4. Ulusal
Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu

14 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

GGM4

KAYA DÜŞMESİ TEHLİKESİNİN İKİ BOYUTLU SAYISAL ANALİZİ VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

TWO-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF ROCKFALL HAZARD AND RISK ASSESSMENT

Uğur KARADAĞ[1], Mert Can ÖZTÜRK[2], Bekir Tuna KAYAALP[3], Resul ÇÖMERT[4], Burak EVİRGEN[5]

ÖZET

Kaya düşmesi olayları, sarp topoğrafyaya sahip bölgelerde yerleşim alanları ve ulaşım ağları üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, belirlenen inceleme alanındaki kaya düşmesi tehlikesi, İHA tabanlı fotogrametrik veriler ve iki boyutlu (2D) sayısal analiz yöntemleri bütünleştirilerek kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve risk değerlendirmesi yapılmıştır. Öncelikle saha gözlemleri, literatür taraması ve İHA verileri kullanılarak sahayı yüksek hassasiyetle temsil eden sayısal arazi modeli üretilmiştir. Elde edilen model üzerinden RocFall 2D yazılımıyla farklı kütle sınıflarına sahip kaya blokları için düşme yörüngesi, sıçrama yüksekliği, kinetik enerji ve durma noktası analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları; şev geometrisi ve yüzey pürüzlülüğünün kaya düşmesi dinamikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, blok kütlesinin artmasıyla birlikte kinetik enerjinin ciddi seviyede yükseldiğini göstermiştir. Durma noktası değerlendirmeleri ise kaya bloklarının büyük çoğunluğunun hendek içerisinde durduğunu ve hiçbir bloğun karayolu platformunu aşmadığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, bölgedeki kaya düşmesi tehlikesinin nicel olarak belirlenmesi ve gerekli mühendislik önlemlerinin planlanması açısından önemli bir altyapı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Sayısal Modelleme, Risk Değerlendirmesi

ABSTRACT

Rockfall incidents pose a significant threat to residential areas and transportation networks in regions characterized by steep topography. In this study, the rockfall hazard in the designated study area was comprehensively investigated by integrating UAV-based photogrammetric data with two-dimensional (2D) numerical analysis methods, and a risk assessment was conducted based on the findings. Initially, a high-resolution digital terrain model accurately representing the site was generated using field observations, a literature review, and UAV data. Using the generated model, rockfall trajectories, bounce heights, kinetic energy distributions, and end locations were simulated for different mass categories using RocFall 2D software. Analysis results showed that slope geometry and surface roughness have a serious effect on rockfall dynamics, while kinetic energy increases drastically with increasing block mass levels. Estimations on an end location limit indicated that the vast majority of rock blocks stopped within the catchment ditch and no block exceeded the roadway platform. The findings obtained from this study provide a fundamental framework for evaluating rockfall hazards in the region and planning necessary engineering measures.

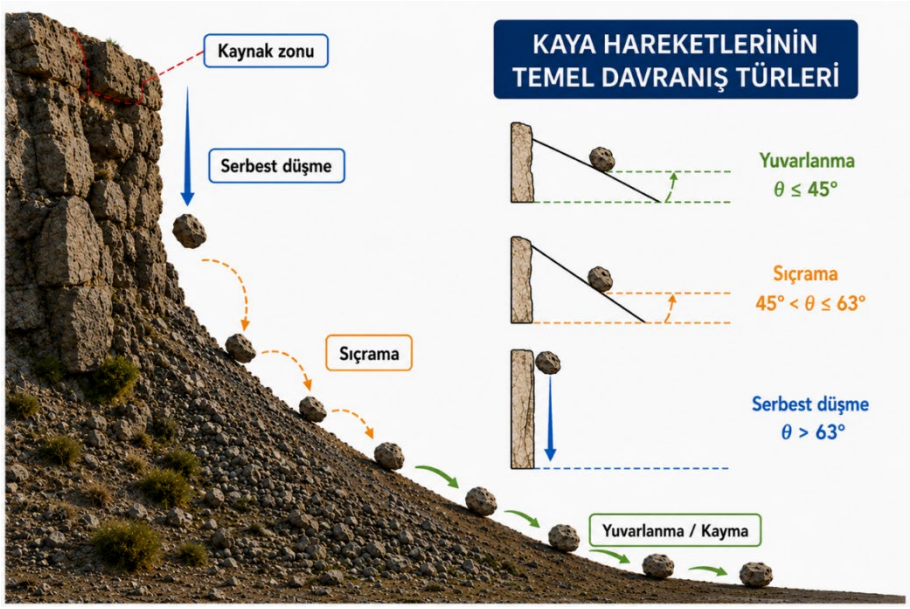
Keywords: Rockfall, Numerical Modelling, Risk Assessment

[1]Yüksek Lisans Öğrencisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, ugurkaradag@ogr.eskisehir.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2]Arş. Gör., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, mertcan.ozturk@ibu.edu.tr
[3]Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, btk@eskisehir.edu.tr
[4]Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, rcomert@eskisehir.edu.tr
[5]Doç. Dr., Eskişehir Teknik Üniversitesi, burakevirgen@eskisehir.edu.tr

1. GİRİŞ

Dik şevler ve sarp topoğrafyaya sahip dağlık araziler, ulaştırma koridorları ve yerleşim alanları için her zaman ciddi jeolojik ve geoteknik riskler barındırmaktadır. Bu risklerin başında gelen kaya düşmesi olayları, yüksek hıza ve ani etki mekanizmasına sahip olmaları nedeniyle can ve mal güvenliğini doğrudan tehdit etmektedir. Türkiye'nin aktif morfolojik yapıya sahip bölgelerinde ve özellikle sarp yamaçların karayolu hatlarıyla kesiştiği güzergahlarda kaya düşmesi tehlikesinin doğru analiz edilmesi, sürdürülebilir afet yönetimi ve mühendislik çözümleri için kritik öneme sahiptir.

Mekanik bir süreç olan kaya düşmesi, ana kayadan ayrılan blokların yerçekimi etkisiyle hızla alt kotlara yönelmesi olarak tanımlanır (Varnes, 1978). Bu sürecin kinematik karakteri; litoloji, yamaç pürüzlülüğü, bitkilendirme ve donma-çözülme gibi çok değişkenli parametrelerce kontrol edilir (Buz, 2019). Kopan bloklar yamaç eğimine bağlı olarak devrilme, kayma, yuvarlanma, sıçrama ve serbest düşme davranışları sergiler (Erismann ve Abele, 2001). Genel yaklaşımlarda, 45°'ye kadar yuvarlanma, 46°-63° aralığında sıçrama mekanizması baskınken, 63° üzerinde tamamen serbest düşme kinetiği gözlenir (Utlu vd., 2021). Bu davranış türleri ve yamaç morfolojisi arasındaki ilişkiler Şekil 1'de şematize edilmiştir. Blok geometrisi ve kütle boyutları da hareketin kayma veya parçalanma yönünde evrilmesinde etkilidir.

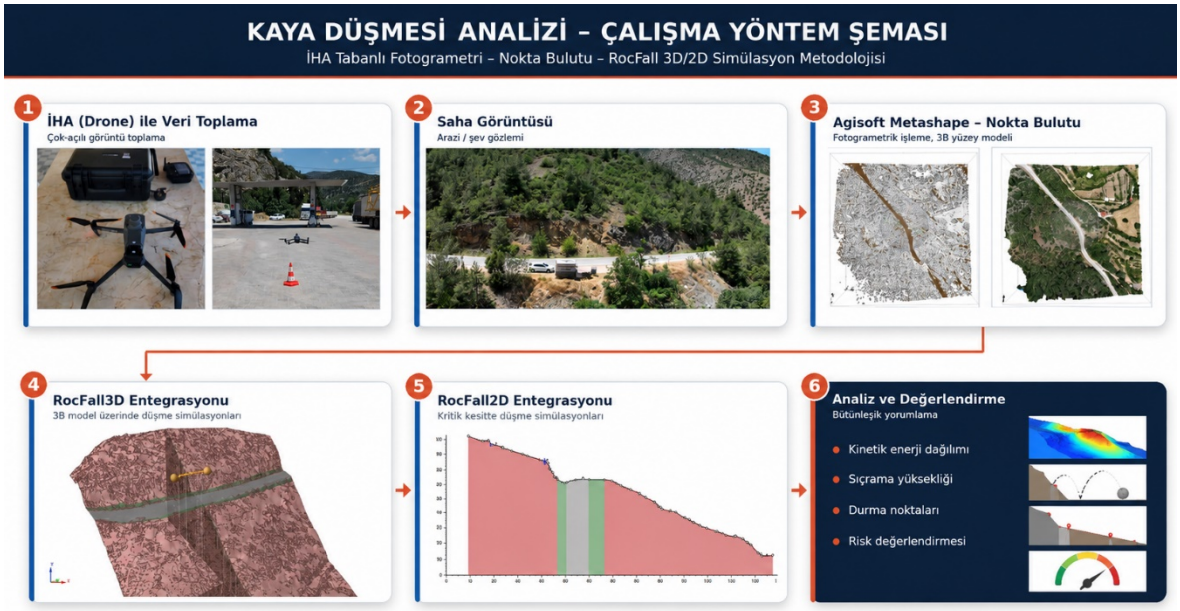


Şekil 1. Bir yamaç profili üzerinde kaya hareketlerinin temel davranış türleri ve eğim açılarına bağlı mekanizmaları (Utlu vd., 2021'den uyarlanmıştır)

İnsansız hava araçları (İHA), mühendislik jeolojisi ve geoteknik mühendisliği çalışmalarında yüksek çözünürlüklü arazi verilerinin hızlı, ekonomik ve güvenilir şekilde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Geleneksel arazi ölçüm yöntemlerine kıyasla daha kısa sürede geniş alanların modellenebilmesi, özellikle ulaşılması güç kaya şevlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. İHA ile elde edilen bindirmeli hava fotoğrafları, fotogrametrik yazılımlar yardımıyla işlenerek sayısal yüzey modelleri ve üç boyutlu nokta bulutları üretilebilmektedir (Westoby vd., 2012; James ve Robson, 2012). Bu çalışma kapsamında, Eskişehir ili Sarıcakaya ilçesi Dağküplü Mahallesi sınırları içerisinde bulunan ve sarp topoğrafyası ile kaya kütlesindeki yapısal süreksizlikler nedeniyle kaya düşmesi potansiyeli taşıyan yamaçlar çalışma alanı olarak seçilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, kaya düşmesi tehlikesinin ve riskinin belirlenmesi amacıyla İHA tabanlı fotogrametri ile sayısal simülasyon tekniklerini bütünleştiren çok aşamalı bir metodoloji izlenmiştir (Şekil 2). İlk aşamada, inceleme alanında İHA ile çok açılı yüksek çözünürlüklü saha görüntüleri toplanmış ve arazi/şev gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hava fotoğrafları "Agisoft Metashape" yazılımında fotogrametrik veri işleme süreçlerine tabi tutularak sahayı yüksek hassasiyetle temsil eden nokta bulutu ve 3 boyutlu (3B) yüzey modeli üretilmiştir. Hazırlanan 3B dijital arazi modeli "RocFall 3D" yazılımına aktarılarak topoğrafya üzerinde üç boyutlu kaya düşme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ardından sahadaki en kritik şev hattını temsil eden kesitler belirlenmiş ve bu doğrultuda "RocFall 2D" ortamında iki boyutlu detaylı düşme analizi simülasyonları oluşturulmuştur. Son aşamada ise simülasyon çıktılarından elde edilen kinetik enerji dağılımları, sıçrama yükseklikleri ve blokların durma noktaları bütünleşik olarak değerlendirilerek saha için risk değerlendirmesi tamamlanmıştır.

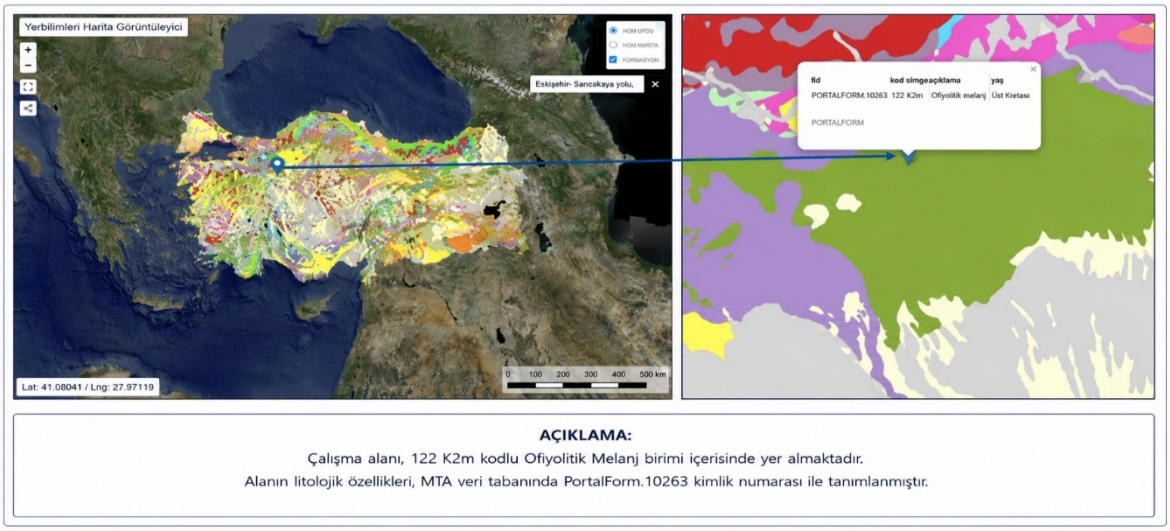


Şekil 2. Kaya düşmesi analizi çalışma yöntem şeması

2.1. İnceleme Alanının Litolojik Yapısı

İnceleme alanı, Eskişehir ili Sarıcakaya ilçesi, Dağküplü mevkii sınırları içerisinde yer almaktadır (39.984999° K, 30.683210° D; UTM WGS84 Zone 36N: 302181 D, 4428675 K). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) 1/25.000 ölçekli sayısal jeoloji haritası verilerine göre, çalışma sahası Üst Kretase yaşlı Ofiyolitik Melanj birimi (harita kodu: K2m / 122 K2m) içerisinde bulunmaktadır (MTA, 2026) (Şekil 3). Bölge, tektonik olarak İzmir-Ankara-Erzincan sütur zonu üzerinde konumlanmakta olup, sahaya yakın Mayıslar (Sarıcakaya-Eskişehir) bölgesinde yapılan çalışmalarda, bu tektonik kuşağa ait Kretase yaşlı ofiyolitik birimin "Dağküplü Melanjı" olarak adlandırıldığı ve söz konusu melanjın Dağküplü peridotiti, Dağküplü gabrosu ile Dağküplü melanjı (dar anlamda) alt birimlerinden oluştuğu belirtilmektedir (Parlak ve Sayılı, 2012). Aynı çalışmada, bölgeye tektonik dokanakla yerleşmiş bu ultramafik-mafik kayaçların yanı sıra, çevrede Eosen yaşlı Meyildere Volkanitlerine ait andezitik kayaçların da yüzeylendiği rapor edilmektedir.

Bölgesel ölçekte, sahanın kuzeyinde yer alan Sarıcakaya Granitoyidi'ne ait gabro, granodiyorit ve diyoritik bileşimli plütonik kayaçların da haritalandığı, bu birimlerin ana mineralojik bileşiminin plajiyoklaz, ortoklaz, kuvars, biyotit ve ikincil olarak granat, muskovit ve epidot minerallerinden oluştuğu bildirilmiştir (Güllü ve Bilgilioğlu, 2023). Bu granitoyidik kütlenin ofiyolitik melanj birimiyle olan dokanak ilişkisi, bölgenin karmaşık tektono-magmatik evrimini yansıtmaktadır.



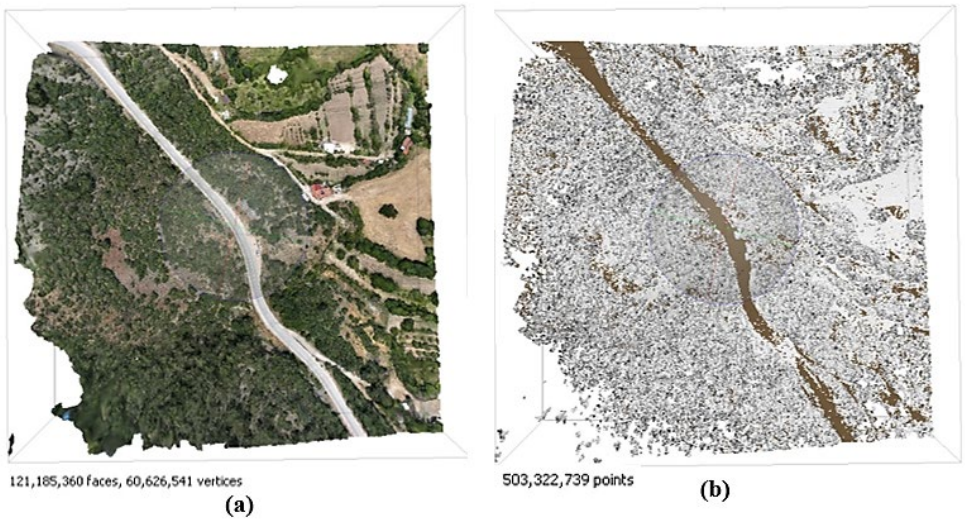
Şekil 3. Çalışma alanının Yerbilimleri (MTA) veri tabanı üzerindeki konumu ve jeoloji haritası (MTA, 2026).

2.2. İHA Verilerinin Elde Edilmesi ve Fotogrametrik Modelleme

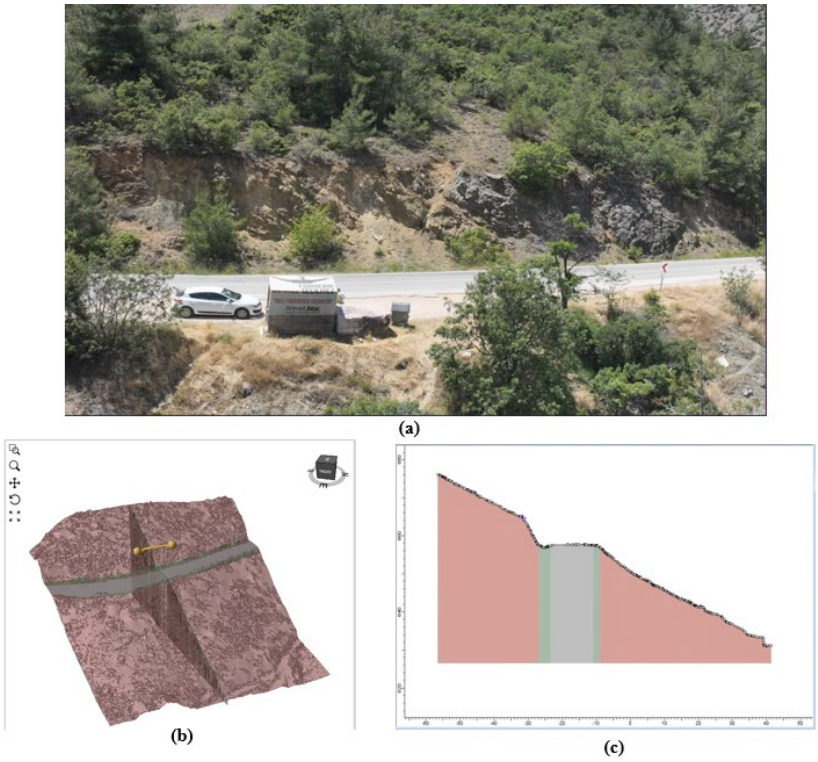
Sarıcakaya ilçesi Dağküplü Mahallesi sahasındaki dik kaya yamaçları, otonom uçuş kurgulanmış bir İHA vasıtasıyla 100 m irtifadan, 3,0 cm/pix çözünürlükte taranarak yüksek çözünürlüklü 670 adet hava fotoğrafı elde edilmiştir. Veriler, fotogrametrik veri işleme yazılımına aktarılarak işlenmiştir. Görüntü hizalama aşamasında 667 fotoğraf başarıyla çakıştırılarak 1.369.339 bağlama noktası (tie point) üretilmiştir. "Ultra High" kalite ve "Aggressive" filtreleme ayarlarında yapılan işlemler sonucunda yaklaşık 503,3 milyon (503.322.739) noktadan oluşan yüksek yoğunluklu bir nokta bulutu ve ardından 121,1 milyon (121.185.360) yüzeyli 3B ana ağ modeli oluşturulmuştur. Simülasyon sürecinde RocFall 3D yazılımının işlemci/grafik yükünü optimize etmek amacıyla, şev geometrisini koruyan 983.878 yüzeyli basitleştirilmiş 3B model üretilmiş ve kaya düşmesi analizlerinde ana topoğrafik veri altlığı olarak kullanılmıştır (Şekil 4).

2.3. Şev Kesitlerinin Oluşturulması

İnceleme sahasındaki kaya düşmesi tehlikesini bütünleşik bir yaklaşımla değerlendirmek amacıyla, öncelikle sahanın mevcut yamaç morfolojisi ve yapısal unsurları yerinde incelenmiştir (Şekil 5a). Ardından “Agisoft Metashape” yazılımında üretilen 3B mesh yüzey modeli “RocFall 3D” ortamına aktarılarak alanın tamamını kapsayan üç boyutlu ön düşme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu 3B simülasyonlar sayesinde kaya bloklarının şev üzerindeki olası saçılım hatları, yığılma bölgeleri ve en yüksek kinetik enerjiye ulaştığı rotalar belirlenmiştir. Kullanılan yazılımlarının entegre çalışma mimarisinden yararlanılarak, 3B model üzerinde tespit edilen en kritik düşme hattı boyunca kesit düzlemi tanımlanmıştır (Şekil 5b). Belirlenen bu hat üzerinden alınan vektörel kesit, yüksek çözünürlükle doğrudan “RocFall 2D” ortamına aktarılmıştır (Şekil 5c).



Şekil 4. Agisoft Metashape ortamında üretilen fotogrametrik modeller: (a) Alanın genel topoğrafyasını ve bitki örtüsünü içeren 121,1 milyon yüzeyli 3B dokulu mesh modeli, (b) Bitki örtüsünden arındırılarak sadece anakaya ve zemin yüzeyini temsil eden 503,3 milyon noktalı sınıflandırılmış (Ground Class) yoğun nokta bulutu.



Şekil 5. Saha şev geometrisi ve 3B-2B kesit entegrasyonu: (a) Dağküplü Mahallesi sahasındaki kaya yamacının genel saha görünümü, (b) RocFall 3D ortamında tanımlanan kritik kesit düzlemi, (c) RocFall 3D'den RocFall 2D ortamına aktarılan ve materyal alanları tanımlanmış 2B şev kesiti.

2.4. Kaya Düşmesi Analizi ve Malzeme Parametreleri

"RocFall2D" ve "RocFall3D" yazılımlarında gerçekleştirilen analizlerde, düşme ihtimali bulunan kaya bloklarının hassas geometri ve boyutları önceden bilinemediği için Lumped

Mass (Yığılı Kütle) yaklaşımı tercih edilmiştir. Bu yaklaşımda kaya, boyutu dikkate alınmayan küçük bir noktasal parçacık olarak modellenmekte, kütle yalnızca kinetik enerji hesabında kullanılmaktadır (Stevens, 1998; Dorren, 2003). Saha koşullarındaki parametrik belirsizlikleri ve doğadaki rastlantısal değişkenliği modele yansıtabilmek amacıyla "Monte Carlo" simülasyon tekniği uygulanmış; R_n ve R_t katsayıları sabit değerler yerine normal dağılım (ortalama ± standart sapma) olarak tanımlanmıştır (Guzzetti vd., 2002; Stevens, 1998).

Simülasyonlarda blokların şev üzerindeki başlangıç konumlarından yerçekimi etkisiyle harekete geçeceği kabul edilmiştir. Bu kapsamda blokların başlangıç doğrusal hız bileşenleri (v_x, v_y) ve açısal hızı (ω) sıfır (0) alınmıştır. Bu kabul, sahada gözlemlenen kopma mekanizmasının ani bir tetikleyici kuvvet (patlama, deprem ivmesi, insan/ekipman müdahalesi vb.) içermediği, bloğun ayrışma/gevşeme sonucu kendi ağırlığı altında hareketlendiği senaryoyu temsil etmektedir.

Kaya kütlesinin kinetik enerji, sıçrama yüksekliği ve durma mesafeleri üzerindeki ölçek etkisini değerlendirmek amacıyla, şev tepe noktasına tanımlanan fırlatma çizgisinden 10 kg, 120 kg ve 500 kg olmak üzere üç farklı kütle grubu tanımlanmış ve bu grupları temsil eden toplam 1000 adet kaya bloğu serbest düşmeye bırakılmıştır. Kaya birim hacim ağırlığı, saha örneklemelerine uygun olarak 2600 kg/m³ (26 kN/m³) alınmıştır.

Şev yüzeyi ile düşen bloklar arasındaki enerji kayıplarını karakterize eden normal restitüsyon katsayısı (R_n) değerleri Rocscience RocFall malzeme kütüphanesinden seçilmiş olup, Project Settings altında yer alan R_n'nin hız veya kütle ile ölçeklendirilmesi (scaling) seçenekleri aktif edilmemiştir. Bu tercih doğrultusunda, kütüphane değerleri analiz boyunca sabit tutulmuş; özellikle geri analiz verisinin bulunmadığı bu aşamada, blokların durma mesafeleri açısından mühendislik bakımından güvenli tarafta (muhafazakâr) kalınması sağlanmıştır.

Saha profili; Dağküplü Melanjı (anakaya şev yüzeyi), hendek/talus alanı ve asfalt yol kaplaması olmak üzere üç farklı materyal bölgesine ayrılmıştır. Yüzeydeki teğetsel enerji kayıplarını tanımlayan teğetsel restitüsyon katsayısı (R_t), kayanın şev yüzeyine temas anındaki teğetsel hızı (v_{ti}) ile çarpma sonrasındaki teğetsel hızı (v_{tf}) arasındaki oran esas alınarak,

$$R_t = v_{tf} / v_{ti} \quad (1)$$

bağıntısıyla tanımlanmaktadır (Dorren, 2003; Uykun vd., 2025). Sürtünme açısı ise ayrıca elle girilmemiş, RocFall'ın "Lumped Mass" motorunda sunulan "R_t'den hesapla" seçeneğiyle,

$$\varphi = \arctan[(1 - R_t) / R_t] \quad (2)$$

bağıntısı kullanılarak Rt değerinden otomatik olarak türetilmiştir (Rocscience, 2025). Bu nedenle sürtünme açısı bağımsız bir girdi değil, R_n ve R_t ile tutarlı, yazılımca hesaplanan bir çıktı niteliğindedir. Simülasyonlarda kullanılan R_n, R_t ve düşen kaya ile temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme açısını ifade eden parametreler, saha pürüzlülük gözlemleriyle eşleştirilerek doğrudan "Rocscience RocFall" Malzeme Kütüphanesi'nden temin edilmiş (Rocscience, 2025) ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Analizde kullanılan malzeme parametreleri

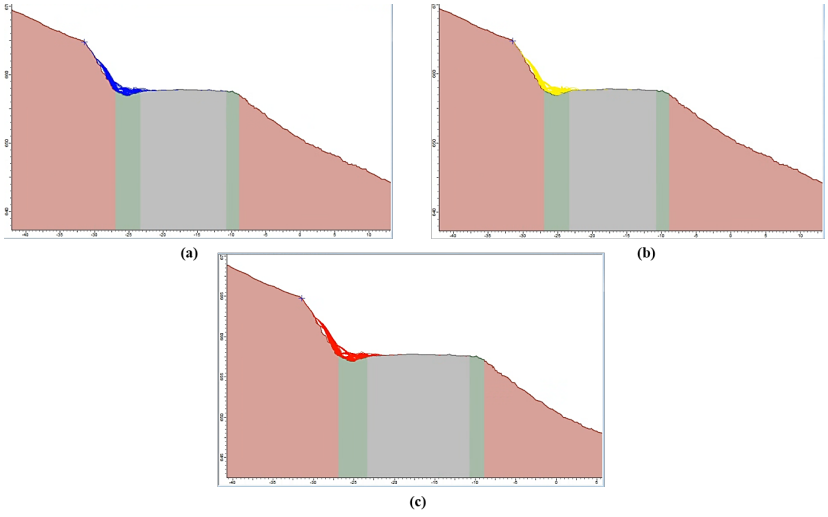
Zemin / Şev Malzemesi	Normal Restitüsyon (R_n)	Teğetsel Restitüsyon (R_t)	Dinamik Sürtünme Açısı (°)	Açıklama
Anakaya (Dağküplü Melanjı)	0.35 ± 0.04	0.85 ± 0.04	10.01	Kırıklı / ayrışmış anakaya yüzeyi
Hendek / Talus	0.30 ± 0.06	0.80 ± 0.06	14.04	Gevşek zemin ve örtü tabakası
Asfalt Yol	0.40 ± 0.04	0.90 ± 0.04	6.34	Rijit kaplama yüzeyi

3. ELDE EDİLEN BULGULAR

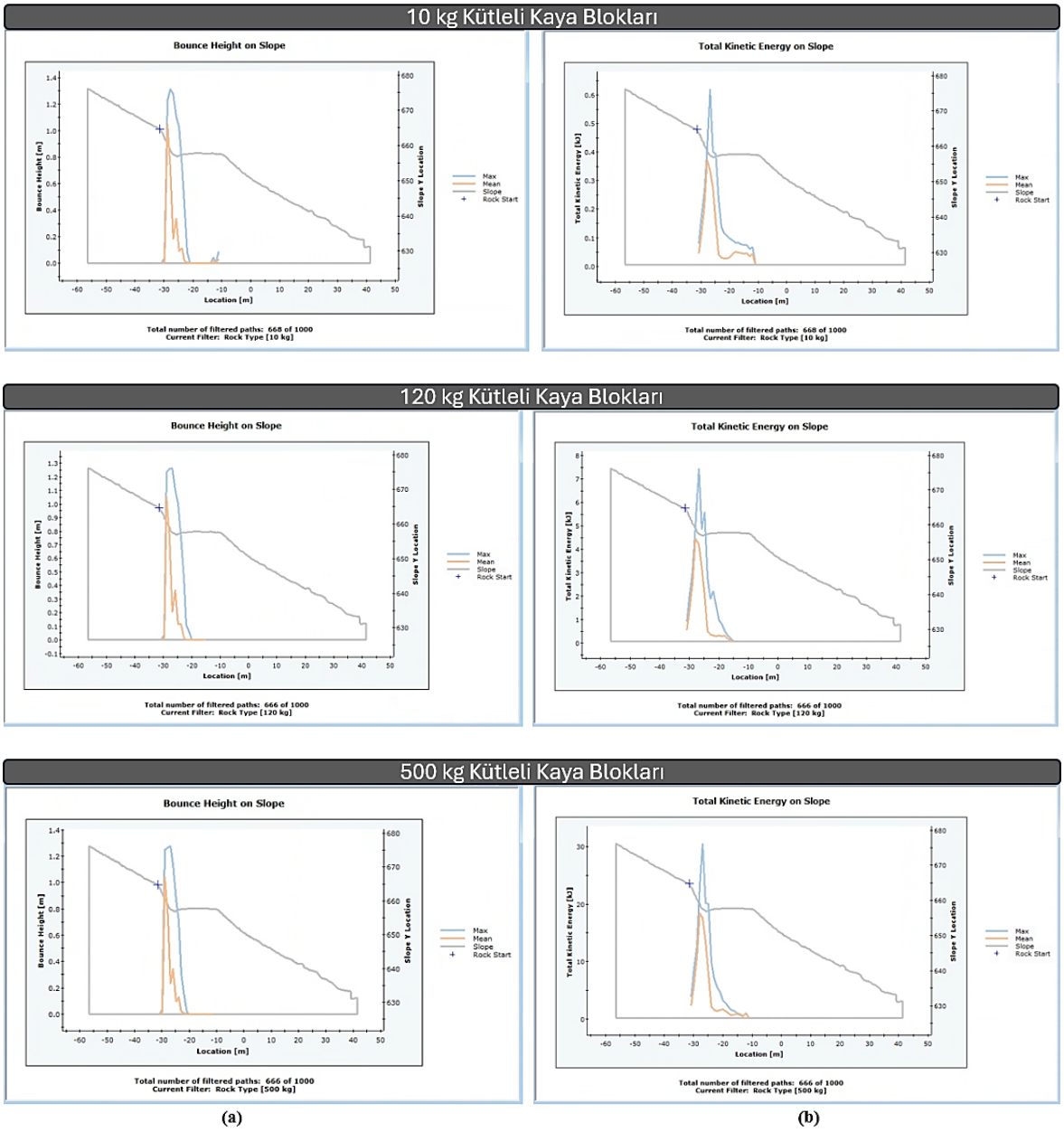
3.1. Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında kaya düşmesi davranışının farklı blok kütleleri altında değişimini incelemek amacıyla 10 kg, 120 kg ve 500 kg kütleye sahip kaya blokları için "RocFall 2D" analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaya kütleleri için toplamda 1000 adet "Monte Carlo" simülasyonu oluşturulmuş ve kaya bloklarının senaryosu için düşme yörüngeleri (trajectory), toplam kinetik enerji (total kinetic energy), sıçrama yüksekliği (bounce height) ve durma noktaları (end location) değerleri ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 6'daki analiz çıktılarında şev kesiti altında yeşil bantlarla gösterilen kesimler koruma/tutma yapısını temsil eden hendek, gri bantla gösterilen orta kesim ise karayoludur.

Her üç kütle senaryosunda da kaya blokları, şevin üst kısmındaki dik eğimli bölümde ivmelenmekte, eğimin azaldığı geçiş noktasında (yaklaşık -30 m ile -20 m arası) maksimum kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği değerlerine ulaşmakta, ardından hendek içerisinde enerjisini kaybederek durmaktadır. Kütle arttıkça mutlak kinetik enerji değerleri belirgin biçimde artmakta, buna karşın sıçrama yüksekliği değerlerinde kütleden bağımsız olarak benzer bir davranış gözlenmektedir. Bu durum, sıçrama yüksekliğinin öncelikle şev geometrisi ve blok ile zemin arasındaki temas mekaniğinden (restitüsyon katsayıları), kinetik enerjinin ise doğrudan kütleden etkilendiğini ortaya koymaktadır. "RocFall 2D" analizleri sonucunda 10 kg, 120 kg ve 500 kg kütleli kaya blokları için elde edilen yörünge sonuçları Şekil 6'da, sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Farklı kütleli kaya bloklarına ait RocFall 2D yörünge (trajectory) analiz sonuçları: (**a**) 10 kg, (**b**) 120 kg ve (**c**) 500 kg.



Şekil 7. Farklı kütle senaryolarına (10 kg, 120 kg, 500 kg) ait 2D kaya düşmesi analiz sonuçları: a) Sıçrama yüksekliği, b) Toplam kinetik enerji.

3.2. Yörünge Değerlendirmesi

Yörünge analizleri incelendiğinde, 10 kg, 120 kg ve 500 kg kütleli kaya bloklarının genel hareket karakteristiğinin benzer olduğu görülmektedir (Şekil 6). 10 kg kütleli bloklarda yörüngeler üst şev kesiminde daha geniş bir saçılım gösterirken (Şekil 6a), kütlenin artmasıyla birlikte yörüngelerin daha dar bir bantta yoğunlaştığı gözlenmiştir (Şekil 6b ve 6c). Tüm senaryolarda bloklar şev kırılma noktasından sonra hendek bölgesine ulaşmış, enerjilerini kaybederek sönümlenmiş ve burada durmuştur. Özellikle 120 kg ve 500 kg kütleli blokların sıçrama ve yuvarlanma hareketini sürdüren bir bölümü, artan momentum etkisiyle karayolu platformuna kadar ilerlemiş, ancak hiçbir blok karayolunu aşarak alt şev

kesimine ulaşmamıştır. Bu sonuçlar, mevcut şev geometrisi ve hendek tasarımının farklı kütlelerdeki kaya bloklarının hareketini sınırlandırmada etkili olduğunu göstermektedir.

3.3. Kinetik Enerji Değerlendirmesi

Kinetik enerji grafikleri, beklendiği üzere kütle ile doğru orantılı bir artış eğilimi göstermektedir:

- 10 kg senaryosunda maksimum kinetik enerji yaklaşık 0,6 kJ, ortalama değer ise yaklaşık 0,4 kJ seviyesinde hesaplanmıştır.
- 120 kg senaryosunda maksimum kinetik enerji yaklaşık 7,3 kJ, ortalama değer ise yaklaşık 4,3 kJ olarak elde edilmiştir.
- 500 kg senaryosunda maksimum kinetik enerji yaklaşık 30 kJ, ortalama değer ise yaklaşık 19 kJ seviyesine ulaşmaktadır.

Her üç senaryoda da maksimum kinetik enerji değerine, şev eğiminin kırıldığı geçiş bölgesinde (yaklaşık -30 m ile -25 m arası) ulaşılmakta, blok ara sekiye girdikten sonra enerji hızla azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Bu bulgu, enerji sönümlenmesinin büyük ölçüde ara sekide gerçekleştiğini ve hendek bölgesinin enerji sönümleyici işlevini yerine getirdiğini göstermektedir. Kütle arttıkça enerji değerlerindeki artışın doğrusal olmaktan ziyade kütle ile birlikte hız bileşenindeki değişimden de etkilenerek daha belirgin hale geldiği, dolayısıyla büyük blokların (500 kg) tutma yapıları ve koruma önlemleri üzerinde çok daha yüksek bir darbe/enerji yükü oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

3.4. Sıçrama Yüksekliği Değerlendirmesi

Sıçrama yüksekliği (bounce height) sonuçları incelendiğinde, üç senaryo için de birbirine oldukça yakın maksimum değerler elde edilmiştir:

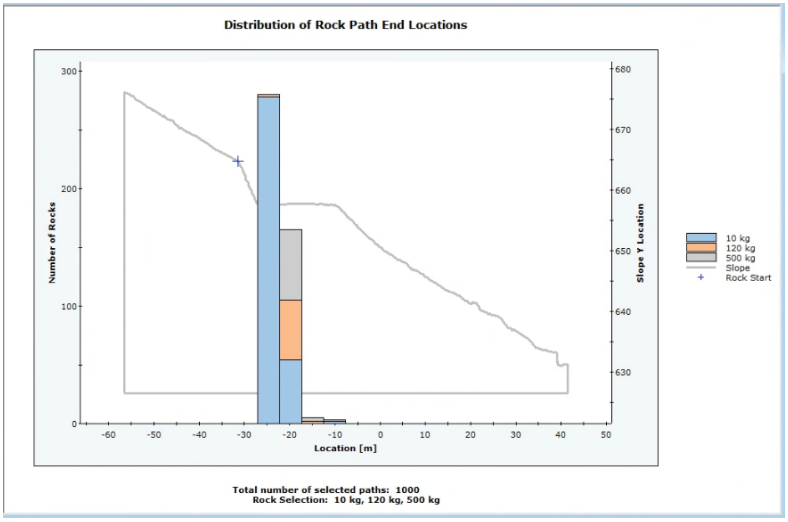
- 10 kg senaryosunda maksimum sıçrama yüksekliği yaklaşık 1,3-1,4 m,
- 120 kg senaryosunda maksimum sıçrama yüksekliği yaklaşık 1,25-1,3 m,
- 500 kg senaryosunda maksimum sıçrama yüksekliği yaklaşık 1,3 m olarak hesaplanmıştır.

Bu benzerlik, sıçrama yüksekliğinin kütleden ziyade şev eğim değişimi, zemin/kaya yüzey pürüzlülüğü ve restitüsyon katsayıları gibi geometrik ve mekanik parametrelere bağlı olduğunu doğrulamaktadır. Maksimum sıçrama değerlerine, kinetik enerjide olduğu gibi, şevin eğim kırılma noktasına yakın bölgede (yaklaşık -30 m ile -25 m arası) ulaşılmakta; bloklar ara sekiye girdikten sonra sıçrama yüksekliği hızla azalarak pratik olarak sıfıra inmektedir. Bu durum, 1,0-1,5 m yükseklik aralığında sıçrama kapasitesine sahip blokları durdurabilecek bariyer/tutma yapılarının tasarımında, minimum bariyer yüksekliğinin bu değerler dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.5. Durma Noktası Değerlendirmesi

Üç farklı kaya kütlesi için elde edilen durma noktalarının dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Yapılan toplam 1000 adet simülasyon sonucunda elde edilen histogram sonuçlarına göre kaya bloklarının 854 adedinin (%85,4'ü) dik şevden ayrıldıktan sonra birincil sönümleme alanı olan hendek içerisinde (yaklaşık x = -27 m ile -22 m arasında) durmuştur. Bu durum,

hendeğin kaya bloklarının hareket enerjisini etkin bir şekilde sönümleyerek birincil tutucu yapı olarak görev yaptığını göstermektedir. Artan momentumun etkisiyle durma mesafelerinde gözlenen sınırlı uzama neticesinde, blokların geriye kalan 146 adedinin (%14,6) hendeği aşarak karayolu platformu (yaklaşık x = -22 m ile -10 m aralığı) üzerine ulaşmıştır. Ancak bu bloklar da kısa mesafede enerjilerini kaybederek yol platformu üzerinde durmuş ve yerleşim bölgesine doğru hareketlerine devam edememiştir. Analiz sonuçları, hiçbir kaya bloğunun karayolu platformunu tamamen geçerek alt şeve ulaşmadığını göstermektedir. Bu durum, tasarlanan hendek geometrisinin farklı kütlelere sahip kaya bloklarının büyük bölümünü hendek içerisinde durdurduğunu, hendeği aşabilen sınırlı sayıdaki blokların ise yol platformunda durarak daha ileriye ilerlemesini engellediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Farklı kaya bloku kütlelerine ait durma noktalarının histogramı.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Eskişehir ili Sarıcakaya ilçesi Dağküplü Mahallesi'nde kaya düşmesi potansiyeli taşıyan bir yamaç, İHA tabanlı fotogrametrik veriler ile "RocFall 3D" ve "RocFall 2D" analizlerinin birlikte kullanıldığı bütünleşik bir yöntemle değerlendirilmiştir. İHA görüntülerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü sayısal arazi modeli sayesinde kritik düşme hattı belirlenmiş ve farklı kaya blok kütleleri için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Farklı kütleli kaya blokları için yapılan Monte Carlo tabanlı analizler sonucunda, blok kütlesinin artmasıyla birlikte kinetik enerjinin belirgin şekilde arttığı, buna karşın yörünge davranışı ve maksimum sıçrama yüksekliğinde önemli bir değişiklik meydana gelmediği belirlenmiştir. Durma noktası analizleri, kaya bloklarının hendek içerisinde durduğunu, sınırlı bir kısmının (%14,6) karayolu platformuna ulaşabildiğini, ancak hiçbir bloğun karayolunu aşarak alt şev kesimine geçmediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, mevcut hendek geometrisinin kaya bloklarının hareket enerjisini sönümlemede etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, İHA destekli fotogrametrik modelleme ile "RocFall 3D/2D" analizlerinin birlikte kullanılması, kaya düşmesi tehlikesinin güvenilir biçimde değerlendirilmesine ve uygun mühendislik önlemlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Sahanın güvenliğinin sürdürülebilirliği açısından hendek içerisinde zamanla birikebilecek kaya ve zemin

malzemelerinin periyodik olarak temizlenmesi önerilmektedir. Ayrıca, olası bir kaya düşmesi bariyeri uygulamasında bariyer yüksekliğinin en az 1,5 m, enerji sönümleme kapasitesinin ise en ağır blok senaryosunu karşılayacak şekilde 30-35 kJ olarak tasarlanması uygun olacaktır. Elde edilen bulguların, benzer jeolojik ve topoğrafik özelliklere sahip alanlarda gerçekleştirilecek kaya düşmesi çalışmalarına ve risk azaltmaya yönelik mühendislik uygulamalarının planlanmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 125M462 numaralı 1001 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Agisoft (2026), "Agisoft Metashape Professional User Manual", Version 2.3.1 Agisoft LLC.

Asteriou, P., Saroglou, H. ve Tsiambaos, G. (2012), "Geotechnical and Kinematic Parameters Affecting the Coefficient of Restitution", Rock Mechanics and Rock Engineering, 45(4), 573-588.

Buz, M. (2019), "Yamaç Duraylılığı Analizlerinde Sayısal Modelleme Yaklaşımları ve Kaya Düşmesi Mekanizmalarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Dorren, L. K. A. (2003), "A Review of Rockfall Mechanics and Modelling Approaches", Progress in Physical Geography, 27(1), 69-87.

Erismann, T. H. ve Abele, G. (2001), "Dynamics of Rockslides and Rockfalls", Springer-Verlag, Berlin.

Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. ve Agliardi, F. (2002), "STONE: A Computer Program for the Three-Dimensional Simulation of Rock-Falls", Computers & Geosciences, 28(9), 1079-1093.

Güllü, B. ve Bilgilioğlu, H. (2023), "Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoyidindeki Pegmatitlerin Kökeni ve Endüstriyel Hammadde Potansiyeli", Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 5(2), 371-382.

James, M. R. ve Robson, S. (2012), "Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application", Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117, F03017.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) (2026), "Yerbilimleri Harita Görüntüleyici, 1/25.000 Ölçekli Sayısal Jeoloji Haritası Veritabanı", yerbilimleri.mta.gov.tr (Erişim: Temmuz 2026).

Parlak, B. ve Sayılı, İ. S. (2012), "Mayıslar Sahası (Sarıcakaya-Eskişehir) Polimetal Cevherleşmeleri Alterasyon Zonları İçindeki Kuvars ve Kalsitlerde Sıvı Kapanım Verileri", Türkiye Jeoloji Bülteni, 55(2), 111-136.

Rocscience (2025), "RocFall 2D - Statistical 2D Analysis of Rockfalls", Technical Manual, Rocscience Inc., Toronto, Canada.

Stevens, W. D. (1998), "RocFall: A Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls", Yüksek Lisans Tezi, University of Toronto, Department of Civil Engineering.

Utlu, M., Öztürk, M. Z. ve Şimşek, M. (2021), "Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modellerine Uygulanan Üç Boyutlu Analizler ile Kaya Düşmelerine Ait Sayısal Risk Değerlendirmesi: Ünlüyaka Köyü (Niğde, Türkiye)", M. F. Döker ve E. Akköprü

(Ed.), Coğrafya Araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları II içinde, ss. 51-69, Pegem Akademi, Ankara.

Uykun, İ., Akın, M. ve Varol, O. O. (2025), "3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin İncelenmesi", Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 11(1).

Varnes, D. J. (1978), "Slope Movement Types and Processes", R. L. Schuster ve R. J. Krizek (Ed.), Landslides: Analysis and Control (Special Report 176) içinde, ss. 11-33, National Academy of Sciences, Washington, DC.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. ve Reynolds, J. M. (2012), "Structure-from-Motion Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications", Geomorphology, 179, 300-314.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
R_n	Normal restitüsyon katsayısı	R_t	Teğetsel restitüsyon katsayısı
φ	Sürtünme açısı (°)	ω	Açısal hız
v_x	x yönündeki başlangıç doğrusal hızı	v_y	y yönündeki başlangıç doğrusal hızı
v_{ti}	Çarpma öncesi teğetsel hız	v_{tf}	Çarpma sonrası teğetsel hız