

# QGIS-Qproto yazılımı ile Konik Temelli 3 Boyutlu Kaya Düşme Modellemesi: Mazı Köyü Örneği-Nevşehir (Ürgüp)

Mustafa Utlu<sup>1,\*</sup>, Mehmet Fatih Akgümüş<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 12000, Bingöl.

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, 06000, Ankara.

## Özet

Bu çalışma, kaya düşme olaylarının yoğun olarak meydana geldiği Nevşehir ili'nde Derinkuyu ve Ürgüp ilçelerine yakın Mazı Köyü kuzeyinde ve Güneyce Köyü yolu'na 1,34 km mesafede bulunan sahanın yüksek çözünürlükte İHA-SAM verisi kullanılarak bir QGIS eklentisi olan Qproto kullanarak üç boyutlu (3B) konik temelli kaya düşme modellemesini kapsamaktadır. Çalışma sahasında kaynak zonlara karşılık gelen volkanik kökenli ignimbritler, özellikle kornişlere karşılık gelen yüksek eğimli dik bir yamaç profiline sahiptir. Bu bakımdan, düşeye yakın süreksizliklerin olduğu ignimbritlerde yoğun olarak görülen soğuma çatlaklarına (düşey süreksizlikler) sahip yapıdaki kaya kütlesi içerisinde 16 adet düşme ihtimali olan kaya bloğu tespit edilmiş, bunlara ait kaya düşme modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonuçlarına göre, maksimum 142 kJ kinetik enerji ve 16.8 m/s ötelenme hızına sahip kaya düşmeleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, saha sınırları içerisinde yer alan düşme modelinin maksimum değerlere, genel olarak yüksek eğim değerlerinin olduğu alanlarda ulaşılmış olup, mevcut gravitasyonel durumun, özellikle eğimin azaldığı noktalarda kaya bloklarının enerjilerinin ve hızlarının sönmüldüğü gözlemlenmiştir. 5 sınıfta kaya düşme duyarlılık derecesi oluşturulmuş, özellikle kaya düşmeleri sonucunda düşen blokların saçıldığı ve yayılış gösterdiği yörüngelerin daha çok orta- yüksek ve çok yüksek duyarlılıkta sınıflara karşılık geldiği gözlemlenmiştir.

## Anahtar Sözcükler

Nevşehir, Kaya Düşmesi Modellemesi, Tehlike ve Risk, Duyarlılık, Qproto

## Conic-Based 3D Rockfall Modeling with QGIS-Qproto Software: A Case Study of Mazı Village, Nevşehir (Ürgüp)

### Abstract

This study focuses on the high-resolution 3D cone-based rockfall modeling using Qproto, a QGIS plugin, based on UAV-DSM data in an area near Mazı Village, located north of Derinkuyu and Ürgüp districts in Nevşehir province, where rockfall events occur intensively. The volcanic ignimbrites corresponding to the source zones in the study area have steep and vertical slope profiles, particularly resembling cornices. Therefore, 16 rock blocks with a potential for rockfall were identified within the rock mass structure characterized by cooling cracks (vertical discontinuities) commonly observed in ignimbrites where discontinuities near the vertical occur. Rockfall modeling was performed for these identified blocks. According to the modeling results, rockfalls with a maximum kinetic energy of 142 kJ and a displacement velocity of 16.8 m/s were determined. Based on these results, the maximum values of the rockfall model within the study area were generally reached in areas with high slope values, and it was observed that the energies and velocities of rock blocks attenuated at points with decreased slope, indicating the influence of the existing gravitational condition. Rockfall susceptibility degrees were categorized into five classes, and it was observed that the trajectories of fallen blocks, resulting from rockfalls, corresponded mainly to the moderate-high and high susceptibility classes, where they were scattered and dispersed.

### Keywords

Nevşehir, Rockfall Modeling, Hazard and Risk, Susceptibility, Qproto

## 1. Giriş

Kaya düşmesi olayı, eğimli topoğrafyada antropojenik, çevresel ve yapısal faktörlere bağlı olarak serbest hale gelen kaya bloklarının, gelişen yer çekimi boyunca ani ve hızlı bir şekilde hareket etmesi durumudur (Ritchie 1963; Volkwein vd. 2011; Nanehkaran vd. 2022). Kaya düşme olaylarının yoğun bir şekilde meydana geldiği sahaların başında yüksek eğimli dik rölyefe sahip topografyalar gelmektedir. Jeomorfolojik açıdan yüksek eğime ve dik yamaçlara sahip olan dağlık bölgelerde gerçekleşen kaya düşme olayları, çok büyük zararlara neden olduğu gibi zaman zaman can kayıplarına da yol açmaktadır (Fratini vd. 2008; Alemdag vd. 2022a). Fakat, bu dağlık bölgelerde eğimin azaldığı sahalar, her geçen gün artmaya devam eden nüfus potansiyeli nedeniyle, insanların giderek artan ve genişleyen yerleşme talebi doğrultusunda yerleşim alanları için önemli ve çekici bir hal almıştır (Alemdag vd. 2022b).

\* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (426) 2160031 Faks: +90 (426) 2150877

E-posta: utlumus@gmail.com (Utlu M), fatihsungur510@gmail.com (Akgümüş M.F)

Gönderim Tarihi / Received : 05/05/2023

Kabul Tarihi / Accepted : 20/07/2023

Kaya düşmelerine neden olan kaya kütleleri, küçük bir tane boyutundan, çok büyük bloklara kadar değişkenlik göstermekte, çok farklı hacim ve geometriye sahip te olabilmektedir. Buna rağmen, çok küçük boyutta kaya blokları ile meydana gelen kaya düşme olayı, özellikle ulaşım koridorlarında yüksek hareket kabiliyeti ve açığa çıkan enerjileri dolayısıyla, daha büyük problemlere yol açabildiği gibi aynı zamanda ölümle sonuçlanan afetlerin de ortaya çıkmasına sebep olurlar. Bu durum kaya bloklarının geometrik özellikleri, yamaç pürüzlülük katsayısı, geri verme karakteristiği, dağılma durumu, dinamik sürtünme potansiyeli gibi durumlara bağlı olarak açıklanabilmektedir (Crosta ve Agliardi 2003; Antoniou ve Lekkas 2010).

Ulaşım yolları üzerinde meydana gelen kaya düşme olayları, kaya düşme duyarlılıkları açısından oldukça dikkat çeken ve fazlasıyla çalışılan alanların başında gelmektedir. (Cloutier vd. 2016; Ovreiu vd. 2019; Alvioli vd. 2021). Çünkü, doğal ve insan eli ile inşa edilmiş ulaşım koridorlarında ortaya çıkan şevler kaya bloklarının yer aldığı yamaç ve şevlerde süreksizliklere bağlı duraysızlıklar sonucunda kaya düşmesi için önemli bir tehlike arz etmektedir. Bu nedenle, kaya düşme olayına neden olan potansiyel tehlike ve risk teşkil eden kaya bloklarının kaynak alanlarının belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, bu alanlar üzerinde mühendislik açısından doğru ve güvenilir altyapıların temini ve inşası, mevcut problemin yönetimi ve ortaya çıkabilecek sorunu azaltmak için büyük rol oynamaktadır (Cloutier vd. 2016; Giordan vd. 2021). Böylece, kaya düşmeleri nedeniyle oluşabilecek risk durumunun anlaşılabilmesi ve değerlendirilebilmesi için yüksek tehlike ve risk teşkil eden sahaların kaya düşme analizlerinin, özellikle kaya bloklarının, hakim süreksizliklerin ve mevcut yenilme türlerinin belirlenmesi, ayrıca modellenmesi gerekmektedir. Çünkü, olası düşme durumu ile karşı karşıya olan kaya bloklarının modellenmesi, oluşabilecek riskin boyutunun anlaşılabilmesi için, kaynak alan, kinetik enerji (kJ), sıçrama yüksekliği (m), hız (m/s), birikim ve depolanma alanları, yörüngelerini tespit etmek açısından büyük önem taşır (Crosta vd. 2015; Alemdag vd. 2022b; Yan vd. 2023).

Türkiye sahip olduğu jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel koşulları nedeniyle ve ortalama yükseltisi oldukça fazla olan dağlık ülkelerden biri olmasından dolayı, kütle hareketlerinin önemli bir tipi olan kaya düşme olaylarının aktif olarak yaşandığı ülkelerden biridir (Ergünay 2007; Utlu vd. 2020). 1950-2008 yılı arasındaki periyotta gerçekleşen kaya düşme olayları sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak Karadeniz Bölgesi, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi kaya düşme olaylarının en yoğun yaşandığı bölgelerin başında gelmektedir. Nevşehir, Niğde, Kayseri, Erzincan illeri ise bu bölge sınırları içerisinde yer alan, kaya düşme olaylarının en fazla gerçekleştiği iller olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yıllar arasında gerçekleşen kaya düşme olay sayısı 2956, etkilenen toplam afetzedede sayısı 19.422 olup, etkilenen yerleşim birim sayısı 1703 iken, toplam yerleşim birimine oranı ise %4.76'dır (Taşdemiroğlu 1970; Ergünay 2007; Gökçe vd. 2008; AFAD 2015).

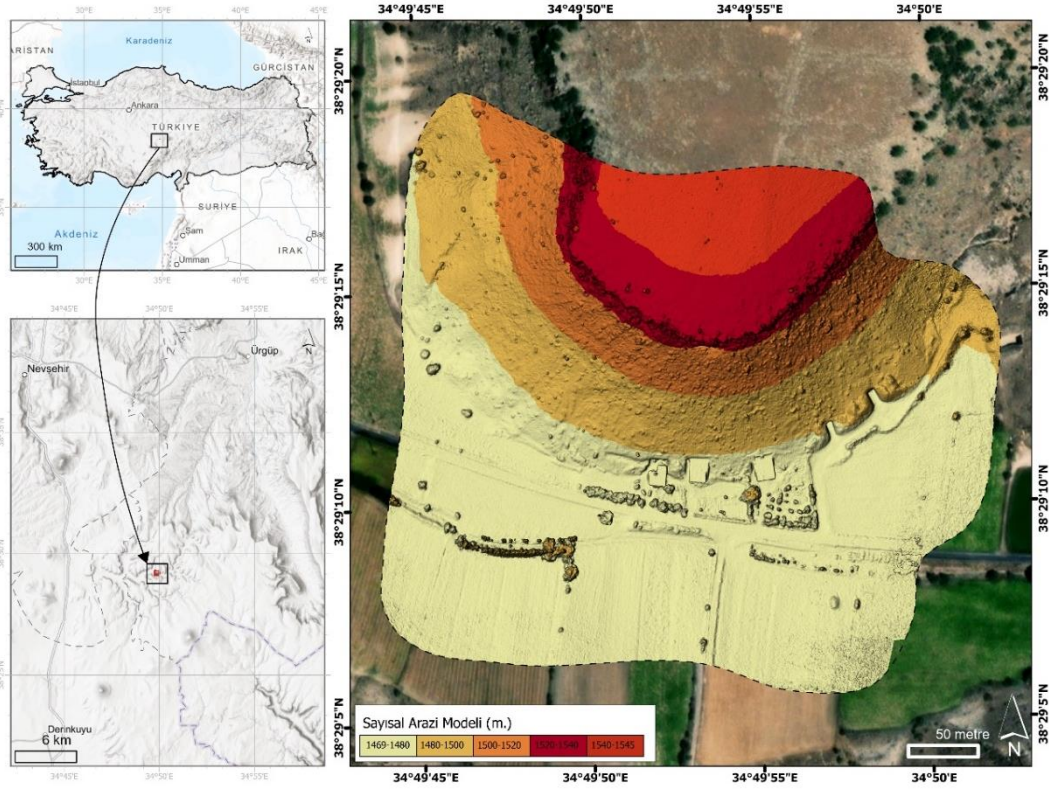
Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi, Nevşehir ili, Ürgüp ilçesine bağlı Güneyce Köyü yolu üzerinde bulunan ve kaya düşme duyarlılığı açısından aktif bir bölge olan Mazı Köyü'ndeki Teknecik Sırtı çalışma alanı olarak seçilmiştir. Üç boyutlu (3B) kaya düşme modellemesinin yapıldığı bu çalışmada, İnsansız Hava Aracı ile oluşturulmuş-Sayısal Yüzey Modeli (İHA-SYM) temel veri setini oluşturmaktadır ve modelleme kapsamında QGIS-Qproto (konik modelleme temelli) eklentisi kullanılmıştır (Castelli vd. 2021). Ayrıca, kaya düşmelerine kaynaklık eden alanlarda süreksizliklerin eğim ve yönelim ölçümleri yapılmış ve bu ölçümler sonucunda kinematik analizler ile kaya bloklarının olası yenilme türleri belirlenmiştir.

## 2. Çalışma sahası

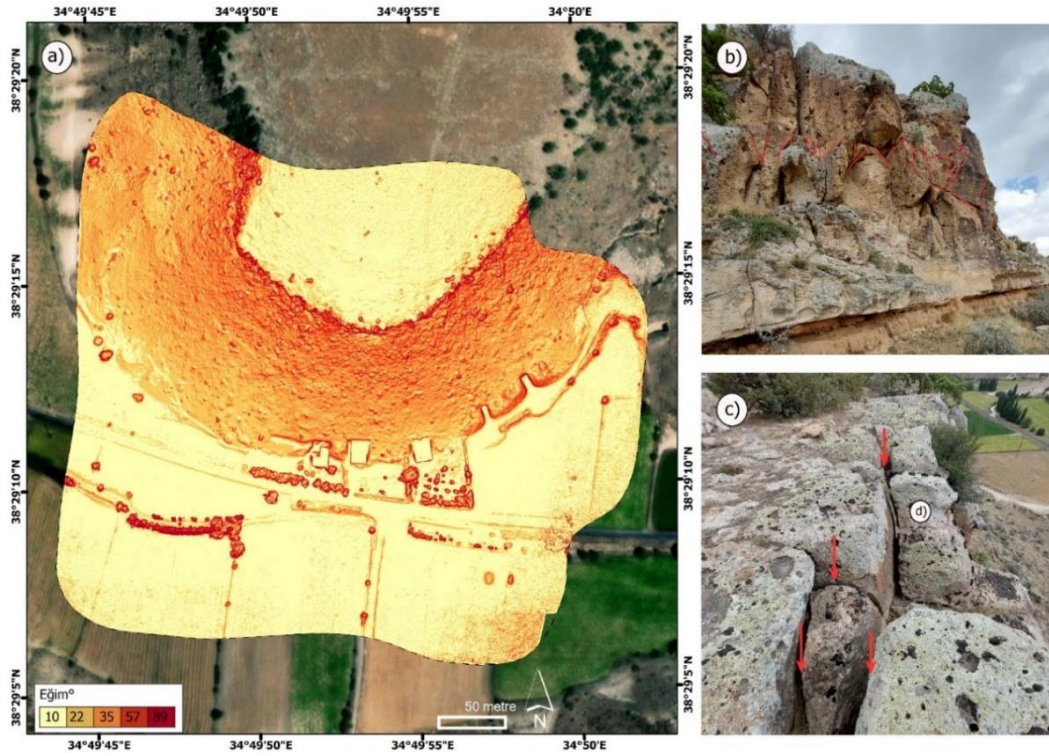
Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde Nevşehir ili, Ürgüp İlçesine bağlı ve Derinkuyu ilçesi yakınlarında Mazı Köyü kuzeyinde ve Güneyce Köyü yoluna 1,34 km mesafede bulunan, 34°49'45"-34°49'43" doğu boylamları, 38°29'18"-38°29'6" kuzey enlemleri arasında yer alan çalışma sahası (Şekil 1) 17 hektar bir alan kaplamaktadır. 1469-1545 m'ler arasında değişen yükseltisi ile ortalama 15°'lik bir eğime, kaynak alan eğimleri ise >80 derece üzerinde olan oldukça yüksek eğimlere sahip bir röllyefe sahiptir (Şekil 2a). Çalışma sahası ve yakın çevresine ait genel litolojik yapı, volkanik kökenli kayalardan oluşan, daha çok dikey çatlaklı ignimbirit ve tüflerden meydana gelmiştir. Çalışma sahası ve yakın çevresine ait genel jeolojik formasyonları Ürgüp Formasyonu ve farklı derecelerde kaynaşmaya sahip ignimbiritlerden meydana gelen İncesu Üyesi oluşturmaktadır ve bu ignimbiritler yaklaşık 10 m kalınlıkta oldukça iyi derecede oluşmuş ve kaynak zonlarını meydana getiren önemli birimlere karşılık gelmektedir (Akin vd. 2022). Kaya düşmelerinin meydana geldiği yamaçlar ise genel olarak, yüksek eğime sahip kornişler üzerinde gelişen, dikey olarak uzanım gösteren, daha çok düşey soğuma çatlakları ile bir paralellik oluşturan aşınmaya karşı uygun bir litolojide olan ignimbiritlerde görülmektedir (Şekil 2b-c-d). İgnimbirit çatlaklarında ve hemen eteğinde oluşan meşe ağaçları zamanla çatlaklar üzerinde etkili olmakta ve kaya düşmesine karşı, alanın duyarsızlığının artmasına ayrıca neden olmaktadır. İnceleme alanında dik yamaç boyunca çok sayıda askıda ve serbest duran blok vardır (Şekil 3a-b-c-d-e-f-g). İgnimbiritlerin hemen topuk kısmında ise bir sedimanter birim yer almaktadır ki bu da aşınmayla beraber oluşturacağı oyulma, kaya bloklarının serbest kalmasına ve düşmesine neden olmaktadır. İklim özelliklerinin de kaya düşme olayları üzerinde önemli bir etken olduğu çalışma sahası Köppen-Geiger iklim sınıflandırması kapsamında "BSK" yani yarı kurak karakteristikte iklim özelliklerine sahiptir (Öztürk vd. 2017). Çalışma sahasının bulunduğu bölgenin, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'ne (2021) göre yapılan envanter çalışmasında, Derinkuyu ve Ürgüp ilçelerinde kaya düşme riskinin mevcut olduğu, Güneyce ve Mazı köylerinin de yer aldığı birçok noktada kaya düşmesi ihtimaline karşı etüt raporları hazırlandığı, yerleşim yerleri için kaya düşmelerine karşı çalışmalar yapıldığı bildirilmiştir.



Buna göre, Nevşehir İl Afet Müdürlüğü'nce Nevşehir il sınırları içerisinde kaya düşmesi olayları ile alakalı toplamda 164 adet jeolojik etüt raporu hazırlanmış, bu raporlardan 4 adet Derinkuyu ilçesinde, 65 adet Ürgüp ilçesinde oluşturulmuştur (AFAD 2021).

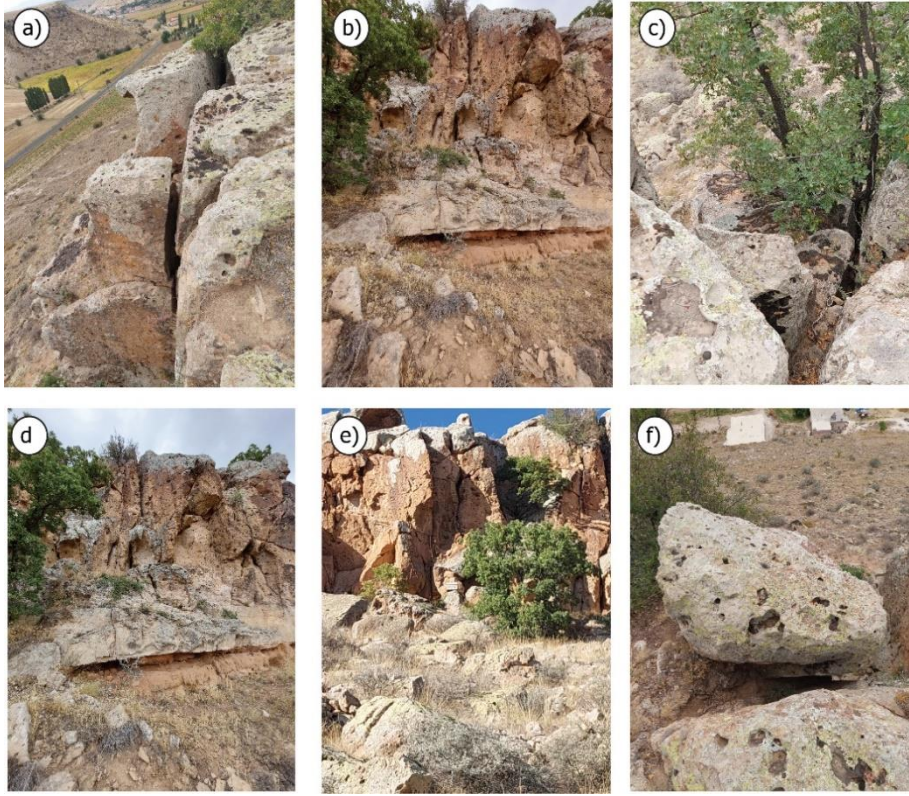


Şekil 1: Çalışma sahası lokasyonu



Şekil 2: a) Çalışma sahası eğim özellikleri b) kaya düşmelerine ait kaynak zonlarda gözlemlenen ignimbiritle oluşan süreksizlik yönelimleri ve c) düşey soğuma çatlakları d) düşme potansiyelinde sütunsal bir ignimbirit bloğu





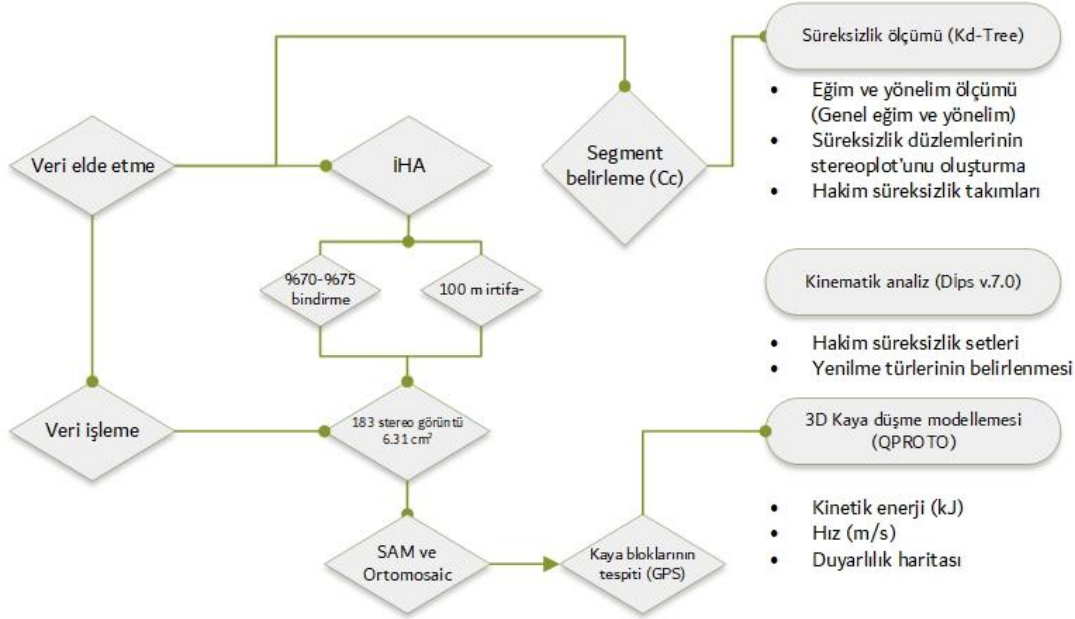
Şekil 3: Kaya bloklarının serbest kalması durumu

### 3. Veri ve Yöntem

Kaya düşmelerine ait yüzeylerin kantitatif açıdan 3B yüksek doğrulukta ve hassasiyette modellenmesinde farklı veri kaynaklarından elde edilen yüksek çözünürlükte ve yersel doğrulukta üretilmiş sayısal yüzey modeli (SYM) yada yüzey modelleri (SYM) kritik rol oynamaktadır (Žabota vd., 2019; Öztürk vd., 2022; Bounab vd. 2022). Çünkü, modelleme sonucunda, kaya bloklarının ilerleme yörüngeleri, bu blokların, kinetik enerji, sıçrama yüksekliği, hız ve rölyefe bağlı yüzeyle teması sırasında ortaya çıkan profil, kaya düşmelerine ait oluşabilecek tehlike ve riskler açısından gerekli aksiyonların alınabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Agliardi ve Crosta 2003; Matas vd. 2017). Bu nedenle, kaya düşmeleri çalışmalarında yüksek çözünürlükte SAM-SYM verileri büyük önem taşır. 3B modellemeler coğrafi bilgi sistemleri (CBS) temelli gerçekleştirilen yerbilimlerinde aktif olarak kullanılan ve kaya düşme modellemelerinde tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü, kaya bloklarının, mevcut arazi koşullarındaki davranışlarının (serbest düşme, yuvarlanma, sıçrama, kayma) anlaşılmasında ve güvenilir kaya düşme modellemelerinin gerçekleştirilmesinde avantaj sağlamaktadır (Chen vd. 2013).

Bu çalışmada, yüksek çözünürlükte İHA-SYM verisi kullanılarak konik metod temelli QGIS-Qproto (<https://plugins.qgis.org/plugins/Qproto/>) yazılımı ile 3B kaya düşme modellemesini kapsamaktadır. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan iş akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre; öncelikle gerek Nevşehir İl Afet Müdürlüğü kaya düşmelerine duyarlı alanlar envanter verilerinden gerekse arazi gözlemlerine dayalı olarak kaya düşmelerinin olduğu bir örnek çalışma alanı belirlenmiştir.

- Arazi çalışması ile İHA uçuşu ile stereo görüntüler toplanmış, fotogrametrik yöntemler ile çalışma alanına ait Yoğun Nokta Bulutu, Sayısal Yüzey Modeli (SYM), ve ortomozaik verileri elde edilmiştir.
- Bu verilerden nokta bulutu verisi kullanılarak CloudCompare yazılımında aktif kaynak alanlar segmentlere ayrılarak her bir segment için eğim ve yönelim ölçümü yapılmıştır. Eğim ve yönelim ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde Matlab temelli çalışan DSE (Sürekli yüzeylerin çıkarımı) eklentisi kullanılmıştır. DSE ile süreksizlik düzlemlerinin stereoplot'u oluşturulmuş ve hakim süreksizlik takımlarına ait eğim ve yönelimleri belirlenerek kinematik analiz için girdi verisi hazırlanmıştır.
- Yine eğim, yönelim ve ayrıca sürtünme açısı da kullanılarak Dips yazılımında her segmentin hakim süreksizlik setleri belirlenmiş ve her segment için kinematik analiz yapılmıştır.
- Daha sonra gerek arazi gözlemleri gerekse ortofoto verisinden yararlanarak aktif kaynak alanında düşme duraysızlığı olan 16 adet nokta belirlenmiş ve işaretlenmiştir.
- Bu işaretlenen noktaların bilgileri QGIS 3.16 Yazılımında açılan bir GeoPackage katmanı oluşturularak buraya eklenmiş ve Qproto eklentisi için girdi oluşturulmuştur.
- QGIS-Qproto ile düşme ihtimali olan kaya bloklarının 3B olarak modellenmesini yapılmıştır.



Şekil 4: Çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan genel iş akış şeması

### 3.1. Fotogrametrik analizler İHA-SYM üretimi

Fotogrametrik proses kaya düşme çalışmalarında, yüksek çözünürlükte güncel rölyef verisinin üretilmesinde en önemli aşamalardan birini oluşturur. Çünkü, modellemesi yapılacak arazi yüzeyinin detaylı ve güncel SYM verisinin kullanılması, oluşturulacak modelin hassasiyeti ve yüksek doğruluğu açısından önem taşır. Bu çalışmada, gerekli yüzey verisi için DJI Phantom-4 İHA kullanılmış, drone'a ait detay bilgisi Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre, SYM verisi elde edilecek sahada, çalışma alanı yaklaşık 17 hektar, 100 m uçuş yüksekliğine sahip, toplamda %70'e %75 enine ve boyuna bindirme açısına sahip 183 stereo görüntü toplanmıştır. Görüntülerin işlenmesi sonucunda ise 6.31 cm<sup>2</sup> çözünürlükte SYM verisi elde edilmiştir. Uçuş planlamasında Pix4D deneme sürümü, görüntülerin işlenmesinde ise Agisoft Metashape Pro v.1.8.3. yazılımı tercih edilmiştir. Çalışma alanına dair Yoğun Nokta Bulutu, Sayısal Yüzey Modeli (SYM), ve Ortomosaik verileri elde edilmiştir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan DJI Phantom-4 Pro+ İHA teknik özellikleri

Genel	Performans	Kamera	Pil
350 mm (pervanesiz)	Azami Hız 72 km/s	3 eksenli gimbal	Lityum polimer
Toplam ağırlık: 1388 gr	Maks uçuş süresi: 30 dk	20 mp 4096*2160	5870 mAh
	Maks alçalma hızı: 4/ms		100w
	Maks yükselme hızı: 6/ms		

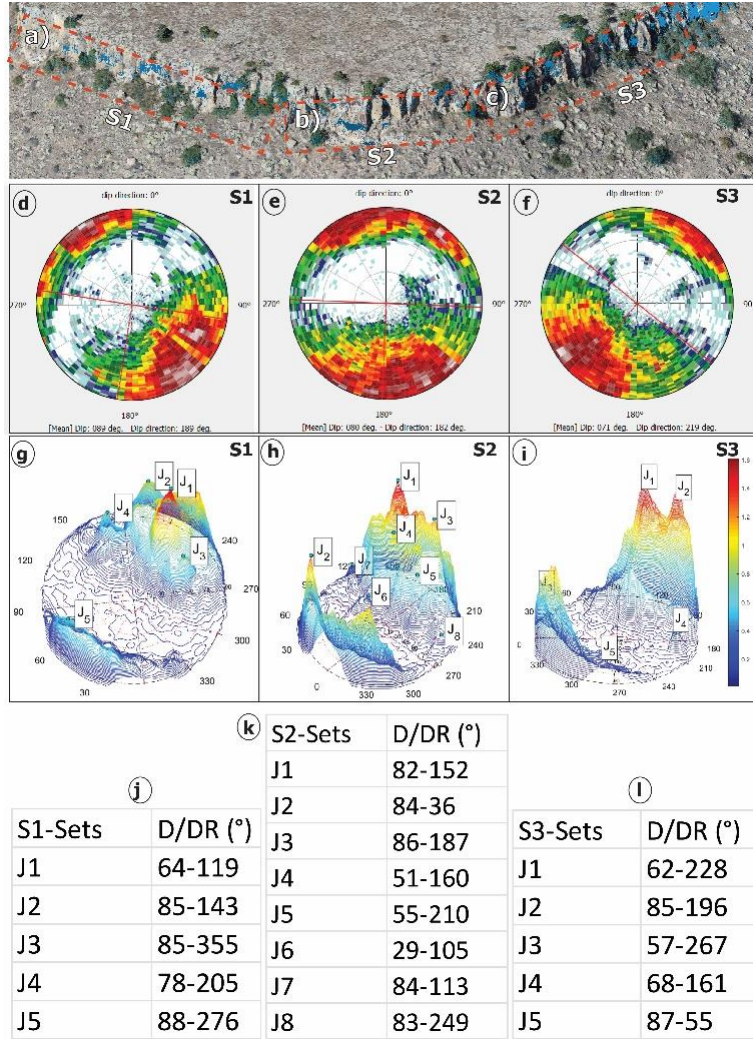
### 3.2. Kaya düşmesi kaynak alanlarında süreksizliklerin ölçümü ve kinematik analizi

Kaya kütlesi içinde yer alan hâkim süreksizlik setlerinin incelenmesinde süreksizlik yönelimi ve eğimi önem taşımaktadır. Günümüzde süreksizliklerin yöneliminin tespiti ile alakalı birçok yöntem geliştirilmiştir. Arazi çalışmaları ve modern teknolojik ve yer bilim çalışmalarında önemli bir platform haline gelen İHA-“Drone” (İnsansız Hava Aracı), LİDAR ve TLS (Yersel Lazer Tarayıcı) ile üretilmiş nokta bulutu verileri üzerinden bir takım yazılımlar kullanılarak süreksizlik yönelimleri tespit edilebilmektedir (Singh vd. 2022; Lukačić vd. 2023). Bunlardan birisi de Daniel Girardeu tarafından yazılmış olan açık-kaynak kodlu bir yazılım olan CloudCompare (CC)'dir (URL-1 2023). CloudCompare, yoğun nokta bulutu ve mesh modellerin düzenlenip işlenebildiği bir yazılımdır.



Genellikle farklı teknikler kullanılarak elde edilen nokta bulutları arasında kıyaslama yapabilmek amacıyla kullanılmaktadır (Sarıtürk ve Şeker 2017). Thiele vd. (2017) tarafından CC Yazılımı için nokta bulutundan süreksizlik yöneliminin çıkartılması amacıyla Kd-tree eklentisi geliştirilmiştir. Bu eklenti süreksizlik yüzeylerine ait nokta bulutu verisi üzerinden doğrudan bütün hatların model üzerinden ölçümü için kullanılmıştır.

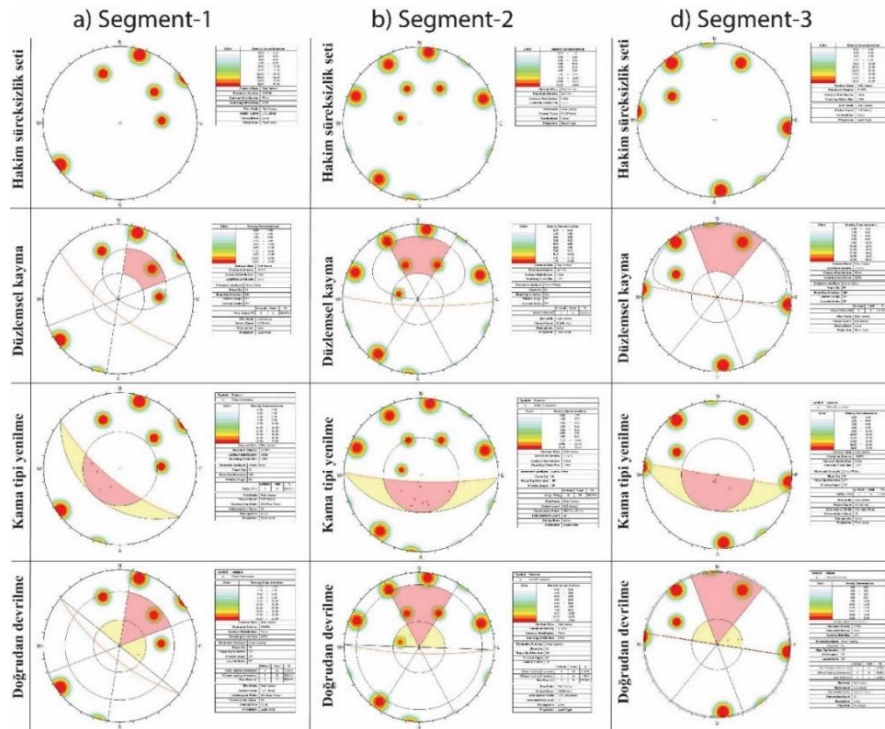
Qproto eklentisi için gerekli olan bir parametre de yönelimdir. Çünkü eklenti her bir nokta için verilen yönelim girdileri doğrultusunda bir üçgensel koni boyunca kaya düşmesi yayılım alanlarını görünürlük analizi yaparak hesaplamaktadır. Bu yüzden gerçeğe yakın temsil gücü yüksek yönelim verileri girmek önemlidir. CC yazılımında kaya düşmesi kaynak alanları segmentlere (bölümlere) ayrılarak her bir segment boyunca Kd-tree eklentisi kullanılarak önce facet verileri elde edilmiş ve her bir segmentin genel yönelimi ve ortalama eğimi belirlenmiştir. Belirlenen eğim ve yönelimlerin stereonet görünümü oluşturulmuştur. Daha sonra bu veriler DSE (Discontinuity Set Extractor) Yazılımına aktarılarak her bir segment boyunca ulaşılabilecek süreksizlik yüzeyleri de dahil süreksizliklerin eğim ve yönelimi otomatik olarak ölçülmüş ve yoğunluğu en yüksek olan süreksizlikler seçilerek hakim süreksizlik takımları belirlenmiştir. Bunun sonucunda süreksizliklerin eğim ve yönelim verileri kinematik analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla dips yazılımı için girdi oluşturulmuştur (Şekil 5 a-b-c-d-e-f-g-h-i-j-k-l). Buna göre, süreksizlik setlerine ait değerler Segment-1'de (S1) 89° eğim, 189° yönelim, Segment-2'de (S2) 80° eğim, 182° yönelim, Segment-3'te ise 71° eğim, 219° yönelim açısı bulunmaktadır (Şekil 5 d-e-f). Ayrıca, segmentlere ait yoğunluğu yüksek olan süreksizlik takımları, Segment-1'de 5 adet, Segment-2'de 8 adet, Segment-3'te ise 5 adet çıkmıştır (Şekil 5 g-h-i). Segment-1 ve 2'de kaya bloklarının mevcut hâkim yönelimleri doğu batı doğrultusunda iken, Segment 3'te bu yönelim yaklaşık olarak kuzeybatı-güneydoğu doğrultusundadır. Minimum ve maksimum eğim değerleri Segment-1'de 64-88° arasında, eğim yönü 119-355° arasında, Segment-2'de eğim değerleri 29-86°, eğim yönü 36-249°'dir. Segment-3'te ise eğim 57-87° arasında, eğim yönü 55-267°'dir. (Şekil 5 j-k-l).



Şekil 5: a-b-c) Kaynak zonalara ait segmentler belirlenmesi, d-e-f) segmentlere ait genel eğim ve yönelim değerleri ve stereonet görünümü, g,h,i) seçilen segmentlerde DSE yazılımı kullanılarak çıkarılan süreksizlik düzlemlerinin stereoplot'u (Riquelme vd. 2014), j-k-l) segmentlere ait yoğunluğu yüksek olan süreksizlik takımları (D= eğim, DR=yönelim)

Kaya blokları üzerinde gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, kaya kütlelerinde var olan mevcut mekanik davranış, kaya bloklarının üzerinde birbirini kesen hâkim süreksizliklere bağlı olarak düzlemsel kayma, kama tipi yenilme, devrilme türleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Akin vd. 2020). Böylece kinematik analizler yamaçlar ya da şev yüzeylerinde bulunan kaya bloklarının duraysızlıklarının anlaşılması açısından önem taşır.

3 farklı segment üzerinde, nokta bulutu verisine bağlı yapılan süreksizlik ölçümleri ile elde edilen kinematik analiz sonuçları, farklı yenilme türlerine göre Şekil 6'da verilmiştir. Analizler için gerekli olan parametrelerden ilki süreksizliklerin sürtünme açısıdır. Çalışma alanında hâkim olan litoloji ignimbiritlerdir. İgnimbiritlerin sürtünme açısı  $38^\circ$  olarak kabul edilmiştir. Farklı ignimbirit sahalarında çalışmış olan, Binal (1996)'ın gerçekleştirdiği kinematik analizlerde kullanılan sürtünme açısı,  $34^\circ$  ile  $37^\circ$  arasında değişmektedir. Moon (1993), özellikleri farklı olan çok sayıda ignimbirit örneğinin jeoteknik özelliklerini ortaya koymuştur. Ona göre ignimbiritlerin sürtünme açısı,  $32^\circ$  ve  $38^\circ$  arasında değişmekte ve bu değerler arazi koşullarına bağlı olarak birkaç derece artıp azalabilmektedir (Moon 1993). Bundan dolayı sürtünme açısı  $38^\circ$  olarak alınmıştır. Segment 1 üzerinde yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre, düzlemsel kayma %20, kama tipi yenilme %50 ve devrilme tipi yenilme olasılığı ise %20 dir. Segment 2 üzerinde yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre, düzlemsel kayma %25, kama tipi yenilme %35.7 ve devrilme tipi yenilme olasılığı ise %37.5'dir. Segment 3 üzerinde yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre ise, düzlemsel kayma %20, kama tipi yenilme %50 ve devrilme tipi yenilme olasılığı ise %20'dir (Tablo 2).



Şekil 6: Hâkim süreksizlik setleri ve 3 farklı segment üzerinde kama tipi yenilme, doğrudan devrilme ve düzlemsel kayma türlerine ait analizler

Tablo 2: Segmentler boyunca meydana gelebilecek yenilme türlerinin oransal dağılımı.

Segment No	Düzlemsel kayma	Kama tipi yenilme	Doğrudan devrilme
S1	%20	%50	%20
S2	%25	%35.7	%37.5
S3	%20	%50	%20

Segment 1 içinde 5 ayrı hâkim süreksizlik takımı vardır. Yapılmış olan kinematik analiz sonucuna göre bu süreksizliklerde düzlemsel kayma, kama tipi ve devrilme türü duyarsızlık görülür. Segment 2 içinde 8 ayrı hâkim süreksizlik takımı vardır. Yapılmış olan kinematik analiz sonucuna göre bu süreksizliklerde düzlemsel kayma, kama tipi ve devrilme türü duyarsızlık görülür. Segment 3 içinde 5 ayrı hâkim süreksizlik takımı vardır (Şekil 6). Yapılmış olan kinematik analiz sonucuna göre bu süreksizliklerde düzlemsel kayma, kama tipi ve devrilme türü duyarsızlık görülür. Kinematik analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, hemen hemen tüm segmentlerde düzlemsel kayma, kama tipi ve devrilme tipi duyarsızlık görülür. Ancak kama tipi duyarsızlık çalışma alanında oransal olarak daha çok kaydedilmiştir. Bunda şev yüzeyi boyunca birbirini kesen birden fazla süreksizliğin bulunması ve şev eğiminin yüksek olması etkili olmuştur.



### 3.3. QGIS-Qproto Üç boyutlu (3B) kaya düşme modellemesi

Çalışmada, 3B modellemenin gerçekleştirilmesinde QGIS-Qproto eklentisi kullanılmıştır. Qproto açık kaynak kodlu bir yazılım-ekenti olup, QGIS yazılımı ile 3B kaya düşme modelleme yapılmasına imkan tanıyan konik temelli bir kaya düşme eklentisidir (Jaboyedoff ve Labiouse 2011; Castelli vd. 2021). Konik yöntemin Qproto eklentisi ile uygulanması, yamaç özellikleri (geometri, orman örtüsü yoğunluğu yada varlığı vb.) ve kaya blok özellikleri (şekil, hacim) gibi birkaç parametrenin (konik açıları) tanımlanmasını gerektirir. Bu tür parametrelerin eklenmesi kaya bloğunun düşmesi sonucunda yayılma mesafesini güçlü bir şekilde etkiler (Leine vd. 2014; Wegner vd. 2021; Castelli vd. 2021). Bu nedenle, tehlike ve risk değerlendirilmesi kapsamında bahsedilen parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir (Castelli vd. 2021). Kaya düşme modellemesinden önce, modelleme yapılacak sahada bir takım işlemler ve değerlerin elde edilmesi gerekmektedir. Kaynak noktasından itibaren sahada konik temelli görülebilirlik potansiyeli, kaya bloğunun eğim yönü, enerji ve yan açısı değerlerinin tespit edilmesi önem taşımaktadır. Çünkü mevcut eğim yönü, enerji ve yan açısı değerleri mevcut görülebilirlik temelinde, maksimum görülebilirlik doğrultusunda maksimum yörüngeyi oluşturmaktadır. Böylece yapılan modelleme kapsamında, kaynak zonlar üzerinde belirlenen noktalarından itibaren modelleme sürecinde elde edilen kinetik enerji (kJ), hız (m/s), sıçrama yüksekliği (m) ve konik temelli yörüngeye bağlı olarak, yörüngede gerçekleşen maksimum kaya düşme durumu duyarlılık verisinin oluşturulması açısından fayda sağlar (Castelli vd. 2021). Castelli vd. (2021)'in Susa Vadisi üzerinde iki farklı lokasyonda yapmış olduğu modelleme kapsamında, Qproto sonuçlarının, Rockyfor3d model sonuçlarına göre daha kapsayıcı olduğunu belirtmiştir. Bu sonuca göre, 2010 ve 2011 yılı gerçekleşen kaya düşme olayına bağlı olarak gerçekleştirilen doğruluk çalışmasında Rockyfor3d sonuçlarının daha sınırlı kaldığı, kinetik enerji değerinin Qproto'da daha yüksek, Rockyfor3d'de daha düşük kaldığını, gerçekleşen kaya düşme alanlarının Qproto yazılımında daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Çalışma sahasında 16 farklı noktada yer alan düşme ihtimali olan kaya blokları belirlenmiş (Şekil 7), bu bloklar için QGIS Yazılımında bir GeoPackage katmanı oluşturularak blokların özneliği işaretlenmiştir. Bu doğrultuda noktaların kimlik numarası, yükseklik, yönelim, ayrılma eğilimi ve kütle gibi özellikleri katmana eklenmiştir (Tablo 3). Burada blokların ortalama kütlesi Agisoft yazılımında 3B Model üzerinde yazılımın ölçüm aracı kullanılarak belirlenmiştir. Diğer özellikler (enerji çizgi açısı, yanal açı gibi) opsiyonel olduğu için herhangi bir değer girilmemiştir. Öznelik bilgileri tanımlandıktan sonra 3B modelleme kapsamında Qproto yazılımı ortamında modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, toplam kinetik enerji (kJ), hız (m-1-s) değerleri gibi yüzey verileri oluşturulmuş, oluşturulan bu sonuçlara bağlı olarak modelleme alanında mevcut kaya düşmesi duyarlılık haritası üretilmiştir.



Şekil 7: Çalışma sahasında düşme olasılığına sahip kaya bloklarına ait konumlar ve kaya bloklarından örnekler



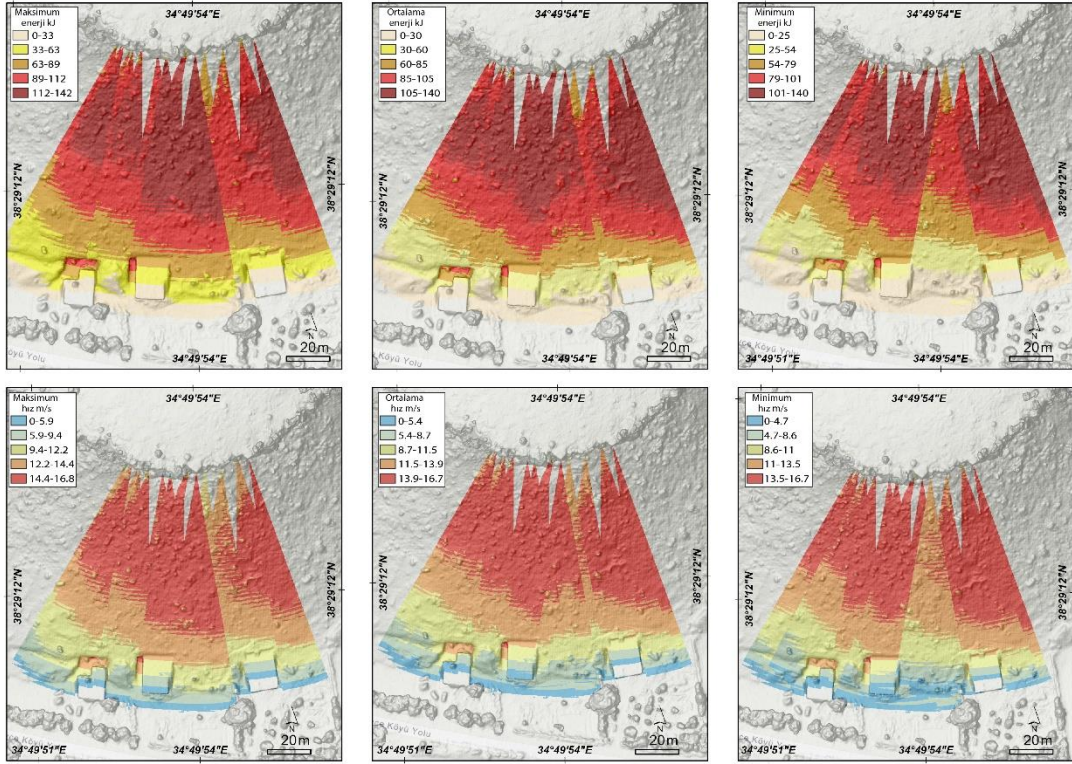
### 3. Bulgular

Qproto aracılığıyla yüksek çözünürlükte veri kaynağına bağlı olarak 16 farklı noktaya ait konik temelli kaya düşme modellemesi, belirlenen herbir noktanın yükseklik, bakı, yanal yayılma açısı, enerji açısı, görüş mesafesi gibi vb., değerlere ait özelliklerin tanımlanması ile birlikte yüksek çözünürlükte SYM verisi kullanılarak modelleme yapılmıştır (Tablo 3). Bu değerlere ait özelliklerin tanımlanmasında *Castelli vd. (2021)*'de yapılan değerlendirmelerden faydalanılmıştır. Buna göre, çalışma sahasında, düşme potansiyelinde farklı geometride olan ignimbirit 16 adet kaya bloğu, 43-88° ortalama potansiyel eğime 1532-1535 m arasında değişen yükseltilerde ve 170-200°'lik yamaç yönelimine sahip özelliktedir (Tablo 3).

Tablo 3: Çalışma sahasında modelleme kapsamında Qproto eklentisi ortamında modelleme için gerekli veri girişleri

fid	NOKTA NO	YÜKSEKLİK	YÖNELİM	AYRILMA İNDEKSİ	KÜTLE (KG)
1	1	1535	170	1	2600
2	2	1533	180	1	2600
3	3	1535	190	1	2600
4	4	1533	190	1	2600
5	5	1532	200	1	2600
6	6	1534	200	1	2600
7	7	1534	200	1	2600
8	8	1534	200	1	2600
9	9	1534	200	1	2600
10	10	1535	170	1	2600
11	11	1533	180	1	2600
12	12	1535	180	1	2600
13	13	1531	180	1	2600
14	14	1535	200	1	2600
15	15	1534	190	1	2600
16	16	1535	180	1	2600

16 adet düşme olasılığına sahip kaya bloğu modellenmesi ile birlikte, elde edilen sonuçlara bağlı olarak, kaya blokları sahanın genel jeomorfolojik özelliklerine göre davranış göstermiştir. Buna göre, kaynak zonun mevcut sahip olduğu yüksek eğimli dik yamaçlar yaklaşık >80 derece üzerinde bir eğime sahiptir. Bu noktalardan itibaren kaya düşme profilleri yaklaşık 15°'lik eğime kadar düşüş gösteren yamaçlarda sönümlenmektedir (Şekil 8). Böylece, herbir kaya bloğunun düşmesi sonucunda ortaya çıkan enerji ve hız özellikleri, sahanın topografik yada morfolojik koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Özellikle eğimin azaldığı noktalardan itibaren kaya blokları eğimin azalması sonucunda sönümlendiği gözlemlenmiştir. Buna göre, çalışma sahasında, Qproto yazılımı kullanılarak oluşturulan enerji değerleri minimum, ortalama ve maksimum olacak şekilde üç sınıfta ortaya çıkmaktadır. Maksimum enerji dağılışına göre kaya düşmeleri 0-142 kJ arasında, ortalama enerji dağılışına göre 0-140 kJ, minimum enerji dağılışına göre ise 0-140 kJ'dir. (Şekil 8). Düşen kaya bloklarının açığa çıkardığı enerji miktarı 3 farklı değışkende benzer değerlerde olduğu, fakat bu değerlerin daha çok konik modelleme sonucunda ortaya çıkan yayılış üzerinde değışiklik gösterdiği anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar, hız verisi üzerinde de gözlemlenmektedir. Buna göre, çalışma sahasında olası hız değerleri; 0-16.8 m/s maksimum hız, 0-16.7 ortalama ve minimum hız değerleri ortaya çıkmaktadır. Hız ve enerji verilerine göre, ortaya çıkan yüksek tehlike ve risk oluşturan değerler, sahada kaya bloklarının düşmeye başladıkları andan itibaren, özellikle yüksek eğim değerlerinin olduğu alanlarda meydana gelmektedir. Buna rağmen, ortaya çıkan durum kaya bloğunun sönümlendiği noktaya kadar özellikle risk ve tehlike açısından devam etmektedir (Şekil 8).

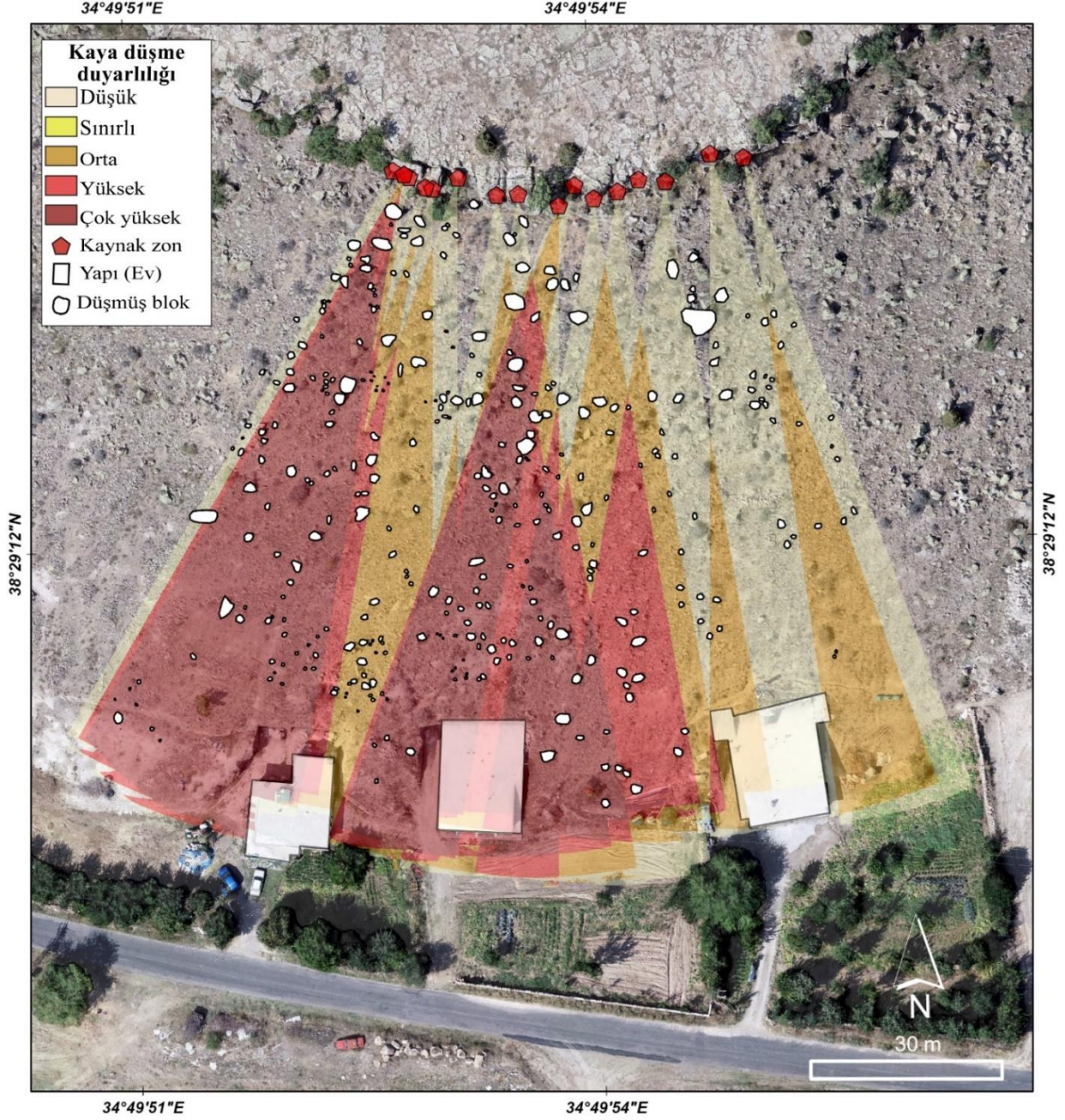


Şekil 8: Düşme tehlikesine sahip kaya bloklarının Qproto ortamında modellemesine ait sonuçlar

Kaya bloklarının modellenmesi ile birlikte ortaya çıkan bir diğer önemli veri, kaya bloklarının zamandan bağımsız olarak düşme duyarlılık modelidir (Castelli vd. 2021). Kaya düşme duyarlılık haritası 5 sınıfta çok yüksek, yüksek, orta, sınırlı ve düşük olarak oluşturulmuştur (Şekil 9). Mevcut çalışma sınırları içerisinde kaya düşme tehlike ve riski altında bulunan yapıların ikisinin çok yüksek ve yüksek duyarlılık sınıfında olduğu, diğer yapının ise sınırlı ve orta duyarlılık sınıfı içerisinde olduğu görülmüştür. Bunun yanısıra, mevcut, yüksek ve çok yüksek duyarlılık kapsamında kaya bloklarının sönümlendiği noktalar, tarım alanları sınırında kaldığı veya yaklaştığı görülmüştür. Bu alanlarda, yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfında kalmaktadır (Şekil 9). Yüksek eğimli dik yamaçlardan veya kaynak zonlarından itibaren düşmeye başlayan kaya bloklarının sahanın jeomorfolojisi ya da yüzey şekillerine bağlı olarak, oluşan kaya duyarlılığı üzerinde kritik bir öneme sahip olduğunu göstermiştir. Çünkü, eğim derecesi yüksek olan bu kaynak zonlarından ilerleyen kaya blokları oluşturmuş olduğu yüksek hız ve açığa çıkardığı enerjileri bakımından sönümlenmeleri genel olarak eğimin azaldığı yada bariyer görevi gören yapıların etrafından sönümlendiği görülmüştür. Fakat, bilindiği üzere, kaynak zona yakın alanlarda duyarlılık daha yüksek olmasına rağmen, bu çalışmada kaynak zona yakın alanlarda duyarlılık, kısmen daha düşük kalmıştır. Özellikle, sahada daha önceden düşen blokların konumlarına bakıldığında, duyarlılığın düşük olduğu noktalarda da kaya bloklarının yayılış gösterdiği görülmektedir (Şekil 9). Kaya bloklarının bu noktalarda daha yoğun olarak dağılış göstermesinde, düşen blokların geometrik ve hacimsel özellikleri, sahanın litolojisi büyük bir rol oynamaktadır. Çünkü, çalışma sahası ve yakın çevresinde düşen blokların genel olarak eşkenarlı, köşeli ve uzunlamasına bir geometriye sahip olmaları kaya bloklarının çok uzun mesafelere taşınmadan sönümlenmelerine neden olurken, şekilsel olarak eşboyutlu ve/veya daha dairesel bloklar daha uzak mesafelere ulaşmaktadırlar. Bunda, düşen yada devrilen kaya bloklarının, düşüşü sırasında parçalanması sonucu ortaya çıkan farklı şekil ve geometride oluşan şekillerinde etkisinden bahsedilebilir. Bu durumda kaya mekaniği ile alakalı bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, blokların hacimsel özelliklerinin, çakıl boyutundan-blok boyutuna kadar farklı ölçekte olması kaya bloklarının yörüngeleri üzerinde kritik rol oynamaktadır. Ek olarak, kullanılan yazılım görülebilirlik açısını dikkate alarak, kaya bloğunun ulaşabileceği en uzak mesefeyi eğim dinamiklerini dikkate alarak modelleme gerçekleştirmektedir. Kısaca, topografik düzensizlikleri olarak yörünge analizi gerçekleştirmemektedir. Akın vd. (2022)'ye göre Mazı yerleşmesi ve yakın civarında yapılan Rockfor3d'ye göre yapılan kaya düşme modellemesinde edilen sonuçların, neredeyse benzer yayılış değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışma sahası sınırları içerisinde önceden düşen bloklara ait konumlar yüksek çözünürlükte gerçek ortofoto verisi üzerinde sayısalştırma yapılarak belirlenmiştir ve bu konumlara ait dağılımlar genel olarak orta-yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfına karşılık gelmektedir (Şekil 9). Genel olarak çalışma sahasının doğusunda düşme ihtimali içerisinde yer alan kaya bloklarının karşılık geldiği duyarlılık sınıfları daha düşük çıkarken, burada daha önce düşen kaya bloklarının çok fazla ilerleme durumu olmadan sönümlendiği, fakat sahanın batısında yer alan noktalardan düşen kaya blokları doğrudan ana yola yada yapılara temas ederek sönümlendiği ve bu noktalarda maddi bir zarara neden olduğu tespit edilmiştir.



Burada, yenilme türlerine bağlı olarak düşen kaya bloklarının geometrisi, hacim ve düşmeye bağlı olarak dağılımı karakteristiği gösterip göstermediği de önem kazanmaktadır. Bu bakımdan, düşen kaya bloklarının şekilsel özelliklerinin de çalışmada dikkate alınması gerektiği önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 9: Çalışma kapsamında düşme tehlikesine sahip kaya bloklarının Qproto ortamında modellemesine ait kaya düşme duyarlılığı

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Uzaktan algılama platformlarının bir parçası olan insansız hava araçları, yer bilim çalışmalarında aktif ve yoğun bir şekilde kullanılmakta olup, tehlike ve risk açısından kritik öneme sahip noktalarda gerek modelleme gerekse olay öncesi ve sonrası gözlem yapma amacıyla önemli bir rol üstlenmektedir. Özellikle, erişilebilir olması, düşük maliyetler ile yüksek çözünürlükte, yüksek doğruluk ve hassasiyette veriler üretmesi insansız hava araçlarını daha da önemli bir konuma taşımaktadır. Ayrıca, fotogrametrik bakımdan güncel topografik veriler sunuyor olması, çalışmalarda elde edilecek sonuçlarında yüksek doğrulukta ve hassasiyette olmasını sağlaması, özellikle kaya düşmesi, taşkınlar, kütle hareketleri gibi vd., doğal afetler için, tehlike ve risk açısından doğru ve yerinde planlamalar ile gerekli önlem ve tedbirlerin alınması açısından kritik ve önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, ignimbirit kökenli kaya birimlerinin yer aldığı kornişli vadi üzerinde yoğun bir şekilde gerçekleşen kaya düşme olayları, yüksek çözünürlükte İHA-SYM verisine bağlı olarak konik temelli 3 Boyutlu kaya düşme modellemesi QGIS yazılımı Qproto eklentisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Qproto, belirli parametreler üzerinden, özellikle kaynak zon noktası üzerinden görülebilir alanların açısı içerisinde kalan sahaların değerlendirmesine olanak sağlayan görülebilirlik modülüne dayanmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak zonları üzerinden her bir düşen kaya bloğunun frekansına bağlı olarak, Qproto eklentisi, duyarlılık haritaları oluşmasını sağlamaktadır. Bu bakımdan, konik yöntem aracılığıyla olası kaya düşme duyarlılık bölgelerini belirlemek, özellikle küçük ölçekli sahalarda oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Buna rağmen, bir kaya bloğunun modellenmesi ile birlikte, kaya bloğunun topografik yüzey ile düşme sırasında maruz kaldığı temasa ait sonuçların belirlenmesi yada sıçrama yüksekliğinin elde edilememesi, olası tedbirlerin alınmasında özellikle bariyer (betonleme, topraklama veya hendeklerin oluşturulması) modellemesi yapılamaması önemli eksikler arasında yer almaktadır. Ayrıca yüksek çözünürlüklü SYM verilerinde daha kolay çalışması ve daha iyi sonuçlar vermesi, aynı zamanda çok geniş alanların modellenmesinde yetersiz kalması önemli eksiklikleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada eklentinin nasıl çalıştığından ziyade eklentiye girdi oluşturma, sonuçlar elde etme ve sonuçları yorumlama üzerinde durulmuştur. Yaklaşık 17 hektar alan kaplayan çalışma sahasında ignimbirit kayalarda görülen dikey doğrultuda soğuma çatlak yapıları nedeniyle, kaya düşmeleri açısından 16 kaya bloğu tespit edilmiştir. Farklı geometri ve hacimde olan bu kaya bloklarının düşmesi durumunda nasıl bir yörünge hattına sahip olacakları, ortaya çıkacak hız ve kinetik enerji değerleri 3B olarak modellenmiştir. Model sonuçlarına göre, kaya bloklarının maksimum hızları 0-16.8 m/s arasında, maksimum enerjileri ise 0-142 kJ arasında değişmektedir. Kaya blokları, ortaya çıkardığı hız ve enerji değerleri maksimum eğime sahip noktalarda pik seviyeye ulaştığı, eğimin azalmasına ve özellikle sahanın jeomorfolojik yapısına bağlı olarak sönümlendiği, buna rağmen eğimin düşük olduğu alanlarda bulunan yapıların tehlike ve risk durumunun aktif olarak devam ettiği görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre, kaya düşme duyarlılığının iki yapı üzerinde yüksek ve çok yüksek duyarlılığa sahip olduğu, diğer yapının ise daha düşük duyarlılıkta olduğu gözlemlenmiştir. Tehlike ve risk açısından kritik öneme sahip olarak tespit edilen bu iki yapının olduğu bölgede, daha önceden düşen kaya bloklarına ait sınır içerisinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yüksek kaya düşme duyarlılık sınıfı içerisinde yer alan bu sahalarda yer alan yapıların göz önünde bulundurularak, gerekli tedbirlerin alınması, özellikle uygun planlamaların yapılarak bariyerlerin, çit, tel örgü gibi sistemlerin uygulanması neden olacak zararın önlenmesi bakımından kritik bir önem arz etmektedir.

## Kaynaklar

- AFAD, (2015), *Bütünleşik Tehlike Haritalarının Hazırlanması, Heyelan-Kaya Düşmesi Temel Kılavuz*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, 152ss.
- AFAD, (2021), *Nevşehir İl Afet Risk Azaltma Planı (IRAP)*, T.C. Nevşehir Valiliği, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Nevşehir, 144ss.
- Agliardi F., Crosta, G.B., (2003), *High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 455–471.
- Akın M., Dinçer İ., Orhan A., (2020), *Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz*, (Tezcan A., Demir A., İlgen H.G., Beyhan M., Şentürk T., Yardımcıel R.S., Ed.), Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, 169ss.
- Akın M., Dinçer İ., Orhan A., (2022), *Kaya Düşmesi Afetlerinin Değerlendirilmesinde Güncel Yöntemler: Mazı(Ürgüp) Örneği*, Afet Sempozyumu, 20-22 Nisan, Ankara.
- Alemdag S., Bostancı H.T., Gacener E., (2022a), *GIS-based determination of potential instabilities and source rock areas on the Torul-Kürtün (Gümüşhane) motorway, rockfall, and protection structure analyses*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(1), 30, doi: 10.1007/s10064-021-02498-7.
- Alemdag S., Kara R.T., Bostancı H.T., (2022b), *Evaluation of potential rock falls with three-dimensional analysis: Example of Oltanbey and Hasanbey districts (Gümüşhane city center)*, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 169, 87-104.
- Alvioli M., Santangelo M., Fiorucci F., Cardinali M., Marchesini I., Reichenbach P., Rossi M., Guzzetti F., Peruccacci S., (2021), *Rockfall susceptibility and network-ranked susceptibility along the Italian railway*, Engineering Geology, 293, 106301, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106301.
- Antoniou A.A., Lekkas E., (2010), *Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini Island, Greece*, Geomorphology, 118(1–2), 152–166.
- Binal A., (1996), *Aksaray-Ihlara Vadisindeki Volkanosedimanter Kayaçalarda Görülen Duyarsızlık Mekanizmalarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Bounab A., El Kharim Y., El Hamdouni R., (2022), *The Suitability of UAV-Derived DSMs and the Impact of DEM Resolutions on Rockfall Numerical Simulations: A Case Study of the Bouanane Active Scarp, Tétouan, Northern Morocco*, Remote Sensing, 14(24), 6205, doi: 10.3390/rs14246205.
- Castelli M., Torsello G., Vallerio G., (2021), *Preliminary modeling of rockfall runout: Definition of the input parameters for the QGIS plugin QPROTO*, Geosciences, 11(2), 88, doi: 10.3390/geosciences11020088.
- Chen G., Zheng L., Zhang Y., Wu J., (2013), *Numerical simulation in rockfall analysis: A close comparison of 2-D and 3-D DDA*, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(3), 527–541.
- Cloutier C., Locat J., Mayers M., Noël F., Jacob C., Dorval P., Bossé F., Gionet P., Jaboyedoff M., (2016), *An integrated management tool for rockfall evaluation along transportation corridors: description and objectives of the ParaChute research project*, Geophysical Research Abstracts, Vol.18, EGU2016-9511.



- Crosta G.B., Agliardi F., (2003), *A methodology for physically based rockfall hazard assessment*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3(5), 407–422.
- Crosta G.B., Agliardi F., Frattini P., Lari S., (2015), *Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection*, Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2'nin İçinde, (Lollino G., Ed.), Springer International Publishing, Switzerland, ss.43–58.
- Ergünay O., (2007), *Türkiyenin Afet Profili*, TMMOB Afet Sempozyumu, 5-7 Aralık, İMO Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara, ss.1–14.
- Frattini P., Crosta G., Carrara A., Agliardi F., (2008), *Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches*, Geomorphology, 94(3–4), 419–437.
- Giordan D., Cignetti M., Godone D., Bertolo D., Paganone M., (2021), *Definition of an operative methodology for the management of Rockfalls along with the Road Network*, Sustainability, 13(14), 7669, doi: 10.3390/su13147669.
- Gökçe O., Özden Ş., Demir A., (2008), *Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı: Afet bilgileri envanteri*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 126ss.
- Jaboyedoff M., Labiouse V., (2011), *Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones*, Natural Hazards and Earth System Science, 11(3), 819–828.
- Leine R.L., Schweizer A., Christen M., Glover J., Bartelt P., Gerber W., (2014), *Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape*. Multibody System Dynamics, 32(2), 241–271.
- Lukačić H., Krkač M., Gazibara S.B., Arbanas Ž., Arbanas S.M., (2023), *Detection of geometric properties of discontinuities on the Špičunak rock slope (Croatia) using high-resolution 3D Point Cloud generated from Terrestrial Laser Scanning*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1124(1), 012006, doi: 10.1088/1755-1315/1124/1/012006.
- Matas G., Lantada N., Corominas J., Gili J.A., Ruiz-Carulla R., Prades A., (2017), *RockGIS: a GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls*, Landslides, 14(5), 1565–1578.
- Moon V.G., (1993), *Microstructural controls on the geomechanical behaviour of ignimbrite*, Engineering Geology, 35(1-2), 19-31.
- Nanehkar Y.A., Licai Z., Chen J., Azarafza M., Yimin M., (2022), *Application of artificial neural networks and geographic information system to provide hazard susceptibility maps for rockfall failures*, Environmental Earth Sciences, 81(19), 475, doi: 10.1007/s12665-022-10603-6.
- Ovreiu A.B., Bărsoianu I.A., Nistor C., Nedelea A., Comănescu L., (2019), *Assessment of vulnerability for rockfalls in Cozia Gorge (Southern Carpathians, Romania)*, Natural Hazards, 99(1), 117–140.
- Öztürk M.Z., Çetinkaya G., Aydın S., (2017), *Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye'nin İklim Tipleri*, Coğrafya Dergisi, 35, 17-27.
- Öztürk M.Z., Utlu M., Şimşek M., (2022), *Kaya Düşme Tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B Modelleme Çalışmaları; Murtaza Köyü Örneği (Niğde)*, Yer Bilimleri, 43(2), 182-196.
- Riquelme A.J., Abellán A., Tomás R., Jaboyedoff M., (2014), *A new approach for semiautomatic rock mass joints recognition from 3D point clouds*, Computers & Geosciences, 68, 38-52.
- 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., ss.13–28.
- Sarıtürk B., Şeker D.Z., (2017), *SFM tekniği ile 3B obje modellenmesinde kullanılan ticari ve açık-kaynak kodlu yazılımların karşılaştırılması*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(4), 126-131.
- Singh S.K., Banerjee B.P., Lato M.J., Sammut C., Raval S., (2022), *Automated rock mass discontinuity set characterisation using amplitude and phase decomposition of point cloud data*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 152, 105072, doi: 10.1016/j.ijrmms.2022.105072.
- Taşdemiroğlu M., (1970), *Türkiye'de kütle hareketleri*, Türkiye Jeoloji Bülteni, 13(2), 26–35.
- Thiele S.T., Grose L., Samsu A., Micklethwaite S., Vollgger S.A., Cruden A.R., (2017), *Rapid semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data*, Solid Earth, 8(6), 1241-1253.
- URL-1, (2023), *Facets (plugin)*, [http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Facets\\_%28plugin%29](http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Facets_%28plugin%29), [Erişim 4 Şubat 2023].
- Utlu M., Öztürk M.Z., Şimşek M., (2020), *Emlî Vadisi'ndeki (Aladağlar) Talus Depolarının Kantitatif Analizlere Göre İncelenmesi*, Coğrafi Perspektifle Dağ ve Dağlık Alanlar (Sürdürülebilirlik-Yönetim-Örnek Alan İncelemeleri)'in İçinde, (Birinci S., Kıvanç Kaymaz Ç., Kızılkın Y., Ed.), Kriter Yayınevi, İstanbul, ss.51–72.
- 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*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(9), 2617–2651.
- Wegner K., Haas F., Heckmann T., Mangeney A., Durand V., Villeneuve N., Kowalski P., Peltier A., Becht M., (2021), *Assessing the effect of lithological setting, block characteristic and slope topography on the runout length of rockfalls in the Alps and on the La Réunion island*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 21(3), 1159–1177.
- Yan J., Chen J., Tan C., Zhang Y., Liu Y., Zhao X., Wang Q., (2023), *Rockfall source areas identification at local scale by integrating discontinuity-based threshold slope angle and rockfall trajectory analyses*, Engineering Geology, 313, 106993, doi: 10.1016/j.enggeo.2023.106993.
- Žabota, B., Repe, B. and Kobal, M. 2019. *Influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling*, Geomorphology, 328, 183–195.