

Belisırma (Aksaray) Yerleşim Alanında Kaya Düşmesi Tehlikesinin İHA tabanlı 3B Modelleme ve Rockyfor3D Analizleri ile Değerlendirilmesi

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 25.02.2026

Kabul/Accepted: 19.06.2026

Yayımlandı/Published: : 03.08.2026

Assessment of Rockfall Hazard in the Belisırma (Aksaray) Settlement Area Using UAV-Based 3D Modeling and Rockyfor3D Analyses

İbrahim ÇETİN^{1*}, Osman KORKMAZ², Burhan Baha BİLGİLİOĞLU³¹ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye² Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye³ Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Dünyada en önemli can ve mal kaybına neden olan afetlerin başında kaya düşmeleri gelmektedir. Bu kayıplara ek olarak tarihi ve kültürel miras alanlarında meydana gelen taş düşmesi afet olaylarında kültürel ve ekonomik kayıplar da ortaya çıkmaktadır. Ülkelerin kültürel miras varlıklarını korumak, bölgedeki halkın ekonomik sürdürülebilirliğini sağlamak ve ziyaretçilerin can ve mal kaybının önüne geçmek için bu potansiyel afet alanlarının belirlenmesi önemli bir husustur. Dünyada ve ülkemizde çok önemli bir yere sahip olan Aksaray ili İhlara vadisi kaya oyma yapılarından oluşan hem tarihi hem de doğal bir turizm alanıdır. Bu çalışma kapsamında insansız hava aracı (İHA) kullanarak, arazinin sayısal yüzey modeli (SYM) ve ortofotosu oluşturulmuş, yersel ölçmeler ile desteklenerek potansiyel kaya düşmesi alanları belirlenerek simüle edilmiştir. Bu çalışma ile arazinin 3B modelinin İHA kullanarak üretilebileceği ve potansiyel kaya düşme alanlarının kısa sürede ve yüksek hassasiyetle belirlenebileceği görülmüştür.

Abstract

Rockfalls rank among the leading causes of loss of life and property worldwide. In addition to these losses, rockfall incidents occurring in areas of historical and cultural heritage also result in cultural and economic losses. Identifying these potential disaster areas is crucial for protecting a country's cultural heritage assets, ensuring the economic sustainability of the local population, and preventing loss of life and property among visitors. The İhlara Valley in Aksaray Province, which holds a very significant place both globally and in our country, is a tourism area of both historical and natural significance, comprising rock-cut structures. Within the scope of this study, a digital surface model (DSM) and orthophotos of the terrain were generated using an unmanned aerial vehicle (UAV), and potential rockfall areas were identified and simulated with the support of ground-based measurements. This study demonstrated that a 3D model of the terrain can be produced using a UAV and that potential rockfall areas can be identified quickly and with high accuracy.

Anahtar Kelimeler: Aksaray, İhlara, Belisırma, kaya düşmesi, Rockyfor3D, RF3D**Keywords:** Aksaray, İhlara, Belisırma, Rockfall, Rockyfor3D, RF3D

1. Giriş

Kaya düşmesi tüm dünyada can ve mal kaybına neden olan en önemli afetlerin başında gelmektedir (Ulamis, 2026). Kaya düşmeleri dağlık, engebeli araziler, şev yarmaları, açık veya kapalı maden ocakları gibi yüzey pürüzlüğü fazla olan yerlerde meydana gelen istatistiksel olarak depremlerden sonra yerleşim alanlarına en çok zarar veren doğal afet türüdür (Akın vd., 2020; Durmuş vd., 2025). Kaya kütleleri, sağlam kaya bölümleri ile bu bölümleri ayıran bir ya da birden fazla süreksizlikten meydana gelmektedir. Şev duraysızlığı türleri içinde önemli bir yer tutan kaya düşmesi ise, yamaç veya şevlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılan kaya

bloklarının yerçekimi etkisiyle, eğim doğrultusunda ani ve yüksek hızda düşmesi sonucu oluşmaktadır (Volkwein vd. 2011). Kaya düşmesi alanlarının sık olarak gerçekleştiği şev ve yamaçlarda kaynak zonda meydana gelen süreksizlik yapısı meteorolojik süreçler, deprem ya da yapay sarsıntılar gibi nedenlerle serbest olarak eğim yönünde harekete geçer ve eğimin azalmasına ve düştüğü yerdeki toprak tipine bağlı olarak sıçrayarak veya yuvarlanarak hareket ederler (Ritchie, 1963). Bu doğal afetin oluşmasına ve hızlanmasına neden olan en önemli kriterler olarak meteorolojik olaylar gösterilmektedir. Gece ve gündüz sıcaklıklarının fazla, yağışın bol, ayrıca donma-çözülme süreçlerinin sık gerçekleştiği bölgelerde kaya düşmeleri sık olarak gerçekleşmektedir (Akın vd.,

2020). Hem can hem de mal kaybına sebep veren bu afet türünün önceden belirlenmesi ve önlem alınması önemli bir husustur. Özellikle nüfusun yoğun olduğu ve ekonomik faaliyetlerin fazla olduğu yerlerde meydana gelebilecek bu afet türünün önceden belirlenmesi hem maddi hem de manevi kayıpların önüne geçmek için büyük önem teşkil etmektedir (Leroi, 2005). Kaya düşmesi tehlikesi açısından daha akılcı ve ekonomik afet risk yönetimi geliştirilerek hem vatandaşların hem de kamu bütçesinde oluşacak zararlar minimize edilmelidir.

Kaya düşmesi tehlikesi analizleri birçok girdi verinin birlikte değerlendirmesi gereken karmaşık ve çok aşamalı bir işlemdir. İnsan gücünün erişemeyeceği mesafelerde ya da zorlu arazi şartlarında çok detaylı analizlerin yapılması teknolojinin ilerlemesiyle mümkün olmuştur (Volkwein vd., 2011). Geleneksel 2B yöntemler karmaşık topoğrafik özellikleri ve yanal saçılmaları tam olarak yansıtamadığı görülürken güncel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan 3 boyutlu (3B) yöntemler ile kaynak zondaki şevin yüksekliği, açısı, topoğrafik ve jeolojik özellikleri dahil birçok bilgi edinilebilmektedir (Akın vd., 2020; Ulamis, 2026; Zengin & Ulamiş, 2025). 3B yöntemler ise kaya düşmesi hareketini topoğrafya üzerindeki gerçek arazi değerleri üzerinden simüle eden yazılımlar aracılığıyla yapılmaktadır (Bartelt vd., 2016; Guzzetti vd., 2002, 2003; Lan vd., 2007; Volkwein vd., 2011). Bu yöntemler karmaşık arazi yapısını daha iyi modellediği için blokların yörüngelerini, enerjilerini ve hızlarını daha gerçekçi bir şekilde simüle ederler (Abbruzzese & Labiouse 2020, L. K. A. Dorren vd. 2006, Ersoy vd. 2019).

Kaya düşmesi tehlikesi analizlerinde simüle edilen modelin doğruluğu girdi parametrelerinin kalitesiyle doğru orantılıdır. Özellikle insansız hava araçları (İHA) ve fotogrametrik yöntemlerle elde edilen yüksek çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (SYM) gerçeğe yakın modelleme için çok kritik bir parametredir (Güngör vd., 2025; Zengin & Ulamiş, 2025). Bu sayede hem yüksek doğrulukta hem de çözünürlükte elde edilen SYM üretilecek tehlike analizini daha hassas olarak kullanıcıya sunulmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada da geçmişten bu yana kaya düşmesi açısından bir problem haline gelerek birçok kez kaya düşmesi olayı meydana gelen tarihi ve kültürel bir mirasa sahip aynı zamanda yoğun bir ziyaretçi yoğunluğuna sahip bir çalışma alanında 3B simülasyon yöntemleri kullanılarak kaya düşmesi tehlikesi analizleri yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ortofoto ve SYM'ler için İHA ve kaya düşmesi tehlikesi analizleri için RocyFor3D (RF3D)

yazılımı kullanılmıştır. RF3D yazılımı için gerekli parametreler için Python dilinde yazılan bir araç kullanılarak üretilmiştir (Polat, 2020). Analizler sonucunda kaya bloklarının enerji miktarları, sıçrama yükseklikleri ve ulaşabileceği en uzak mesafeler elde edilerek bu veriler ışığında kaya düşmesi tehlikesi olan bölgelerin belirlenmesi hedeflenmiştir

2. Materyal ve Metot

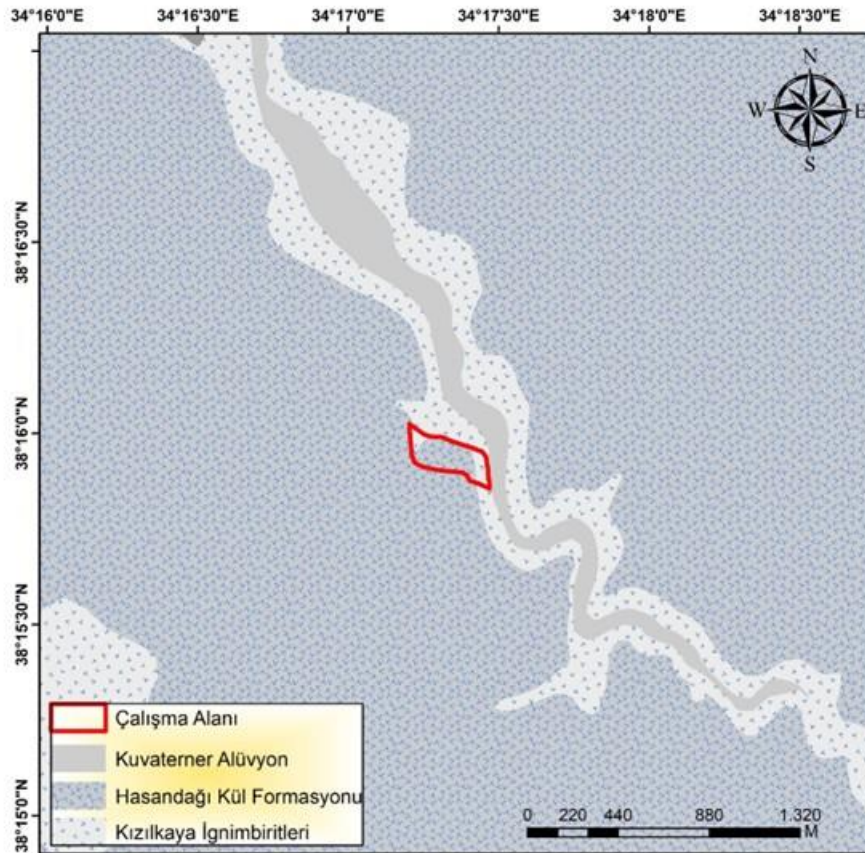
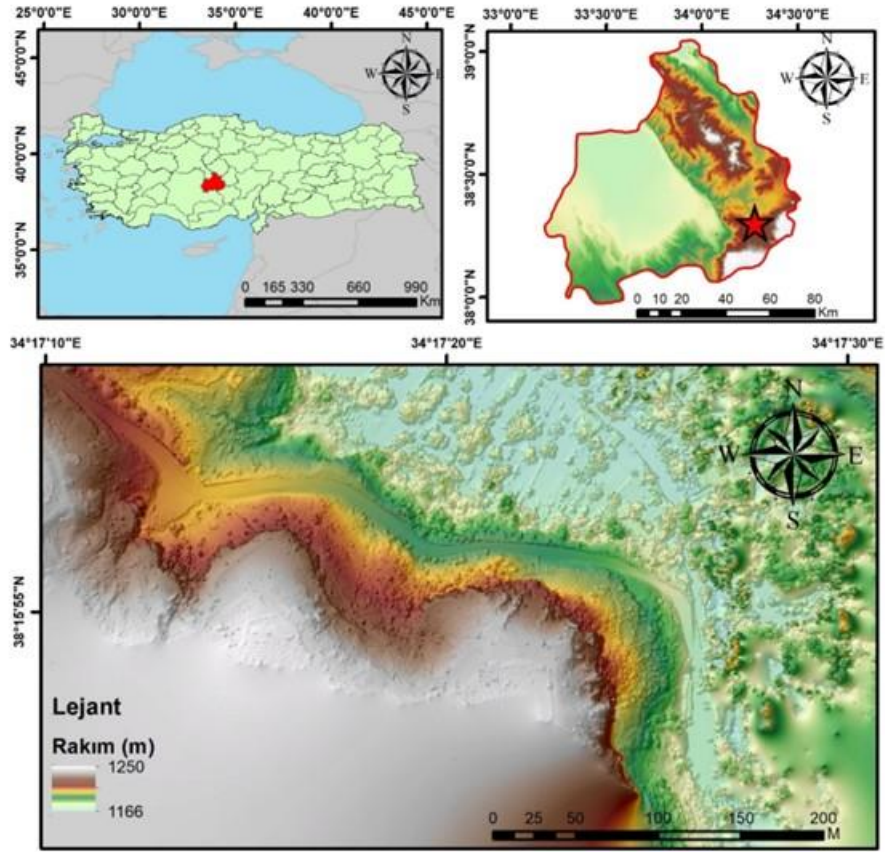
2.1 Çalışma Alanı ve Genel Özellikleri

Çalışma alanı Aksaray ili Güzeyurt ilçesine bağlı Belisırma Kasabası sınırları içerisinde $34^{\circ}17'10''$ – $34^{\circ}17'32''$ enlemleri ve $38^{\circ}15'50''$ – $38^{\circ}16'00''$ boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Belisırma, Aksaray il merkezine 42 km ve Güzeyurt ilçesine ise 11 km mesafede yer almakta ve Nevşehir iline 95 km uzaklıktadır (Pekak & Soykan 2013). Belisırma, İhlara Vadisi Özel Çevre Koruma Bölgesi alanı içerisindeki en önemli turizm alanlarından biridir. Köy, içerisinde yer alan Kırkdamaltı, Bahaddin Samanlığı, Direkli ve Ala Kiliseleri gibi 11. ve 13. yüzyıllarda yapılmış dini mekanları ve etrafında yer alan tarihi kaya oyma mekanları ve her yıl binlerce yerli ve yabancı turisti ağırlamaktadır (ÇŞİDB, 2020). Bölge, karasal iklim özelliklerini taşımaktadır. Kışları sıfırın altına düşen sıcaklıkları ile genelde kar yağışı görülürken, yazları ise genel olarak sıcak ve kurak geçer. En yağışlı dönem bu dönemler arasındadır (MGM, 2025).

Çalışma alanının en alt kotunda pembe-beyaz renkli Alt Pliyosen yaşlı Selime tüfleri, bu birimleri uyumlu olarak örten açık gri ve beyaz renkli andezitik ve riyodasit bileşimli ignimbiriterle temsil edilen üst miyosen-pliyosen yaş arağındaki Kızılkaya İgnimbiriterleri ile en üst kotlarında ise Hasan Dağının güney ve güneydoğusunda mostra veren gri beyaz renkli kül ve lapillerden oluşan Alt Pleyistosen yaşlı Hasandağı kül Formasyonu ve çalışma alanının içerisindeki geçen Melendiz ırmağının doldurduğu kum-çakıl-silt boyutundaki akarsu ve dere çökellerinden oluşan kuvaterner yaşlı alüvyonlar ile temsil edilmektedir (Şekil 2).

2.2. İnceleme Alanındaki Kaya Düşmesi Riskinin Değerlendirilmesi

Kaya düşmeleri fiziksel bozulma etkenleri (Donma – çözünme süreçleri, meteorolojik süreçler vb.) ve kimyasal süreçler (atmosferik süreçler sonucunda su ve temas ile kayaç yapısındaki bozulmalar) nedeniyle başlıca süresizlikler tarafından kontrol edilmektedir (Nasery & Çelik, 2020). Belisırma (Güzelyurt) yerleşim yerlerinde daha önceki yıllarda meydana gelen çok sayıda kaya düşmesi olayları gerçekleşmiştir (Şekil 3).



Vadi içerisinde özellikle turistleri ve tur otobüslerinin yoğun olarak geçtiği Belisırma vadi girişi ve otopark olarak kullanılan alanlarda gelişmiş süreksizliklerin vadi boyunca incelenerek genel itibarıyla KB-KD doğrultusunda dike yakın bir eğime sahip bloklarda görülmektedir. Bu losyonlardaki süreksizlik açıklıkları birkaç santimetreden birkaç metreye kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Süreksizlik yüzeyleri arasındaki boşluklar daha çok yüzey suları ile çatlaklara dolan kum, kil ve silt boyutundaki

malzemelerden oluşmaktadır. Derin çatlaklar içeren birimlerde ise genelde çatlakların dolgusuz olduğu gözlemlenmektedir. Bölgenin karasal ikliminden dolayı kış mevsiminde donma ve çözülme olaylarından kaynaklı fiziksel bozulma nedeniyle süreksizliklerin gelişimleri gözlemlenmektedir. Bu durum ise hemen hemen tüm İhlara Vadisi boyunca geliştiği gözlemlenmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Direkli kilise mevkiinde süreksizlik açıklığı örneği (açıklık yaklaşık 2 metre).

Çizelge 1. İHA özellikleri.

Özellik	Değer / Açıklama
Boyutlar (Açık - Katlanmış)	810×670×430 mm (açık), 430×420×430 mm (katlanmış)
Ağırlık	~6,3 kg (iki TB60 pil ile)
Uçuş Süresi (maks.)	55 dakika
Maksimum Uçuş Hızı	23 m/s (S modu)
Maksimum Rüzgar Direnci	12 m/s
RTK Konumlandırma Doğruluğu	Yatay: ±1 cm + 1 ppm Dikey: ±1.5 cm + 1 ppm
Uçuş Hassasiyeti (RTK ile)	Yatay: ±0.1 m Dikey: ±0.1 m
Desteklenen Gimbal Modelleri	Zenmuse P1, H20, H20T, L1 vb.
GNSS Desteği	GPS + GLONASS + BeiDou + Galileo
RTK Sistemi Yapısı	Dahili RTK modülü (harici sabit istasyon olmadan çalışabilme)

Çizelge 2. ZP1 Kamera özellikleri.

Özellik	Değer / Açıklama
Sensör	Sensör boyutu (Sabit): 35,9×24 mm (Tam kare) Sensör boyutu (Maksimum video kayıt alanı): 34×19 mm Etkin Pikseller: 45MP Piksel boyutu: 4,4 µm
Lens Tipi	DJI DL 35mm F2.8 LS ASPH (Asferik Lens)
Odak Uzunluğu	35mm
Diyafram	f/2.8 - f/16
Görüş Açısı (FOV)	63.5°

2.3 Veri Hazırlama Süreçleri

Bu çalışmada kaya düşmesi analizleri için 3B modelleme yapabilen RF3D yazılımı kullanılmıştır. RF3D yazılımı temelde SYM kullanılmaktadır. SYM verileri İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak elde edilmiştir. İHA yardımıyla üretilen SYM verileri kullanılarak RF3D yazılımının ihtiyaç duyduğu zemin tipleri ve kaya bloklarının tanımlanması

için gerekli 3B SYM ve ortofotolar üretilmiştir. Yazılımın ihtiyaç duyduğu diğer parametreler ise Polat (2020), tarafından Python dilinde geliştirilen veri hazırlama aracı kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada veri toplama süreci, DJI Matrice 300 RTK platformu ve Zenmuse P1 kamera ile gerçekleştirilmiş ve cihaz özellikleri verilmiştir (Çizelge 1 ve 2).

Kaya düşmesi çalışmalarında blok boyutlarının ve yüzey pürüzlülüğünün doğru şekilde modellenmesi için genellikle santimetre düzeyinde mekânsal çözünürlüğe sahip ortofoto ve SYM üretilmesi önerilmektedir (Ağca vd., 2020, Giordan vd., 2015). Bu kapsamda kullanılan kamera sisteminin teknik özellikleri dikkate alınarak yaklaşık 1-2 cm/pixel hedeflenen yer örnekleme aralığı (GSD – Ground Sampling Distance) değerine ulaşabilecek bir uçuş yüksekliği belirlenmelidir (DJI, 2025a, 2025b).

Uçuş, otonom şekilde gerçekleştirilmiş ve uçuş planı, görev öncesinde DJI Pilot uygulaması üzerinden yapılandırılmıştır. Uçuş yüksekliği hedeflenen GSD değeri dikkate alınarak 80 m olarak belirlenmiştir. Uçuş hızı hareket bulanıklığını engellemek ve her bir fotoğrafın maksimum netlikte çekilmesini sağlamak amacıyla sistem kapasitesi göz önünde bulundurularak 10 m/s olarak tanımlanmış ve görev sırasında otomatik kamera tetikleme fonksiyonu kullanılmıştır. Görüntüler arasındaki boyuna (%80) ve enine (%70) bindirme oranları; sarp ve düzensiz kaya yüzeylerinde oluşabilecek ölü noktaları (occlusion) en aza indirmek, 3B modelin geometrik sürekliliğini sağlamak ve nokta bulutu yoğunluğunu artırmak amacıyla yüksek tutulmuştur. Bu stratejik bindirme oranları, fotogrametrik işleme sürecinde ortak noktaların (tie points) daha hassas eşleştirilmesine ve modeldeki boyutsal hataların minimize edilmesine olanak tanır (Giordan vd., 2020). RTK düzeltme sinyali doğrudan İHA'ya entegre RTK alıcısı üzerinden sağlanmıştır (DJI, 2025a, 2025b).

Detaylı 3B model üretimi için uçuş görevi oblik uçuş olarak gerçekleştirilmiştir. Kamera açısı, 90° derece dikey ve 45° derece açılı olacak şekilde 5 farklı bakış açısı ile

yapılandırılmıştır. Bu yapılandırma, vadi tabanının ve yamaç yüzeylerinin daha yüksek oranda kapsanmasını sağlamıştır. Ayrıca oblik görüntülerin kullanımı, yapının karmaşık jeomorfolojik detaylarının daha hassas biçimde modellenmesine imkân tanımıştır (Kim vd., 2015, Tang vd., 2024). Gerçekleştirilen uçuşlarda toplam 1903 adet fotoğraf elde edilmiştir. Bu görüntülerin yaklaşık 450 adedi düşey (nadir) açı ile, kalan kısmı ise 45° derece eğik konfigürasyonu ile alınmıştır. Elde edilen görüntüler, 3DF Zephyr fotogrametri yazılımına aktarılıp, kamera pozisyonlarını belirleyerek, kendi içinde değerlendirip bağlantı noktaları oluşturulmasından sonra hatalı ve bağlama noktası üretilmiştir. Bağlantı noktalarının üretilmesinden sonra 3B nokta bulutu üretilmiştir. 3B nokta bulutu üretiminden sonra oluşturulan yoğun nokta bulutu giydirme işlemleri yapılmıştır. Kullanılan sistem konfigürasyonu ve görüntü çözünürlüğü sonucunda, GSD 1,42 cm/pixel olan ortofoto üretilmiştir. Oluşturulan yoğun nokta bulutu, 3DF Zephyr yazılımı içerisinde yüzey enterpolasyonuna tabi tutularak SYM elde edilmiştir. Nokta bulutu üzerindeki veriler, arazideki yükseklik değişimlerini temsil edecek şekilde üçgenleme yöntemiyle yüzey haline getirilmiş ve raster formatında yüksek çözünürlüklü bir yükseklik haritası oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, zemin türü kaya bloğunun etki edebileceği nesne, İHA yardımıyla yapılan fotogrametrik amaçlı uçuşta alanın 3B modeli çıkarılmış ve kaya düşmesi riski gösteren süreksizlik yapıları ile serbest halde bulunan kaya blokları tek tek işaretlenerek 138 adet noktada kaya düşmesi kaynak alan olarak değerlendirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Sol üstte, 2B ve 3B model ve haritalama çalışmaları, sağ üstte 3B model üzerinde işaretlenmiş kaya düşmesi kaynak alanlar ve altta ise ortofoto üzerinde işaretlenmiş kaya düşmesi kaynak alanların konumları.

Çizelge 3. RF3D yazılımında gerekli olan parametreler

Veri Türü	Veri Tipi / Format	Çözünürlük	Değer Tipi / Birim	Kullanım Amacı
Dijital Yükseklik Modeli (DEM)	Raster	0,5 m	Yükseklik (m)	Eğim, akış yönü ve kaya düşmesi hareketinin modellenmesi
Kaya Yoğunluğu	Raster	0,5 m	Yoğunluk (kg/m ³)	Kinetik enerji ve hareket dinamiğinin hesaplanması
Blok Boyutları (d1, d2, d3)	Raster	0,5 m	Uzunluk (m)	Blok hacmi ve kütlelerinin belirlenmesi
Blok Şekli	Raster	0,5 m	Kategorik (1: Küre, 2: Elipsoid, 3: Dikdörtgen)	Hareket tipi ve yuvarlanma davranışının belirlenmesi
Yüzey Pürüzlülüğü (rg70, rg20, rg10)	Raster	0,5 m	Yükseklik (m)	Enerji kaybı ve sıçrama/yuvarlanma davranışının modellenmesi
Zemin Tipi	Raster	0,5 m	Kategorik (0: Kaya, 1: Toprak, 2: Çimen vb.)	Sürtünme, enerji sönümü ve hareket karakteristiğinin belirlenmesi

Kullanılan verilerin analiz sürecine dahil edilmesi, verilerin standardizasyonu, parametrik üretimi ve fizik tabanlı modelleme aşamalarından oluşan sistematik bir iş akışını takip etmektedir. İlk aşamada, tüm altlık veriler UTM WGS 84 (Zone 36) projeksiyon sistemine dönüştürülerek, mikro-topografik etkilerin hassas analizi için RF3D yazılımının gereksinim duyduğu 0.5 m x 0.5 m mekânsal çözünürlüğe yeniden örneklenmiştir. Modelin ihtiyaç duyduğu 10 temel raster veri seti hazırlanırken; kaya yoğunluğu ve geometrik özelliklerin yanı sıra, yüzey pürüzlülüğünü temsil eden istatistiksel değişkenler (%70, %20 ve %10'luk engel yükseklikleri), Polat (2020) tarafından geliştirilen Python tabanlı bir araçla türetilerek modele entegre edilmiştir. Analiz sürecinde, Sayısal Yüzey Modeli (SYM) üzerinden hesaplanan eğim ve morfoloji verileri, zemin tipi ve pürüzlülük katmanlarıyla çakıştırılarak yazılımın fizik tabanlı algoritmasına temel oluşturmuştur. Ortofoto ve 3B modelleme ile belirlenen 138 adet kaynak noktası başlangıç parametresi olarak kullanılmış; blokların yuvarlanma, sıçrama ve çarpma anındaki enerji sönümlenmesi süreçleri, deterministik fizik yasaları ile yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan olasılıksal değişkenlerin birleştirilmesiyle modellenmiştir. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, her bir bloğun hareket yörüngesi, ulaştığı kinetik enerji ve olası durma alanları yüksek çözünürlüklü çıktılarla dönüştürülmüştür (Çizelge 3).

3. Bulgular ve Tartışma

Kaya düşmesi tehlike analizleri kapsamında, çalışma alanında düşme potansiyeli taşıyan 138 adet kaya bloğu tespit edilmiş ve bu blokların her biri için Rockyfor3D (RF3D) yazılımı kullanılarak 10'ar adet simülasyon gerçekleştirilmiştir. Modelin ürettiği zıplama yüksekliği ve kinetik enerji dağılımlarına ait istatistiksel sonuçların

değerlendirilmesinde, kinetik enerji için %95 güven aralığındaki değerler, zıplama yükseklikleri için ise ortalama değerler kullanılmıştır.

3.1. Kinetik Enerji Dağılımları

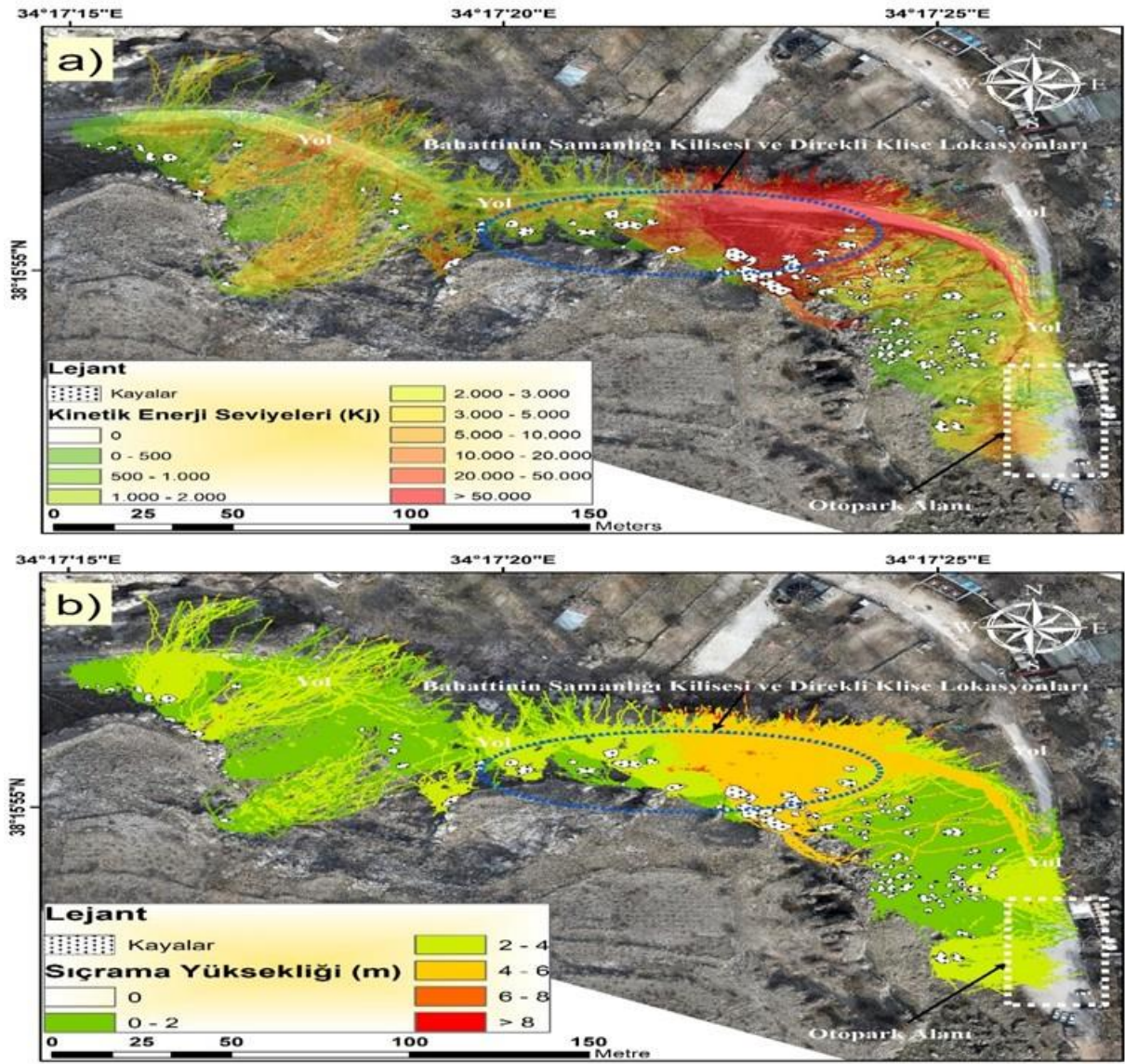
Belisırma bölgesinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre (Şekil 8a), düşen kaya bloklarının kinetik enerji değerleri sahada 500 kJ ile 50.000 kJ ve üzeri değerler arasında geniş bir dağılım sergilemektedir: Düşük Enerji Zonu bölgeler, Direkli Kilise'ye kadar olan bölgede, nispeten küçük hacimli blokların ürettiği ortalama kinetik enerji 500 – 2.000 kJ aralığındadır.

Orta Enerji Zonu bölgeler, Çalışma alanının orta kesimlerinde, özellikle blok boyutlarının değişkenlik gösterdiği Direkli Kilise'nin ön cephesinde enerjiler 2.000 – 10.000 kJ seviyelerine çıkmaktadır. Serbest halde bulunan yamacın hemen üzerindeki kayaların enerjileri ise ortalama 3.000 – 5.000 kJ olarak hesaplanmıştır.

Çok Yüksek Enerji Zonu bölgeler, Direkli Kilise'nin üst kesimlerinde bulunan devasa boyutlu kayalar ile Bahattin'in Samanlığı olarak bilinen ve altı otopark olarak kullanılan bölgelerde 50.000 kJ ve üzerinde ekstrem kinetik enerji değerleri elde edilmiştir.

3.2. Sıçrama Yükseklikleri

Simülasyonlardan elde edilen bir diğer önemli çıktı olan sıçrama yükseklikleri, çalışma alanındaki zemin koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ana kayadan kopan blokların, yamacın alt kesimlerindeki zeminle temas ettikleri noktalarda enerji sönümlenme kapasitesine bağlı olarak sıçrama yükseklikleri 0 - 8 metre arasında değişmektedir. Özellikle Bahattin'in Samanlığı civarında, alt kesimlerde halihazırda serbest halde bulunan kaya bloklarına çarpan düşen kayaların sıçrama yüksekliklerinde belirgin bir artış (6 – 8 metre) kaydedilmiştir.



Şekil 8. RF3D yazılımında hesaplanan muhtemel kaya düşmesi lokasyonlarına ait a) Enerjiler b) Sıçrama yükseklikleri.

4. Sonuçlar

Çalışma alanında hesaplanan 50.000 kJ ve üzerindeki ekstrem enerji değerleri, doğrudan kopan kaya bloklarının kütlesi ve geometrisi ile ilişkilidir. Direkli Kilsesi ve Bahattin'in Samanlı Kilesesi lokasyonlarında 50.000 kJ üzeri enerjilerin üretilmesi, bu bölgelerde kopmaya hazır ignimbrit bloklarının hacimsel büyüklüğünün bir sonucu ile ilişkilidir. Çünkü kinetik enerji, kütle ve hızın bir fonksiyonu olarak devasa bloklar yamaç aşağı hareketlerinde çok daha yıkıcı enerjilere ulaşmaktadır. Öte yandan bu durum literatürle de uyumluluk göstermektedir. Örneğin Akın vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada 12 m³ hacmindeki kaya bloklarının 80.000 kJ kadar bir çarpma enerjisi açığa çıkarabileceği belirtilmiştir. Ayrıca Polat (2020), enerjinin yüksek çıkmasının doğrudan büyük bloklarla ilişkili olduğunu söylerken benzer şekilde Lo ve Fang Lee (2016), 1.000 m³ ile 50.000 m³ arasındaki devasa kaya kütlelerinin

düşüşünü tartışmış ve kütle kinetik enerji üzerindeki belirgin etkisini vurgulamıştır.

Ayrıca elde edilen bulgular blok geometrisinin hareket mekanizması üzerindeki etkisini de yansıtmaktadır. Çalışma alanı ve çevresinde gerçekleştirilen analizlerde hem RF3D yazılımındaki simülasyonlar hem de daha önce koruyucu geometrisinin çok belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla da benzerlik göstermektedir. Dairesel ya da eş boyutlu geometriye sahip kaya blokları, yuvalanırken hızlarını ve kinetik enerjilerini uzun süre koruyarak çok daha uzak mesafelere ve yüksek enerjilere ulaşabildiği ancak yassı, uzun, köşeli yapıdaki blok formlarının ise sürtünme nedeniyle enerjilerini daha çabuk kaybettiği birçok çalışmada belirtilmektedir (Öztürk vd., 2022; Varol vd., 2026; Zengin & Ulaşmış, 2025). Öteyandan RF3D yazılımı, blokları serbest düşüş sırasında nokta olarak ve çarpma anında ise küre olarak modelleyerek yüksek enerji

hesaplamalarını gerçekleştirme kapasitesine sahiptir (Dorren vd., 2006). Bu durum, blok şeklini küresel varsayarak yaptığı hesaplamalar ve dönme (rotasyonel) enerjinin hesaplamasındaki gibi belirsizlikler yaratarak toplam kinetik enerjiyi de etkileyebilir.

Ihlara Vadisi özelinde Belisırma bölgesinin tipik yumuşak toprak tipi üzerindeki bloklu ve sert zemin yapısı ise kinetik enerji ve sıçrama yüksekliklerini etkileyen bir başka etken olarak göze çarpmaktadır. Bahattin'in Samanlığı ve Direkli Kilise gibi alanlar, masif Kızılkaya İgnimbriti uçurumlarının hemen altında yer almaktadır. Bu dik ve kademeli topoğrafya, düşen blokların hızlanması için serbest düşme mesafesi yaratırken, topoğrafyadaki oluklar blokların belirli bölgelere yönlendirilerek enerjilerini buralarda yoğunlaştırmasına neden olmaktadır.

RF3D simülasyonlarındaki elde edilen sonuçlar incelenirse R_n ve R_t katsayılarının, model çıktıları üzerine çok yüksek etkilendiğini göstermektedir. Ana kayadan kopan kayaların bazı zeminlerde düşük, bazı zeminlerde ise yüksek sıçrama göstermesi bu katsayıların doğrudan bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu durum aslında çalışma alanının jeolojik olarak (tuf, ignibrit, aglomera birimler) yüksek gözenekli yapısı ve deforme olan yapıların yastık görevi görerek bazı düşen kaya bloklarının kinetik enerjisini sönmüleyerek R_n değerini düşük değer çıkmasına neden olur. Ancak bu durum Bahattin'in Samanlığı civarında olduğu gibi, düşen bloklar yamaç yüzeyinde halihazırda birikmiş olan sert kaya bloklarına (talus veya serbest kayalar) çarptığında gerçekleşmez. Aksine, sert kaya-kaya çarpışması yüksek bir elastikiyet yaratarak (yüksek R_n ve R_t değerleri) sıçrama yüksekliğinin artmasına ve bloğun enerjisini kaybetmeden yörüngesine devam etmesine yol açmaktadır (Dorren vd., 2023; Polat, 2020).

Kapadokya bölgesi ve özellikle Ihlara Vadisi'ndeki kaya düşmesi riskleri üzerine yapılan önceki çalışmalar çoğunlukla 2B yörünge analizleri, kinematik değerlendirmeler veya ampirik yöntemler ile sınırlı kalmıştır (Sari, 2022; Sari & Çömlekçiler, 2007). 2B modeller topoğrafik pürüzlülüğü, yanal dağılımları ve engellerin blok yönelimine etkilerini tam olarak yansıtmakta yetersiz kalırken, bu çalışmada RF3D gibi yüksek çözünürlüklü 3B olasılıksal bir modelin kullanılması, düşen blokların yanal dağılımını ve topoğrafyadaki etkilerini gerçeğe çok daha yakın bir şekilde ortaya koymaktadır. Bildiğimiz kadarıyla çalışma alanındaki bu denli kapsamlı bir 3B modelleme ile kaya düşmesi tehlikesini ele alan ilk çalışmadır.

Kapadokya bölgesindeki diğer kültürel ve doğal alanlarda yapılan güncel 3B modelleme çalışmalarında çok daha

düşük maksimum kinetik enerji değerleri rapor edilmiştir. Örneğin Hacıabdullah köyündeki simülasyonlarda maksimum 3.476 kJ, Mazı köyünde 2.100 kJ, Aladağlar Kazıklı Kanyonu'nda ise 1.400 kJ gibi değerler elde edilmiştir (Öztürk vd., 2022; Ulaş, 2026; Ündül vd., 2026). Bu çalışmada ise Belisırma'da Direkli Kilise ve Bahattin'in Samanlığı gibi spesifik alanlarda 50.000 kJ ve üzeri ekstrem enerji değerlerinin tespit edilmesi, buradaki devasa blokların ve sarp topoğrafyanın yarattığı yıkıcı gücün literatürde ilk kez bu denli net bir şekilde belgelenmesini sağladığı düşünülmektedir.

Ihlara Vadisi, UNESCO Dünya Mirası adayı/kapsamı sayılabilecek nitelikte, her yıl binlerce turisti ağırlayan bir tarihi yerleşimdir. Kültürel miras alanlarında yapılacak mühendislik iyileştirmelerinin (koruyucu çelik ağlar, bariyerler vb.) tarihi dokuya zarar vermeden tasarlanabilmesi için kaya düşmesi enerjilerinin tam olarak bilinmesi gerekir (Ağca vd., 2020; Varol vd., 2026). Çalışmanız, bu bariyerlerin hangi lokasyonlarda ve kaç kJ'lük enerji sönmüleme kapasitesine sahip olması gerektiği konusunda (özellikle 50.000 kJ gibi tasarım limitlerini zorlayan değerlerle) doğrudan karar vericilere ve tasarımcı mühendislere kritik, sahaya özgü nicel veriler sunmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 3: Kaynaklar, Kavramsal model, Yazma

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan verilen üretilmesinde ekipman, yazılım ve teknik desteklerinden dolayı Aksaray İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne ve makalenin geliştirilmesine katkı sağlayan değerli görüş ve önerilerinden dolayı editör ve hakemlere teşekkür eder.

5. Kaynaklar

Abbruzzese, J. M., & Labiouse, V. (2020). New cadavre methodology for rock fall hazard zoning based on 3D trajectory modelling. *Geosciences (Switzerland)*, 10(11), 1–25.

<https://doi.org/10.3390/geosciences10110434>

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.
<https://doi.org/10.29128/geomatik.595574>
- Akın, M., Dinçer, I., & Orhan, A. (2020). *Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kilavuz* (A. Tezcan, A. Demir, H. G. İlgen, M. Beyhan, T. Şentürk, & Ramazan Selçuk Yardımcı (ed.)). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. www.afad.com.tr
- Bartelt, P., Gerber, W., Christen, M., & Bühler, Y. (2016). Modeling rockfall trajectories with non-smooth contact/impact mechanics. *13th Congress Interpraevent 2016*, 203–211.
- Dorren, L. K. A., Berger, F., & Putters, U. S. (2006). Natural Hazards and Earth System Sciences Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *İçinde Natural Hazards and Earth System Sciences* (C. 6).
- Dorren, L., Schaller, C., Erbach, A., & Moos, C. (2023). Automated Delimitation of Rockfall Hazard Indication Zones Using High-Resolution Trajectory Modelling at Regional Scale. *Geosciences (Switzerland)*, 13(6).
<https://doi.org/10.3390/geosciences13060182>
- Durmuş, E., Coruk, Ö., Gül, T., & Yıldırım, E. (2025). Harşena Dağı Civarında Kaya Düşmeleri ve Süreksizlik Denetimli Yamaçların Kinematik Analizi Rockfalls and Kinematic Analysis of Discontinuity-Controlled Slopes in the Vicinity of Mount Harşena. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 90(262).
<https://doi.org/10.21324/dacd.1687881>
- Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetçi, M. O., & Yahşi, B. K. (2019). Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology*, 249, 112–128.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.025>
- Giordan, D., Adams, M. S., Aicardi, I., Alicandro, M., Allasia, P., Baldo, M., De Berardinis, P., Dominici, D., Godone, D., Hobbs, P., Lechner, V., Niedzielski, T., Piras, M., Rotilio, M., Salvini, R., Segor, V., Sotier, B., & Troilo, F. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(7), 3437–3481.
<https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>
- Giordan, D., Manconi, A., Facello, A., Baldo, M., Dell'Anese, F., Allasia, P., & Dutto, F. (2015). Brief Communication: The use of an unmanned aerial vehicle in a rockfall emergency scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(1), 163–169.
<https://doi.org/10.5194/nhess-15-163-2015>
- Güngör, G., Yıldırım, G., & İşleyen, S. K. (2025). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen v e Mühendislik Bilimleri Dergisi Multitask Assignment and Path Planning for Heterogenous UAVs with Flight Dynamics. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25, 1359–1371.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *İçinde Computers & Geosciences* (C. 28).
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Wieczorek, G. F. (2003). Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 491–503.
<https://doi.org/10.5194/nhess-3-491-2003>
- Kim, D. H., Gratchev, I., & Balasubramaniam, A. (2015). Back analysis of a natural jointed rock slope based on the photogrammetry method. *Landslides*, 12(1), 147–154. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0528-3>
- Lan, H., Derek Martin, C., & 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.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013>
- Leroi, E. (2005). Global rockfalls risk management process in “La Désirade” Island (French West Indies). *Landslides*, 2(4), 358–365.
<https://doi.org/10.1007/s10346-005-0015-y>
- Lo, C. M., & Fang Lee, C. (2016). Consideration of the Maximum Impact Force Design for the Rock-Shed Slab. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 6(2).
<https://doi.org/10.4172/2167-0587.1000169>
- Nasery, M. M., & Çelik, M. (2020). Kaya Islahi Çalışmalarında Birleşik Çözümlerin İncelenmesi: Trabzon Kaymaklı Örneği. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(1), 539–554.
<https://doi.org/10.17482/uumfd.680226>
- Öztürk, M. Z., Utlu, M., & Şimşek, M. (2022). UAV based 3D modeling analysis in determining and preventing rockfall hazard: A case study from Murtaza Village (Niğde, Turkey). *Yerbilimleri/ Earth Sciences*, 43(2), 182–196.
<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1021032>
- Pekak, M. S., & Soykan, A. N. (2013). Aksaray, Belisırma Village, Karagedik Church. *Journal of Faculty of Letters Cilt*, 30(1), 199–226.
- Polat, A. (2020a). 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>
- Polat, A. (2020b). 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>

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of Rockfall and Its Control. In *Highway Research Record 17, Stability of Rock Slopes, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, 13–28.

Sari, M. (2022). Evaluating rockfalls at a historical settlement in the Ihlara Valley (Cappadocia, Turkey) using kinematic, numerical, 2D trajectory, and risk rating methods. *Journal of Mountain Science*, 19(12), 3346–3369.

<https://doi.org/10.1007/s11629-022-7412-8>

Sari, M., & Çömllekçiler, F. (2007). Kizilkaya İğnimbiritlerinde Görülen Süreksizliklerin İncelenmesi ve Kaya Kütlesinin Tanımlanması. *J. Fac. Eng. Arch. Selcuk Univ.*, 22(1), 207–216.

<https://izlik.org/JA64MF24NH>

Tang, M., Mei, X., Li, Y., Chen, C., Liu, X., & Lu, H. (2024). Application of oblique photogrammetry technique in geological hazard identification and decision management. *Earthquake Research Advances*, 4(3), 100269.

<https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100269>

Ulamis, K. (2026). Evaluation of protective measures against rockfall hazard with 3D analysis (Mardin Castle, Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 85(2), 1–18.

<https://doi.org/10.1007/s10064-025-04761-7>

Ündül, Ö., Nasery, M. M., Doğu, M. M., & Zengin, E. (2026). Assessment of a Weathering-Induced Rockfall Event and Development of Minimal-Intervention Mitigation Strategies in an Urban Environment. *Applied Sciences*, 16(2), 1045.

<https://doi.org/10.3390/app16021045>

Varol, O. O., Akin, M., Dinçer, İ., & Orhan, A. (2026). Characterization of rockfalls in Cappadocia region (Türkiye) by empirical and 3-Dimensional methods. *Journal of Mountain Science*, 23(1), 203–220.

<https://doi.org/10.1007/s11629-025-9941-4>

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - A review. İçinde *Natural Hazards and Earth System Science* (C. 11, Sayı 9, ss. 2617–2651).

<https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>

Zengin, Ü. B., & Ulamiş, K. (2025). Investigation of the Effect of Block Geometry in Three-Dimensional Rockfall Analyses (Gölbaşı, Ankara). *Jeoloji Muhendisliği Dergisi*, 49(2), 137–156.

<https://doi.org/10.24232/jmd.1728155>

İnternet kaynakları

1- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Türkiye'nin İklimi, <https://mgm.gov.tr>, (05.04.2026)

2-<https://webdosya.csb.gov.tr/db/tabiati/editordosya/ihlara.pdf>, (01.04.2026)

3-<https://www.dji.com/support/product/matrice-300>, (01.04.2026)

4-<https://enterprise.dji.com/zenmuse-p1>, (01.04.2026)

5-Dorren, L.K.A., Rockyfor3D (v4.0) – Transparent Description of the Complete 3D Rockfall Model, <https://ecorisq.org/publications/toolsmanuals/rockyfor3d-user-manual>, (01.04.2026)