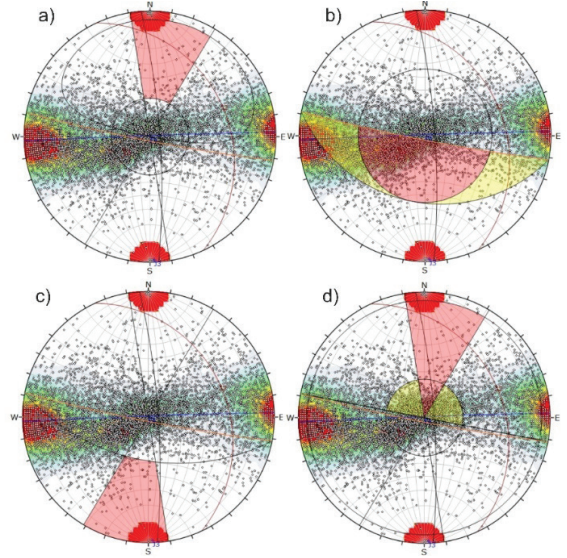
Figure 8. Kinematic analysis results for sector-1 performed using scan-line survey data, a) Planar failure b) Wedge type failure c) Flexural toppling d) Block toppling.



Şekil 9. Sektör-1 için nokta bulutu verisiyle gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları,

a) Düzlemsel kayma b) Kama tipi kayma c) Bükülme devrilmesi d) Blok devrilmesi.

Figure 9. Kinematic analysis results for sector-1 performed using point cloud data, a) Planar failure b) Wedge type failure c) Flexural toppling d) Block toppling.



Şekil 10. Sektör-2 için nokta bulutu verisiyle gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları, a) Düzlemsel kayma b) Kama tipi kayma c) Bükülme devrilmesi d) Blok devrilmesi.

Figure 10. Kinematic analysis results for sector-2 performed using point cloud data, a) Planar failure b) Wedge type failure c) Flexural toppling d) Block toppling.

Kinematik analizler neticesinde incelenen yamaçta kinematik açıdan farklı kaya kütle duraysızlıklarına yol açabilecek süreksizlik sistemleri yer almaktadır. Sektör-1 ve Sektör-2'de gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları dikkate alındığında her iki sektör içinde kinematik açıdan duraysızlık sorunları olduğu görülmektedir. Özellikle dik süreksizliklerden kaynaklanan bükülme devrilmesinin Sektör-2'de yaygın bir duraysızlık türü olduğu tespit edilmiştir. Sektör-1'de ise blok devrilmesi ve kama türü yenilme olasılığının yüksek olduğu



belirlenmiştir. Çalışma bölgesinde yayılım gösteren Kızılkaya ignimbiritlerinde dike yakın soğuma çatlaklarının yönelimlerinin farklı olması, yer yer bu süreksizliklerin kesişerek kama türü

yenilmelere yol açabileceğini göstermektedir. Kinematik analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere kama türü yenilme olasılığı Sektör-1'de oldukça yüksektir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Kaynak zonda gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları.

Table 2. Kinematic analysis results performed in the source zone.

Sektör No	Şev eğim yönü/eğim	Egemen süreksizlik eğim yönü/eğim*	Kinematik analiz sonucu (kritik alana düşen kutup/kesişim yüzdesi)			
			Düzlemsel yenilme	Kama türü yenilme	Bükülme devrilmesi	Blok devrilmesi
1	109/88	116/4 358/87 101/82	20.67	46.48	8.04	31.26
2	191/86	086/81 065/26 358/89	0.31	-	37.66	6.32

\*Nokta bulutu verisinden üretilmiştir.

Kaynak zonu oluşturan yamaç üzerinde gözlenen Kızılkaya ignimbiritlerinde gözlenen süreksizlikler genelde “geniş-çok geniş aralıklı” olarak sınıflandırılmaktadır (Çizelge 3).

Çizelge 3. Kızılkaya ignimbiritlerinde ISRM (1981; 2007) önerilerine göre süreksizlik aralığı tanımlaması

Table 3. Discontinuity spacing definition in Kızılkaya ignimbrites according to ISRM (1981; 2007) recommendations

Aralık (mm)	Tanımlama
<20	Çok dar aralıklı
20-60	Dar aralıklı
60-200	Yakın aralıklı
200-600	Orta derecede aralıklı
<b>600-2000</b>	<b>Geniş aralıklı</b>
<b>2000-6000</b>	<b>Çok geniş aralıklı</b>
>6000	İleri derecede geniş aralıklı

Kaya düşmesi kaynak zonundaki ignimbiritlerde süreksizlikler “çok yüksek” devamlı olarak sınıflandırılabilirler (Çizelge 4). Düşey yöndeki süreksizliklerin devamlılığını kontrol eden en önemli parametre, yamaç yüksekliği olup,

inceleme alanındaki yamaçların çok yüksek olması (çoğunlukla >30 m) nedeniyle süreksizlik devamlılıkları yamaç yüksekliği ile sınırlanmıştır.

Varol, Akın, Orhan, Dinçer

Çizelge 4. Kızılkaya ignimbiritlerinde ISRM (1981; 2007) önerilerine göre süreksizlik devamlılığı tanımlaması

Table 4. Identification of discontinuity persistence in Kızılkaya ignimbrites according to ISRM (1981; 2007) recommendations

Devamlılık (m)	Tanımlama
<1	Çok düşük devamlılık
1-3	Düşük devamlılık
3-10	Orta devamlılık
10-20	Yüksek devamlılık
>20	<b>Çok yüksek devamlılık</b>

Süreksizliklerde dolgu malzemesinin türü ve kalınlığı süreksizlik makaslama dayanımını ve dolayısıyla şev duraylılığını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesidir. Süreksizlik dolgusunun kalın ve kil türü ince malzemeden oluşması süreksizliğin makaslama dayanımını olumsuz yönde etkilerken, damar türündeki kuvars veya kalsit dolguları süreksizlik makaslama dayanımını artırabilmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2007). İnceleme alanındaki ignimbiritlerdeki süreksizlikler çoğunlukla dolgu malzemesi içermemektedir. Yer yer gözlenen süreksizlik dolgu malzemesini ise genellikle kil türü ince malzeme oluşturmaktadır ve dolgu kalınlıkları çoğunlukla süreksizlik yüzey genişliğinden küçüktür.

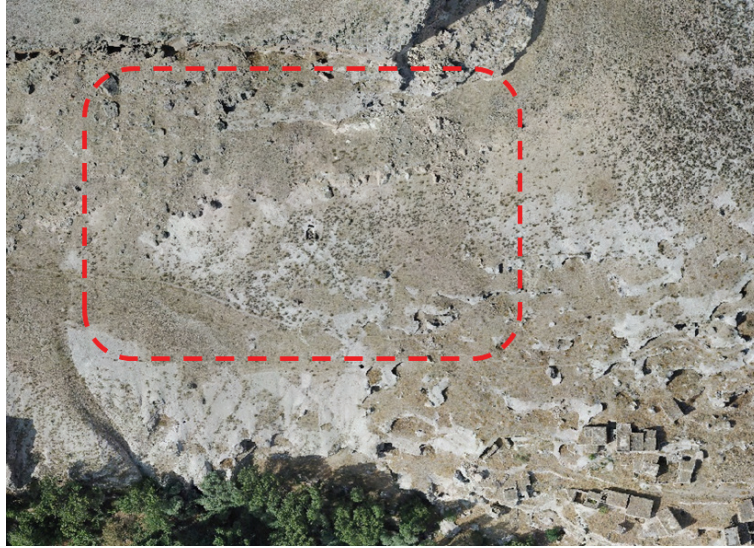
Süreksizliklerde pürüzlülük ve dalgalılık, şev duraylılığı üzerinde doğrudan etkili olan iki önemli etkidir. Pürüzlülüğün ve dalgalılığın artmasına bağlı olarak süreksizlik makaslama dayanımı da artmaktadır. Pürüzlülük bir süreksizlik yüzeyinin küçük ölçekte düzlemsellikten sapmasının bir ölçüsüyken, dalgalılık büyük ölçekteki sapmayı işaret etmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2007). İnceleme alanındaki ignimbiritlerde süreksizliklerin pürüzlülükleri incelendiğinde, ISRM (1981; 2007)'de sunulan pürüzlülük profillerine göre çoğunlukla “düz-pürüzlü” ve “dalgalı” olarak sınıflandırılmaktadır.

### 3-Boyutlu Olasılıksal ve Ampirik Yöntemlerle Gerçekleştirilen Kaya Düşme Analizleri

Çalışmaya konu olan yamaç üzerinde gözlenebilecek kaya düşmesi olaylarının değerlendirilmesinde 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden ve ampirik yöntemlerden yararlanılmıştır. Bu analizler neticesinde inceleme sahasında düşmesi muhtemel olan kaya bloklarının maksimum yuvarlanma mesafesi, sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji dağılımları 3-boyutlu sayısal yüzey modeli üzerinde RocPro3D (RocPro3D, 2014) yazılımı kullanılarak ve enerji çizgi açısı kullanılarak CONEFALL (Quanterra, 2003) yazılımı ile hesaplanmıştır. İncelemeye konu olan yamaçta yapılan arazi çalışmaları kapsamında özellikle güney yamaçta daha önceki dönemlerde düşmüş olan çok sayıda irili ufaklı blok gözlenmiştir (Şekil 11). Yamacın doğuya bakan kısmında ise güney yamaca göre nispeten daha az düşmüş blok tespit edilmiştir. Düşen blokların boyutları arazide ölçülerek ve ortofoto üzerinde de blok boyutları belirlenerek 3-boyutlu analizlerde kullanılacak blok boyutu belirlenmiştir (Şekil 12). Çalışma sahasında ölçülen 21 adet bloğun hacimleri Çizelge 5'te verilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde, daha önceden düşmüş olan blokların ortalama bir eksen uzunluğunun 1,6 m, minimum eksen uzunluğunun 0,5 m ve maksimum eksen uzunluğunun ise 5,0 m olduğu görülmektedir. Blok hacimlerine bakıldığında ise ortalama blok hacmi 7,11 m<sup>3</sup>, minimum blok hacmi 0,20 m<sup>3</sup> ve maksimum blok hacmi 37,40 m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir (Şekil 13). Arazide yapılan blok ölçümlerinin yanı sıra ortofoto üzerinden de blok ölçümleri yapılmıştır (Şekil 14). Ortofoto üzerinde yapılan blok ölçümlerinde en büyük kısıtlama blokların yüksekliklerinin belirlenmesi işlemidir. Düşen blokların yükseklikleri, (en + boy)/2 yaklaşımı varsayılarak belirlenmiştir. Ortofoto üzerinde 150 bloğun en, boy ve yükseklikleri ölçülmüş

ve hacimleri hesaplanmıştır (Şekil 15). Ölçülen blokların maksimum blok hacmi  $159,17 \text{ m}^3$ , minimum blok boyutu  $0,11 \text{ m}^3$ , ortalama blok hacmi ise  $5,74 \text{ m}^3$  olarak belirlenmiştir. Kaynak zonu oluşturan Kızılkaya ignimbiritlerinde yapılan süreksizlik hat etüdü çalışmalarında da genel olarak süreksizlik aralığının 2 m'nin

üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu durum düşen blok boyutları ile uyum göstermektedir. Aynı zamanda kaynak zondan kopan iri blokların topoğrafyaya çarpması ile parçalanarak yollarına devam etmesi ve blok boyutlarında azalmaların olması da muhtemeldir.



Şekil 11. Kaynak zondan düşen blokların yoğun olduğu güney yamaç (ortofoto görünümü).

*Figure 11. The southern slope where fallen blocks are dense (orthophoto view).*



Şekil 12. Kaynak zondan daha önce düşen bloklar.

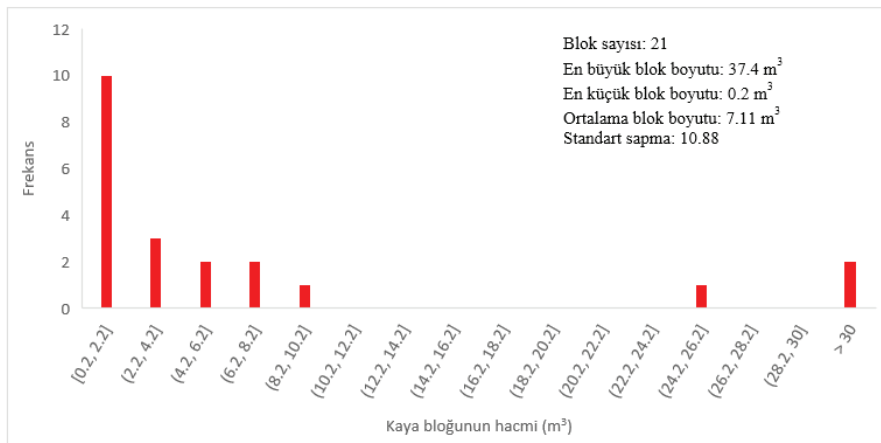
*Figure 12. Fallen blocks from the source zone.*

Varol, Akın, Orhan, Dinçer

Çizelge 5. Arazide ölçülen düşen blokların boyutları.

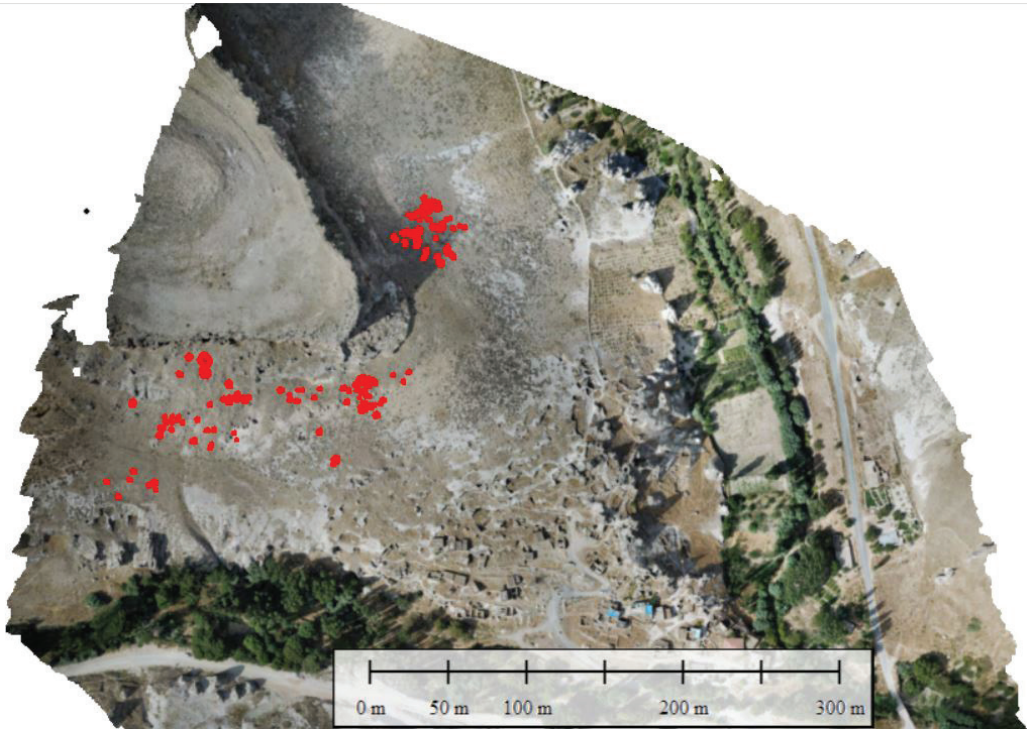
Table 5. Dimensions of previously fallen blocks measured in the field.

Blok No	a (m)	b (m)	c (m)	Hacim (m <sup>3</sup> )
1	1,30	1,50	1,20	2,34
2	1,30	1,00	1,00	1,30
3	0,80	0,50	0,50	0,20
4	2,55	1,20	0,50	1,53
5	2,00	1,60	1,10	3,52
6	1,00	0,50	0,70	0,35
7	5,00	2,20	3,40	37,40
8	0,95	1,40	0,50	0,67
9	1,60	0,90	0,60	0,86
10	2,70	1,70	1,50	6,89
11	3,20	3,50	3,00	33,60
12	2,60	1,70	1,10	4,86
13	3,20	3,00	2,60	24,96
14	1,81	1,20	1,62	3,52
15	0,90	1,50	1,20	1,62
16	1,20	1,45	1,00	1,74
17	0,82	0,90	1,70	1,25
18	1,15	0,88	0,80	0,81
19	2,40	1,50	1,65	5,94
20	2,40	2,00	1,45	6,96
21	2,00	2,26	2,00	9,04



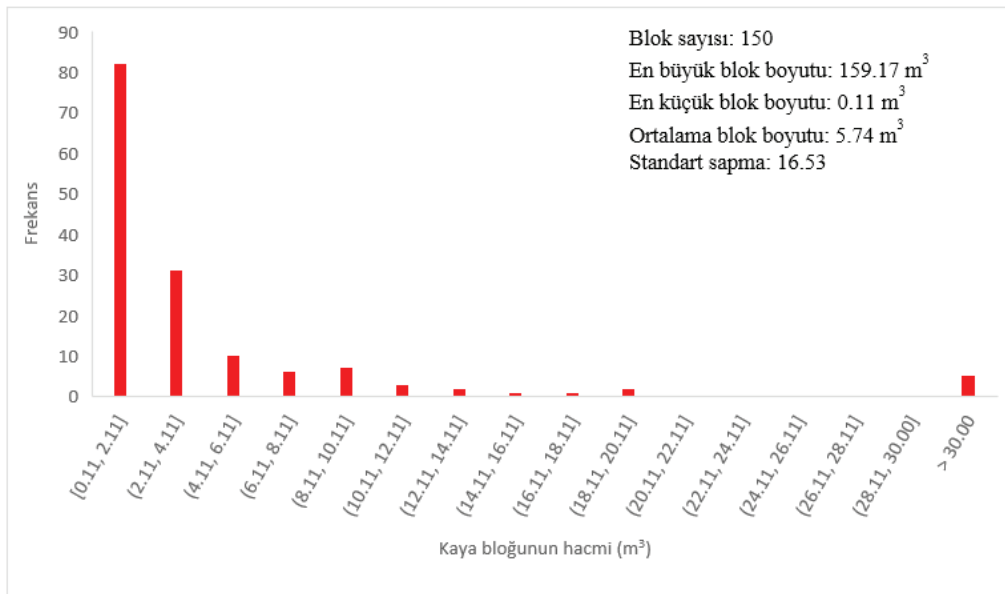
Şekil 13. Arazi çalışmaları sırasında ölçülen 21 bloğun hacim dağılımları

Figure 13. The volume distribution of 21 blocks measured during field studies.



Şekil 14. Ortophoto üzerinde ölçülen bloklar.

Figure 14. Blocks measured on the orthophoto



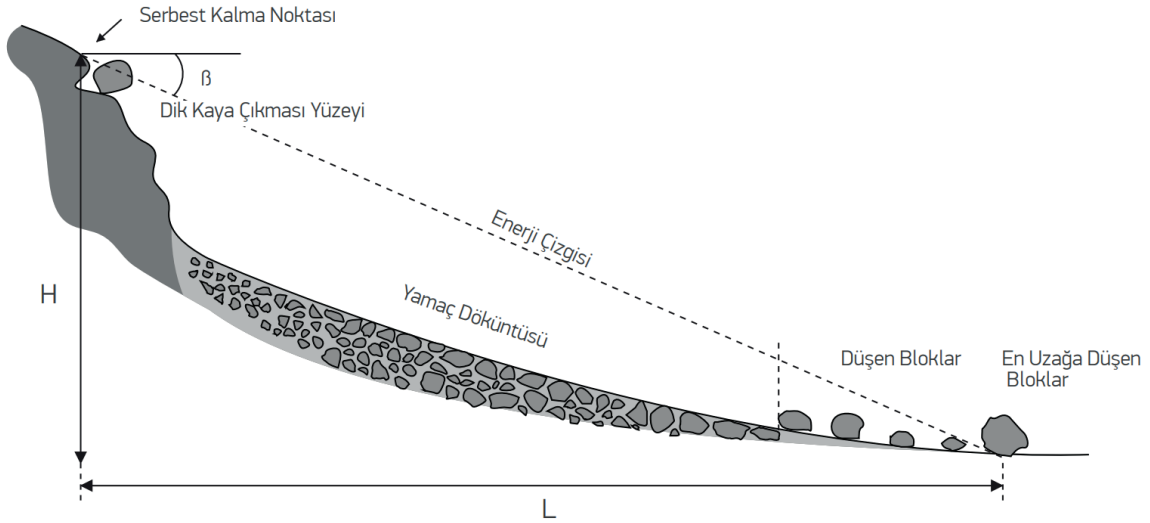
Şekil 15. Ortophoto üzerinden ölçülen 150 bloğun hacim dağılımları

Figure 15. The volume distribution of 150 blocks measured on the orthophoto.

### Enerji Çizgi Açısı Yöntemi ile Gerçekleştirilen Kaya Düşme Analizleri

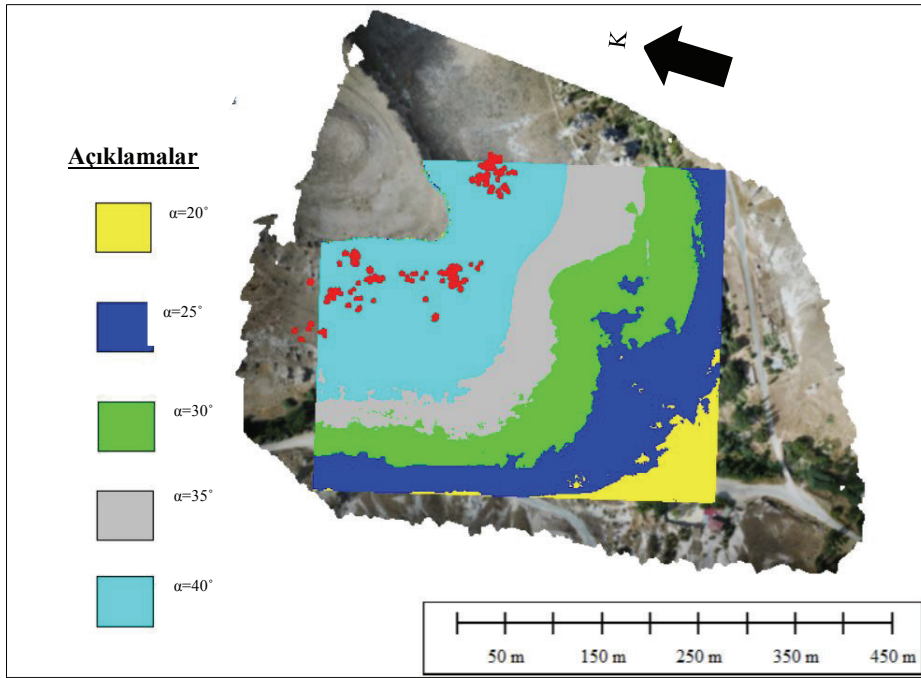
Heim (1932) tarafından önerilen “ulaşma açısı” veya daha genel bir ifade ile “enerji çizgi açısı” yönteminde, kaynak zondan ayrılan kaya bloğunun enerjisi ile yuvarlanabileceği en uzak mesafe arasında bir ilişki olduğu varsayılmaktadır. Bu ampirik yöntem kaya düşme olaylarının daha önceden gerçekleştiği alanlarda, düşmüş kaya bloklarına yönelik yapılan gözlemsel çalışmalara dayanmaktadır. Enerji çizgi açısı yönteminde, Şekil 16’da gösterildiği gibi kaya bloğunun serbest kaldığı kaynak zonun en üst kotundan başlayan ve yatayla belirli bir açı ile ( $\beta = \arctan[H/L]$ ) ile eğim aşağı uzatılan ve enerji çizgisi olarak adlandırılan doğrunun topoğrafyayı kestiği nokta maksimum yuvarlanma mesafesi olarak kabul edilmektedir.

Enerji çizgi açısı yöntemi, bölgesel olarak gerçekleştirilen kaya düşmesi değerlendirmelerinde sayısal yükseklik modeli (SYM) üzerinde kaya düşmesi menzil mesafesine bağlı olarak Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımları kullanılarak haritalanabilmektedir. Larcher vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, enerji çizgi açısının  $26^\circ$  ile  $56^\circ$  arasında geniş bir aralıkta değiştiği belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında da kaynak zondan başlayarak  $20^\circ$ ’den  $40^\circ$ ’ye kadar  $5^\circ$ ’lik artışlarla enerji çizgi açıları CONEFALL yazılımı (Quanterra, 2003) ile belirlenmiş ve ortofoto üzerine işlenmiştir. Ortofoto üzerine işlenen yayılım zonlarından görüleceği üzere Soğanlı yerleşim yerinde geçmişte düşmüş olan blokların tamamı  $40^\circ$ ’lik zon içerisinde kalmaktadır (Şekil 17).



Şekil 16. Enerji çizgi açısı kavramı (Copons vd., 2009).

Figure 16. Energy line angle concept (Copons et al., 2009).



Şekil 17. Soğanlı bölgesinde CONEFALL yazılımı ile belirlenen enerji çizgi açısı zonları ve düşmüş bloklar.

Figure 17. Energy line angle zones determined by CONEFALL software and fallen blocks in the Soğanlı region.

### 3-Boyutlu Olasılıksal Kaya Düşme Analizleri

3-boyutlu kaya düşme analizlerinin en büyük avantajlarından biri de modeller oluşturulurken X, Y ve Z düzlemlerinin dikkate alınmasıdır. Kaya düşme hatları boyunca topoğrafya üzerinde yer alan kanal, oluk, sırt gibi jeomorfolojik düzensizliklerin yönelimleri ve yuvarlanma mesafeleri üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Diğer yandan topoğrafya üzerinde yer alan düzensiz yapılar düşen bloğun dönme ve öteleme kinetik enerji bileşenlerini de etkilemektedir. Topoğrafya üzerinde meydana gelen değişkenliklerin kaya düşme hatları üzerindeki en önemli etkisi yanal saçılımlardır (Crosta ve Agliardi, 2004). Yanal saçılım, bir noktadan yuvarlanan bloğun en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe ile şev uzunluğu arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır (Turner ve Schuster, 2012). Topoğrafyadaki

3-boyutlu düzensizliklerin de düşen blokların dinamiği üzerindeki etkisi en az blok şekli kadar önemlidir. Diğer taraftan, kaya düşme hatlarının uzunluğu ne kadar artarsa bu etki de paralel olarak artmaktadır.

Kaya tutma bariyeri, tel kafes vb. gibi kaya düşme olaylarına karşı alınacak önlemlerin tasarımı için, düşebilecek olan kaya bloklarının kinetik enerjileri ve maksimum sıçrama yüksekliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kaya düşmesi tehlikesinin tahmin edilebilmesi için de düşen blokların durma mesafesini değerlendirmek bir diğer zorunluluktur. Kaya bloklarının kaynak zondan koparak, önce düşmesi daha sonra yuvarlanmaya başlaması ve çarptığı yüzeyde sıçraması, kaya bloğunun hareketi esnasında kazandığı kinetik enerji ve bu enerjinin sönümlenmesi ve enerji sönümlenmesi ile kaya bloğunun hareketine son vermesi, yamaç

geometrisi ve yamaçta yer alan yüzeylerin temel fiziksel özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu fiziksel özellikler arasından şev geometrisi, normal geri verme ( $R_n$ ) ve tanjant geri verme ( $R_t$ ) katsayıları ve sürtünme açısı ( $k$ ) oldukça önemlidir.

3-boyutlu kaya düşme modellemelerinde, kaya düşme hatları 3-boyutlu düzlem üzerinde hesaplanmaktadır. Bu nedenle, kaya düşme hattının yatay ve düşey alandaki yönelimiyle, düşen bloğun kinematiği, sıçrama yüksekliği ve pozisyonu arasında bağlantı bulunmaktadır. 3-boyutta yapılan kaya düşme analizlerinin en büyük avantajı, topoğrafyanın kaya düşme hatları üzerindeki yön değiştirici etkisinin modele dahil edilebilmesine imkân vermesidir.

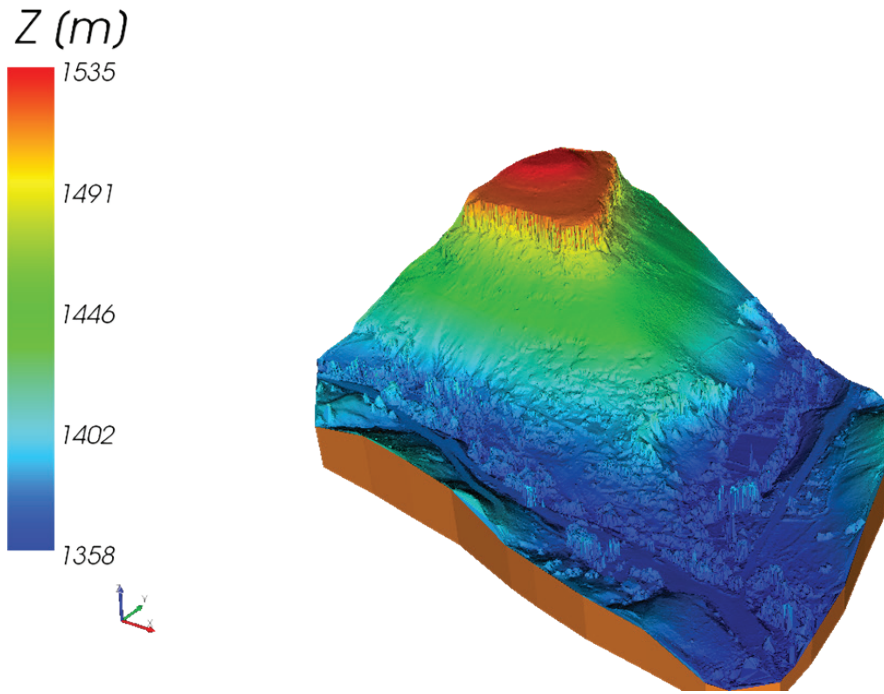
İnceleme sahasını oluşturan Kayseri-Soğanlı yerleşim yerinde 3-boyutlu kaya düşme analizleri, incelemeye konu olan yamaçta insansız hava aracı (İHA) ile alınan 5 cm çözünürlüğe sahip gerçek ortofoto mozaiki görüntülerinden fotogrametrik yöntemlerle elde edilen nokta bulutundan oluşturulan detay sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya konu olan sahada blok hareketini engelleyecekmiş gibi görünebilecek zayıf bitki örtüsü bulunmadığından nokta bulutuna herhangi bir filtre uygulanmamıştır.

İnceleme alanı için İHA görüntüsünden elde edilen nokta bulutundan RocPro3D (2014) yazılımında oluşturulan ve 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin altlığını oluşturan sayısal yüzey modelinden üretilen düzensiz üçgen ağı (TIN) ve yükseklik modeli Şekil 18’de, arazi eğim modeli ise Şekil 19’da gösterilmiştir.

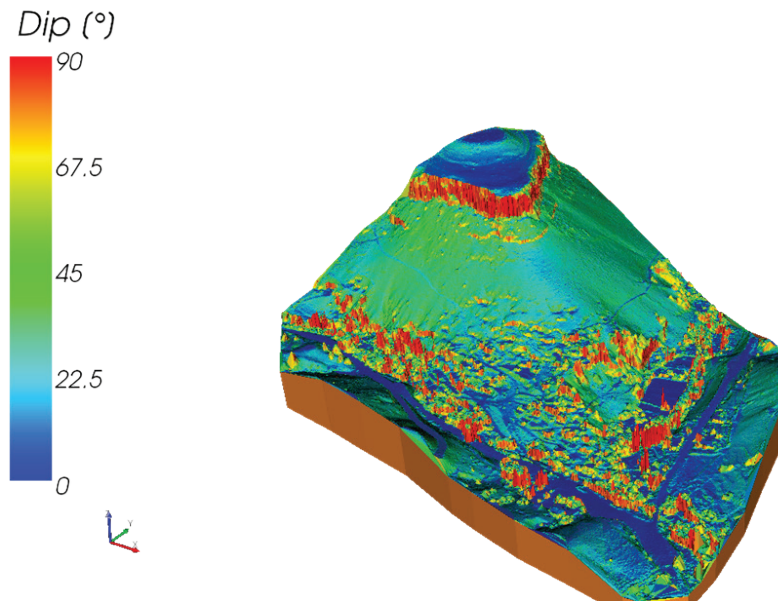
Şekil 18’de görüldüğü üzere inceleme alanının deniz seviyesinden yüksekliği 1358 m ile 1535 m arasında değişmektedir. Yapılan arazi çalışmaları sırasında kaynak zonu oluşturan dik yamaç üzerinde çok sayıda düşme potansiyeli olan blok bulunmaktadır. Kaynak zonun güney yamacında da geçmiş dönemlerde düşmüş çok sayıda blok yer almaktadır.

RocPro3D (2014) yazılımında kaya düşmesinin modelleneceği 3-boyutlu sayısal yüzey modeli üzerine farklı jeolojik birimler ve bu birimlere ait farklı arazi geri verme katsayıları ile sürtünme katsayıları tanımlanabilmektedir. İnceleme alanında yapılan arazi çalışmalarında, kaya düşmelerinin gerçekleştiği yamaç dört farklı jeolojik birim belirlenmiştir. Buna göre, en üst seviyede alta doğru Kızılkaya ignimbiritleri, volkanosedimanter birimler ve Cemilköy ignimbiritleri ile vadi tabanında alüvyon çökeller gözlenmiştir. Bu birimlerin arazide gözlemlenen sınırları 3-boyutlu kaya düşme modeline tanıtılmıştır (Şekil 20).

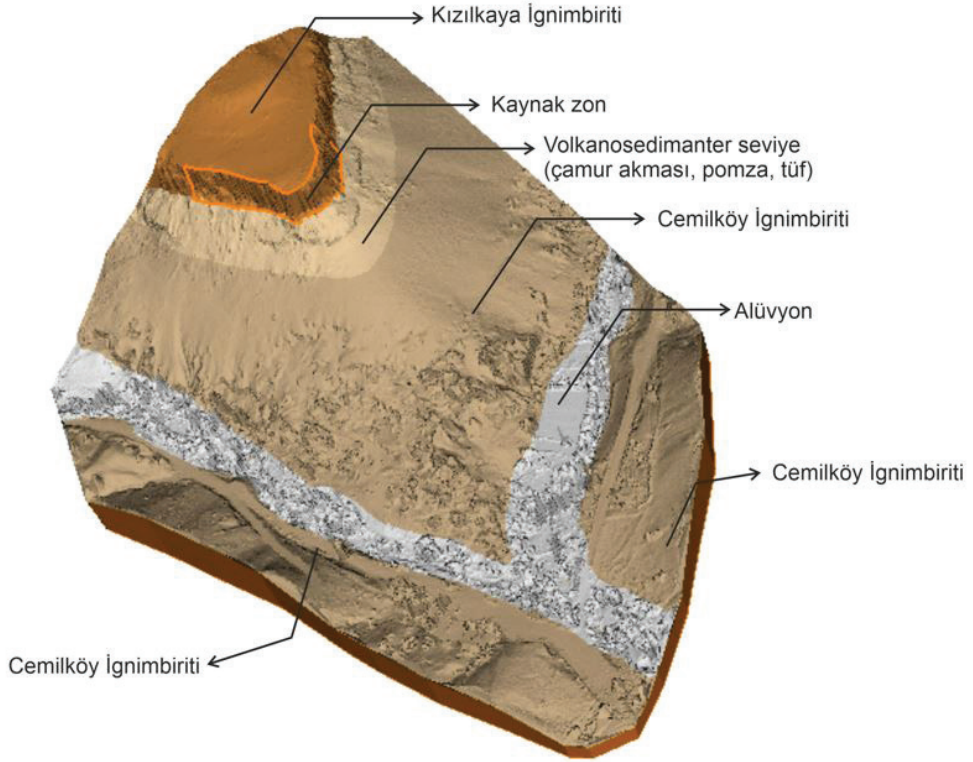




Şekil 18. İnceleme alanına ait sayısal yüzey modeli.  
Figure 18. Digital surface model of the study area.



Şekil 19. İnceleme alanına ait arazi eğim modeli.  
Figure 19. Slope gradient model of the study area.



Şekil 20. İnceleme alanındaki litolojik birimlerin ve kaynak zonun 3-B model üzerinde gösterimi.

Figure 20. Lithological units and source zone in the study area on a 3-D model.

Arazide daha önceden düşen blokların konumlarına bağlı olarak yapılan geri analizler ve literatür verilerine bağlı olarak Soğanlı yerleşiminin 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 6'da özetlenmiştir. Olasılıksal analizlerde geri verme katsayıları için topoğrafyadaki değişkenliklere ve ayrışma durumuna bağlı olarak  $\pm$  %5 değişkenlik oranı atanmıştır. Öte yandan, bloğun yamaç üzerindeki hareketi esnasında blok dinamiğine etki edebilecek yamaç pürüzlülüğündeki değişkenliği ortaya koyacak şekilde sürtünme katsayısı değişkenlik

oranı ise %12 olarak seçilmiştir (Şekil 21). RocPro3D (2014) yazılımında inceleme alanı için sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, ignimbirit bloklarının ortalama birim hacim ağırlığı laboratuvar deney sonuçlarına göre  $18,00 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Bu verilere göre 3-boyutlu olasıksal kaya düşme analizlerinde kaynak zondan 75.000 adet, 3 m boyutunda kaya blokları sayısal yüzey modeli üzerinde düşürülerek yuvarlanma mesafesi, sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji gibi parametreler belirlenmiştir.

Çizelge 6. RocPro3D yazılımında 3-B kaya düşme analizleri için kullanılan geri verme ve sürtünme katsayıları (Akın vd., 2019; Akın vd., 2021).

Table 6. Coefficient of restitution and friction coefficients used in 3-D rockfall analyses in RocPro3D software (Akın et al., 2021; Akın et al., 2019).

Jeolojik Birim	Normal geri verme katsayısı (Rn)	Tanjant geri verme katsayısı (Rt)	Sürtünme katsayısı (k)
Kızılkaya İgnimbiriti	0,45	0,85	0,50
Volkanosedimanter seviye	0,35	0,85	0,40
Cemilköy İgnimbiriti	0,35	0,85	0,40
Alüvyon	0,30	0,50	0,60



Şekil 21. RocPro3D yazılımında olasılıksal 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde blok dinamiğine (Cemilköy ignimbiriti için) ait parametreler ve değişkenlik aralıkları.

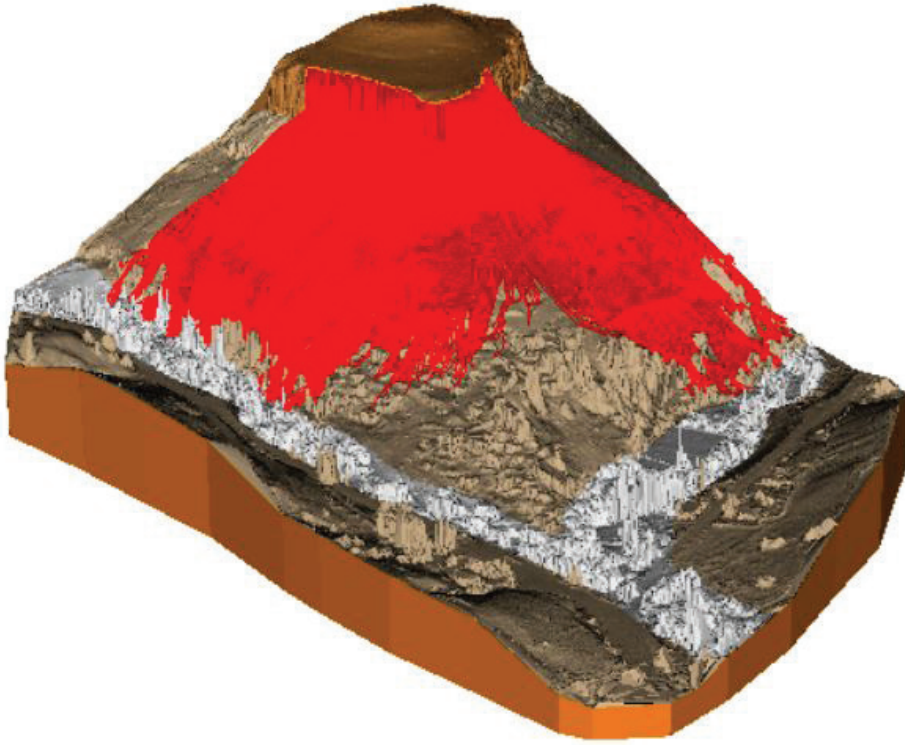
Figure 21. Parameters and variability ranges of block dynamics (for Cemilköy ignimbrite) in probabilistic 3-dimensional rockfall analyses in RocPro3D software.

İHA'dan elde edilen sayısal yüzey modeli üzerinde 3 m blok boyutu ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda belirlenen kaya yuvarlanma hatları Şekil 22'de

gösterilmiştir. Şekil 22'de görüldüğü üzere kaynak alandan düşen kaya blokları yamacın sırt tipi morfolojiye sahip olmasından dolayı ve yamaç eğimine bağlı olarak kuzeydoğu ve

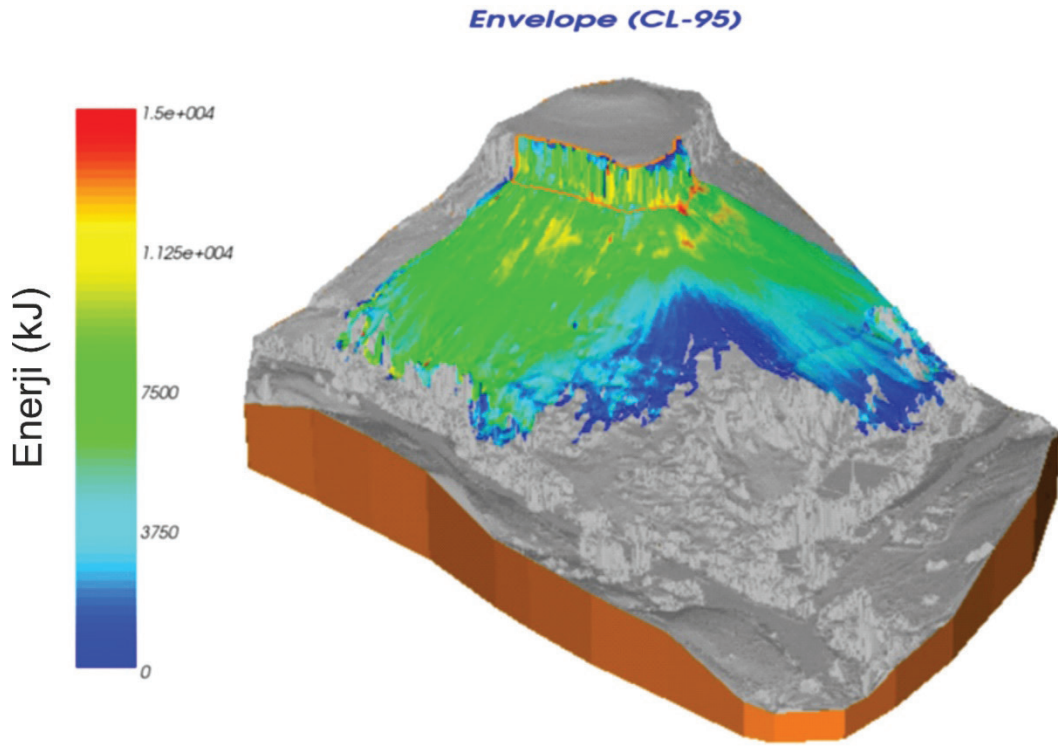
güneydoğuya doğru kavisli bir şekilde yönelim göstermektedir. RocPro3D (2014) yazılımı ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, 3 m'lik silindirik bloklar için toplam kinetik enerji değerleri belirlenmiştir (Şekil 23). 3 m'lik blok boyutlarında toplam kinetik enerji değerleri maksimum 15,000 kJ civarındadır.

Kinetik enerji modeli incelendiğinde kaynak zondan kopan bloklar çok yüksek kinetik enerji değerleri ile harekete başlamaktadır. Yamacın kavisli yapısından dolayı bloklar güneydoğu ve kuzeydoğu yönüne doğru yönlenmekte ve yamacın alt kotlarından kinetik enerji değerleri 1,000 kJ altına düşmektedir.



Şekil 22. İnceleme alanında 3 m blok boyutu için RocPro3D yazılımı ile yapılan olasılıksal 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatları.

*Figure 22. Rockfall trajectories determined by probabilistic 3-D rockfall analysis with RocPro3D software for a block size of 3m in the study area.*

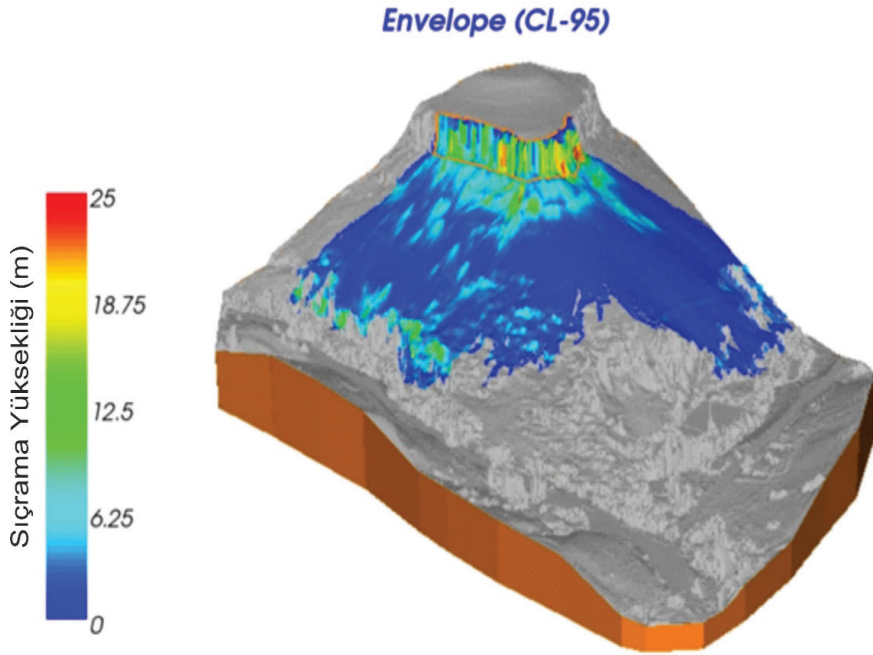


Şekil 23. İnceleme alanı için RocPro3D (2014) yazılımı ile hesaplanan toplam kinetik enerji modeli.  
 Figure 23. Total kinetic energy model calculated with RocPro3D (2014) software for the study area.

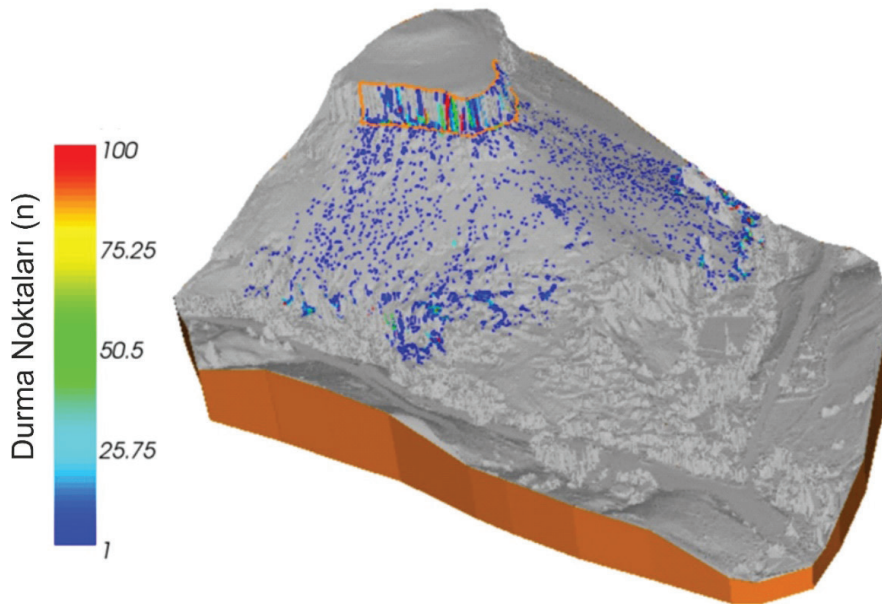
Şekil 24'te model üzerinde yuvarlanan blokların topoğrafyaya çarpması sırasında oluşan sıçrama yükseklikleri gösterilmiştir. Kaynak zondan ayrılan blokların yaptığı sıçrama yüksekliğinin yamaç eğiminin azaldığı kısımlarda çok yüksek olmadığı ve blokların sıçrama yerine genellikle yuvarlanma hareketi yaptıkları belirlenmiştir. Ancak kaynak zonu oluşturan dik yamaçtan düşen blokların serbest düşme esnasında yaptıkları sıçrama hareketi yaklaşık olarak 15 m olarak belirlenmiştir. Kaynak zon yüksekliğinin 30 m'ye ulaştığı göz önüne alındığında ilk düşme esnasında belirlenen sıçrama yüksekliği beklenen bir sıçrama yüksekliğidir. Çalışma alanı genel olarak değerlendirildiğinde blokların sıçrama

yüksekliklerinin 3-4 m civarında olduğu tespit edilmiştir.

Olasılıksal yöntemlerle gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri neticesinde 3 m boyutundaki kaya bloklarının durma noktalarının yoğunluğu Şekil 25'te gösterilmiştir. Kaynak zondan ayrılan blokların birçoğunun vadi tabanındaki dere yatağına kadar ulaştığı gözlenmiştir. Bu sonuçlar arazi çalışmaları sırasında belirlenen önceden düşmüş blokların ulaştığı en uzak mesafe ile de örtüşmektedir. Diğer bir taraftan, yamacın doğuya bak kısmında yuvarlandıktan sonra duran blokların sayısı kuzey ve güney kısımlarına göre daha azdır. Bu durum doğuya bakan kısmın daha kavisli bir yapı göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 24. İnceleme alanı için RocPro3D (2014) yazılımı ile hesaplanan sıçrama yüksekliği modeli.  
Figure 24. Bounce height model calculated with RocPro3D (2014) software for the study area.



Şekil 25. İnceleme alanındaki 3-B kaya düşme analizlerine göre düşen blokların durma noktaları.  
Figure 25. The stop points of the falling blocks according to the 3-D rockfall analysis in the study area.

RocPro3D (2014) yazılımında 3-boyutta yapılan analizlerden elde edilen kaya düşme hatlarının 2-boyutlu kesitler üzerinde incelenebilmesi de mümkündür. Bu kesitler üzerinde, yuvarlanan blokların hareketleri sırasındaki sıçrama yükseklikleri, kinetik enerjileri, yuvarlanma hızı gibi özelliklerinde meydana gelen değişimler mesafeye bağlı olarak değerlendirilebilmektedir. 1507 m kotundan koştuktan sonra yamaç eteğine kadar ulaşan 3 m'lik bir bloğa ait yuvarlanma hattı için toplam kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği değerlerinin 2-boyutlu kesit hattı boyunca değişimi Şekil 26'da verilmiştir. Söz konusu blok ilk hareket noktasından itibaren 163,9 m uzağa ulaşmıştır. Bloğun 3-boyutlu model üzerindeki hareket rotası Şekil 26c'de sunulmuştur.

İncelenen kesit hattında yuvarlanma mesafesi 163,9 m'dir. 28 numaralı yuvarlanma hattında maksimum toplam kinetik enerji 12,000 kJ'dur ve dik yamaçtan serbest düşme ile hareketine başlayan bloğun dik yamacın topuk kesiminde topoğrafyaya ilk çarpmasında kinetik 6,000 kJ'a yaklaşmıştır. Şekil 26'da görüleceği üzere topoğrafyaya ilk çarpmasının ardından sıçrayan blokta kinetik enerji artışı devam etmiş ve toplam kinetik enerji yamaç ortalarında 12,000 kJ seviyesine ulaşmıştır. Yamacın alt kotlarında topoğrafyadaki düzensizliğe bağlı olarak bloğun enerjisi durmaya yakın ani bir şekilde azalmıştır.

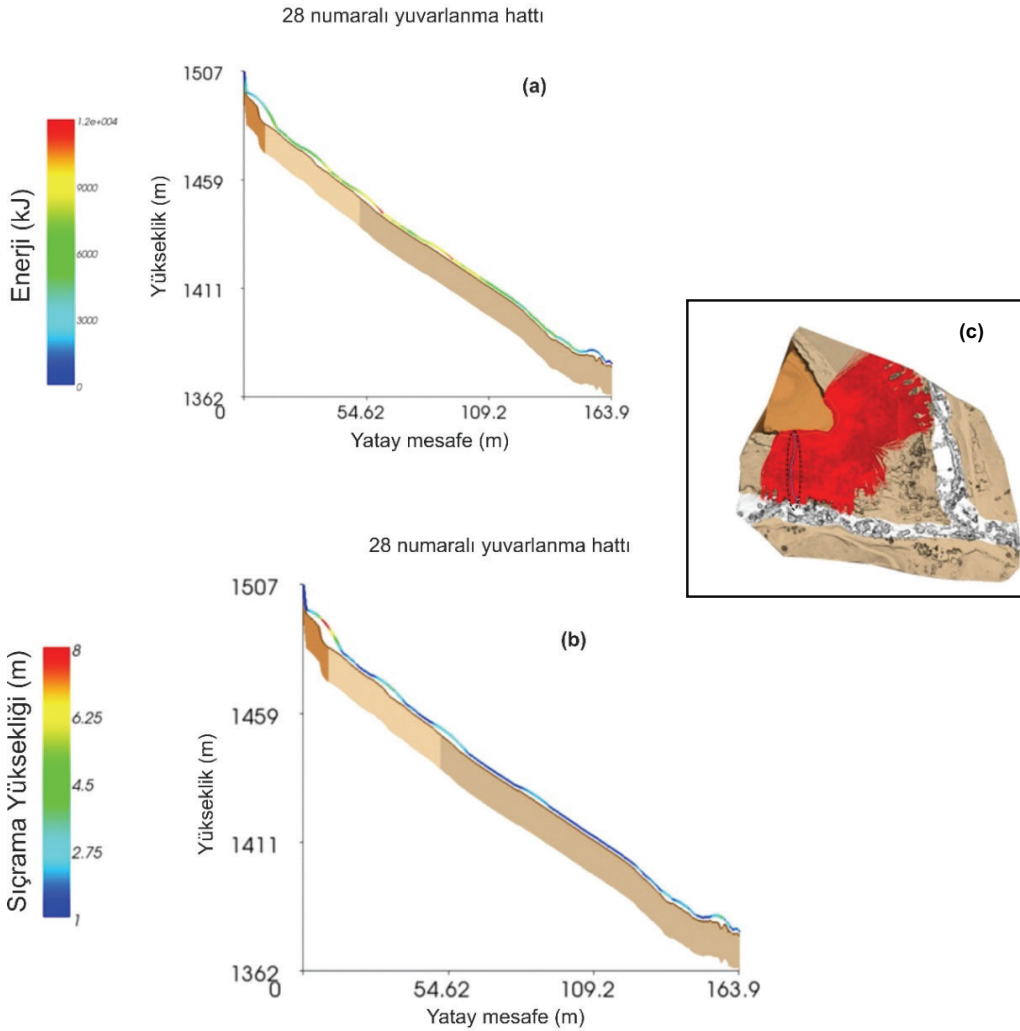
3 m boyutlu bloğun yuvarlanma hattında genel olarak sıçrama yüksekliklerinin fazla olmadığı görülmektedir. Bloğun yamaca ilk çarpmasından sonra sıçrama yüksekliği 8 m'ye yaklaşmıştır, ancak daha sonra düşük eğimli yamaç üzerine geldiğinde bloğun yamaca çok yakın mesafede hareket ettiği görülmektedir. Diğer bir ifade ile iri blok düşük eğimli yamaç üzerinde çoğunlukla yuvarlanmaktadır. Topoğrafyadaki düzensizlikler, bloğun hareketi esnasında yer yer ufak sıçramalara neden olabilmektedir.

Şekil 27'de CONEFALL (2003) yazılımı ile elde edilen enerji çizgi açısı zonları ile RocPro3D (2014) yazılımından elde edilen kaya düşme hatları karşılaştırılmıştır. Yapılan 3-boyutlu olasılıksal analizlerden elde edilen kaya düşme hatlarının maksimum 30°'lik enerji çizgi açısı zonuna kadar ulaştığı görülmektedir. Öte yandan, yamacın güney kesiminde yapılan blok ölçümlerinde, 3-boyutlu olasılıksal analiz sonuçları ile uyumlu olacak şekilde, daha önceden düşmüş olan blokların çoğunlukla daha geride olan 40°'lik zon içerisinde kaldığı göze çarpmaktadır.

### Sonuçlar

Günümüzde İHA'ların birçok alanda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte yüksek çözünürlüklü ortofotolar elde edilebilmekte ve bu ortofotolar üzerinde arazide ulaşılması zor kısımlarda var olan önceden düşmüş kaya blokları ayıklanabilmektedir. İHA'ların ve dolayısıyla elde edilen ortofotolardan fotogrametrik yöntemlerle üretilen nokta bulutlarının diğer bir avantajı da bu çalışmaya konu olan Soğanlı gibi dik bir kaynak zona sahip olan çalışma sahalarında, süreksizliklerin yönelimlerinin nokta bulutundan saptanabilmesidir. Yapılan bu çalışma kapsamında da İHA'lardan elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofotodan ve nokta bulutlarından yararlanılmıştır.

CONFALL yazılımı kullanılarak ampirik yöntemlerle yayılım zonları oluşturulmuştur. Ayrıca RocPro3D yazılımı kullanılarak olasılıksal analizler yapılarak kaya bloklarına ait düşme hatları, kinetik enerji ve sıçrama yükseklikleri belirlenmiştir. Bu amaçla 3-boyutlu model üzerinde kaynak zondan 75,000 adet kaya düşürülmüştür. Düşen blokların yamaç boyunca hareketi esnasında kinetik enerji değerleri maksimum 15,000 kJ, sıçrama yüksekliği ise 15 m olarak belirlenmiştir.



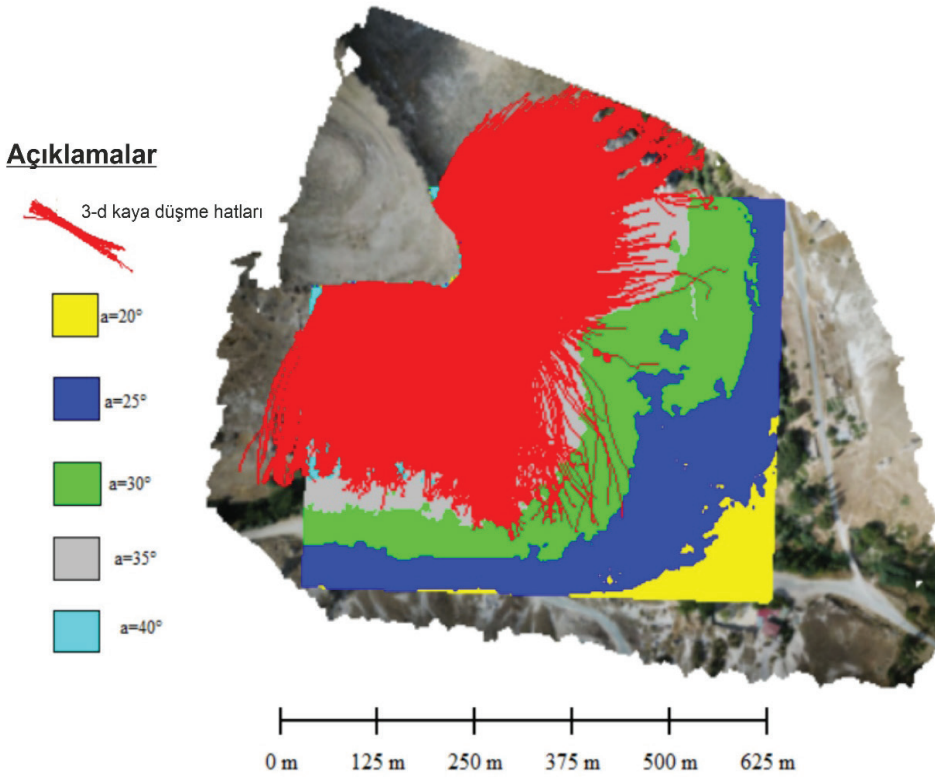
Şekil 26. 28 numaralı bloğun toplam kinetik enerji (a) ve sıçrama yüksekliği (b) değerlerinin yuvarlanma hattı boyunca değişimi.

Figure 26. Variation of total kinetic energy (a) and bounce height (b) values of block 28 along its trajectory.

Görgül yöntem ile 3-boyutlu modellemelerin karşılaştırıldığı bu çalışmada enerji çizgi açısı yöntemi ile farklı enerji açlarına göre kaya düşme zonları tespit edilmiştir. Enerji çizgi açısı yöntemi dikkate alındığında, incelenen yamacın güney kesiminde daha önceden düşen blokların çoğunlukla 40°'lik enerji çizgi açısı zonunda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, 3 m blok boyutu için yapılan olasılıksal

3-boyutlu kaya düşme analizlerinden elde edilen yuvarlanma hatları en fazla 30°'lik enerji çizgi açısı zonuna kadar ulaşsa da, özellikle yamacın güney kesiminde bu yuvarlanma hatları 40°'lik enerji çizgi açısı zonunda sonlanmaktadır. Buna göre, ampirik yöntem, 3-boyutlu olasılıksal yöntem ve arazide ölçülen blokların konumları genel olarak uyum göstermektedir.





Şekil 27. Ampirik yöntem ile farklı enerji çizgi açılarına göre belirlenen kaya düşme zonları ve 3-boyutlu analizlerden elde edilen kaya düşme hatları.

Figure 27. Rockfall zones determined according to different energy line angles using the empirical method and rockfall trajectories obtained from 3-dimensional analyses.

### Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 121C420 proje numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar, Kayseri İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'ne (AFAD) çalışmaya verdikleri destekten dolayı teşekkürlerini sunarlar. Yazarlar, hakemlere ve dergi editörlerine makaleyi geliştirici eleştirileri için teşekkürlerini sunarlar.

### Kaynaklar

Akın, M., Dinçer, I., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K., ve Topal, T. (2021). 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde TLS ve İHA ile Oluşturulan

Sayısal Yüzey Modellerinin Kullanımı. Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, 455-462.

Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Topal, T., İlgen, H. G., ve Demir, A. (2019). Kapadokya (Nevşehir) Bölgesindeki Kaya Düşmelerinin Arazi Lazer Taraması (TLS) Yardımıyla 3-Boyutlu (3-D) Analizi ve Kaya Düşme Tehlike Haritalarının Oluşturulması (1. bs, C. 1). AFAD.

Akın, M., Dinçer, I., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K., & Topal, T. (2021). Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. *Engineering Geology*, 283, 106001. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106001>

Varol, Akın, Orhan, Dinçer

- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A., ve Topal, T. (2019). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(2), 211-232. <https://doi.org/10.24232/jmd.655005>
- Akın, M., Topal, T., & Akın, M. K. (2014). The Rockfall Potential of the Southwestern Part of Kastamonu Castle (Turkey) Based on 2-D and 3-D Analyses. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 3: Targeted Landslides*, 123-127. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0_20)
- Atabey, E. (1989). MTA Genel Müdürlüğü, 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Kayseri H19 (K33) Paftası. MTA Genel Müdürlüğü.
- Baltzer, A. (1875). On a recent rockfall on Rossberg with a few observations on these phenomena in the Alps (ss. 914-924). *Neues Jahr-buch fur Mineralogie, Geologie und Palaeontologie*.
- Binal, A., & Ercanoğlu, M. (2010). Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) geopark region. *Environmental Earth Sciences*, 61(7), 1361-1373. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0454-1>
- Bozzolo, D., & Pamini, R. (1986). Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63(1), 113-130.
- Copons, R., Vilaplana, J. M., & Linares, R. (2009). Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Solà d'Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(6), 2107-2118. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2107-200>
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(4), 583-598. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-583-2004>
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatların Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82(2), 1075-1098. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2234-z>
- Dorren, L., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M., & Wehrli, A. (2007). State of the art in rockfall-forest interactions. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen*, 158(6), 128-141. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128>
- Fanos, A. M., & Pradhan, B. (2019). A novel rockfall hazard assessment using laser scanning data and 3D modelling in GIS. *Catena*, 172, 435-450. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.012>
- Ghani, M. F. A., Simon, N., Mohamed, T. R. T., & Roslee, R. (2022). 3D Modelling of Rockfall Hazard at Gunung Lang, Ipoh. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1103(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1103/1/012028>
- Gökçe, O., Özden, Ş., & Demir, A. (2008). Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1079-1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und menschenleben*. Fretz & Wasmuth.
- Hepdeniz, K. (2019). Eğirdir İlçesi (Isparta) İçin Kaya Düşmesi Duyarlılık Bölgelerinin Haritalandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, Article 15. <https://doi.org/10.31590/ejosat.523612>
- ISRM, E. (1981). Rock characterization, testing and monitoring—ISRM suggested methods. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses (ss. 3-52). Pergamon Oxford.
- Kalender, A., ve Sönmez, H. (2019). Kargabedir Tepe (Ankara-Eskişehir Karayolu) Bölgesinin Kaya Düşmesi Duyarlılığının İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntüleri Kullanılarak Konik Yayılım Yaklaşımıyla Değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(2), Article 2. <https://doi.org/10.24232/jmd.654900>

- Kaya, Y., & Topal, T. (2015). Evaluation of rock slope stability for a touristic coastal area near Kusadasi, Aydın (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 74(5), 4187-4199. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4473-9>
- Kreimer, A., & Arnold, M. (2000). *Managing disaster risk in emerging economies (C. 2)*. World Bank Publications.
- Larcher, V., Simoni, S., Pasquazzo, R., Strada, C., Zampedri, G., & Berger, F. (2012). WP6 guidelines Rockfall and Forecast systems. *PARAMount & Alpine Space, Italy & Grance*, 84.
- Marija, L., Martin, Z., Jordan, A., & Matthew, P. (2022). Rockfall susceptibility and runout in the Valley of the Kings. *Natural Hazards*, 110(1), 451-485. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04954-9>
- Mutlu, S., Cindioğlu, İ., ve Selçuk, A. S. (2022). Van İli Kaya Düşmesi Duyarlılık Haritasının Oluşturulması ve Afetsellik Açısından Değerlendirilmesi. *Afet ve Risk Dergisi*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.35341/afet.1068650>
- 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*, 25(3), 1205-1222. <https://doi.org/10.17482/uumfd.769109>
- Quanterra. (2003). Conefall (v.1.0). Quanterra. [www.quanterra.org](http://www.quanterra.org)
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway research record*, 17.
- RocPro3D. (2014). RocPro3D software. [http://www.rocpro3d.com/rocpro3d\\_en.php](http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php).
- Rocscience Inc. (2020). *Graphical and statistical analysis of orientation data (v.8.009)*.
- San, N. E., Topal, T., & Akin, M. K. (2020). Rockfall hazard assessment around Ankara Citadel (Turkey) using rockfall analyses and hazard rating system. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 3831-3851. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01261-1>
- 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. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.501482>
- Topal, T., Akin, M. K., & Akin, M. (2012). Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural hazards*, 62, 255-274. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9995-1>
- Topal, T., Akin, M., & Ozden, A. U. (2006). Analysis and evaluation of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Proceedings of the 10th international congress IAEG*.
- Topal, T., Akin, M., & Ozden, U. A. (2007). Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environmental Geology*, 53(1), 191-200. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0633-2>
- Tunusluoglu, M. C., & Zorlu, K. (2009). Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental geology*, 56(5), 963-972. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1198-z>
- Turner, & Schuster, R. L. (2012). *Rockfall Characterization and Control*, Transportation Research Board. Washington D.C.: National Academy of Sciences.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z. A., & Kasmer, O. (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(4), 473-494. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0222-4>
- Ulusay, R., & Hudson, J. A. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Ulusay, R., ve Sönmez, H. (2007). Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş ve Genişletilmiş*.

Varol, Akın, Orhan, Dinçer

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

Volkwein, A., Labiouse, V., & Schellenberg, K. (2011). Summary on the NHESS Special Issue "Rockfall protection—from hazard identification to mitigation measures". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(10), 2727-2728. <https://doi:10.5194/nhess-11-2727-2011>

Wyllie, D. C. (2014). *Rock fall engineering*. CRC Press.