



Ankara Zir Vadisi Kaya Düşmelerinin Üç Boyutlu Analizlerle Değerlendirilmesi

Assessment of Ankara Zir Valley Rockfalls using Three Dimensional Analyses

NURGÜL YEŞİLOĞLU-GÜLTEKİN^{ORCID}

Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Ankara, Türkiye

Geliş (*received*): 26 Haziran (*June*) 2023 Kabul (*accepted*): 20 Ağustos (*August*) 2023

ÖZ

Kaya düşmeleri büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek doğal tehlikelerdir. Zir Vadisi yamaçları Ankara ili Sincan (Yenikent) -Temelli karayolunun yamaçlarını oluşturmakta olup, özellikle çok sayıda ağır yük, tıbbi atık aracı ile binek aracın yoğun olarak kullandığı bir güzergahtır. Zir Vadisi lav önu çökme ürünleri bölgede yüksek şevler oluşturan peri bacası görünümlü jeolojik oluşumlar meydana getirmiş olup, bu oluşumlarda kaya düşmeleri meydana gelmektedir. Zir Vadisi Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı olarak tescil edilmiş olup; eski bir yerleşime de ev sahipliği yapmaktadır. Bölgenin korunması sadece kaya düşmeleri açısından değil aynı zamanda jeolojik miras anlamında da önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında öncelikle arazi çalışmaları ile bölgede kaya düşmesi kaynak alanları belirlenmiş, düşmüş bloklar ve lokasyonları değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında İnsansız Hava Aracı (İHA) ile uçuş yapılarak bölgenin ve yakın çevresinin sayısal yükseklik modeli (SYM) elde edilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenmiş kaya düşmesi kaynak alanlarından düşme potansiyeli olan kaya bloklarının ilerleme yönü, mesafeleri, sıçrama yükseklikleri, blokların sahip oldukları hızlar ve enerjiler çok sayıda modelleme çalışması ile değerlendirilmiş ve bu değerlerin tahminine yönelik üç boyutlu analizler yapılmış ve haritalanmıştır. Bu değerlendirmelere göre bloklar yüksek hız ve enerjiye ulaşmakta olup, bu durum dikkate alındığında; kaya düşmesi kaynak alanı, risk altındaki eleman olan karayoluna, prefabrik yapılara, su deposu, çeşme, bahçe, ekili tarla gibi alanda bulunan yapılara çok yakındır. Çalışma, yoğun bir araç trafiğinin bulunduğu bir karayolunun ve bölgedeki diğer risk altındaki elemanların kaya düşmelerinden korunması için gereken çalışmaların yapılabilmesi için literatüre önemli katkı sağlayacak niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Zir Vadisi, İnsansız Hava Aracı (İHA), HY-STONE, 3B Modelleme, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

ABSTRACT

Rock falls are the natural hazards which have potential for structural damages and casualties. The slopes of the Zir Valley, which is the study area, are the slopes of the Ankara province Sincan (Yenikent) -Temelli highway, and it is the route of heavily used by many heavy cargo, medical waste vehicles and personal vehicles. The lava front collapse products of the Zir Valley created fairy chimney-like geological formations that created high slopes in the region. Rock falls occur in these formations. Zir Valley was registered as a Natural Site-Sustainable Conservation and Controlled Use Area and it is also an old settlement area in that region. The protection of the region is important not only for rockfalls, but also for geological heritage. Within the scope of this study, first of all, the rockfall source areas were determined, fallen rock blocks and their locations were assessed by field studies. The digital elevation model (DEM) of the study area and its vicinity was obtained by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The runout direction, runout distance, jump heights, velocities and energies of the rock blocks that have the potential to fall from the rockfall source areas determined within the scope of the study were evaluated by many modeling studies, and three-dimensional analyzes were implemented and mapped for the prediction of these values. According to these assessments, the blocks reach high velocity and energy, and when this situation is considered; the rockfall source area is very close to the highway, which is the element at risk, prefabricated structures, water tanks, fountains, gardens, and the structures in the area such as cultivated field. The study will give significant contribution to the literature in order to carry out the necessary studies for the protection of a highway with a heavy vehicle traffic and other elements at risk in the region from rockfalls.

Keywords: Rockfall, Zir Valley, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), HY-STONE, 3D Modeling, Geographic Information System (GIS)

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1332884>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: nuryesil@hacettepe.edu.tr

GİRİŞ

Dünya, oluşumundan bugüne süregelen doğal olayların etkisi altında kalmıştır. Doğal olayların ve tehlikelerin doğal afetlere dönüşmesinin engellenmesi yerbilimlerine ilişkin temel verilerin doğru derlenip yorumlanmasıyla doğrudan ilişkilidir. Kaya düşmeleri büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek doğal tehlikelerdir. Jeolojik kökenli tehlikelerin özellikle kentsel planlamada dikkate alınması, doğal tehlikelerin yerleşim bölgelerine verdiği zararların gerek toplum gerekse yerel yönetimler tarafından anlaşılması bu alanda yapılan çalışmalarda büyük önem taşımaktadır.

Çalışma konusunu oluşturan kaya düşmelerinin modellenmesi ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma yer almakta olup; bu çalışmalardan bir kısmı iki boyutlu modellemeye imkan sunmaktadır (Ulusay vd., 2006; Topal vd., 2007; Tagliavini vd., 2009; Tunusluoglu ve Zorlu, 2009; Sadagah, 2010; Bilgin vd., 2012; Topal vd., 2012; Wang vd., 2012; Yesiloglu-Gultekin vd., 2012; Keskin, 2013). Literatürde özellikle son dönemlerde kaya düşme alanlarının daha temsil edici modellenmesi açısından üç boyutlu (3B) modelleme yöntemleri yaygınlaşmıştır. Guzzetti vd. (2002) çalışmalarında kaya düşme tehlikesinin değerlendirilmesi için üç boyutlu bir benzeştirme yazılımı olan 'STONE' u

geliştirmişlerdir. Bu yazılım ile kaya düşmelerinin modellenmesinin diğer programlarla karşılaştırıldığında daha gerçekçi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Agliardi ve Crosta (2003) merkez Alpler'de yüksek çözünürlüklü 3B kaya düşmesi modellemesi yaptıkları çalışmalarında risk altındaki elemanlar değerlendirilmiş, kaya düşmelerinden korunma ve önlemler üzerinde durulmuştur. Frattini vd. (2008) kaya düşmesi duraylılığının değerlendirilmesi için istatistiksel ve fiziksel tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. HY-STONE kaya düşmesi programı ile kaya düşmelerinin ilerleme mesafeleri ile ilgili üç boyutlu modeller oluşturmuşlar ve bu modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Agliardi vd. (2009) Varenna/İtalya'da meydana gelen kaya düşmeleri için risk değerlendirmesi yaptıkları çalışmalarında üç boyutlu modelleme programı olan HY-STONE'u kullanmışlardır. Çalışma kapsamında risk altındaki elemanlar belirlenmiş, çalışma ile farklı kaya düşmelerinden koruma senaryoları için farklı önlemler değerlendirilmiştir. Assali vd. (2014) Fransa'da Haute-Savoie, Saint-Jeoire yakınlarında kaya düşmeleri riski olan alanları fotogrametrik ve yersel ölçümler yaparak belirledikleri çalışmalarında STONE yazılımını kullanmışlardır. Sarro vd. (2018) doğu İspanya'da kültürel miras olarak kabul edilen bir alanın yanındaki bir köyde meydana gelen kaya düşmelerinin üç boyutlu değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada RocPro3D yazılımı kullanarak blokların ilerleme mesafelerini tahmin etmişlerdir.

Ayrıca yine son dönemde İHA verileri birçok alanda giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Chiabrande vd., 2013; Vasuki vd., 2014; Gonçalves vd., 2015; Ulvi ve Toprak, 2016; Şasi ve Yakar, 2018). İHA kullanılarak yapılan kaya düşmesi analizleri güncelliğini korumaktadır. Giordan vd. (2015) İHA sistemini İtalya'da meydana gelen kaya düşme alanlarından biri olan San Germano'da

uygulamışlardır. Çalışmanın amacı micro-İHA'ların kaya düşmelerinin acil durum senaryolarında uygulanabilirliğine dair metodlar geliştirmektedir. Saroglou vd. (2018) İHA kullanarak erişilmesi güç bir arazinin kaya düşmesi analizlerini yapmıştır. Akın vd. (2019) yapmış oldukları çalışma ile Akköy (Ürgüp) 'de düşmüş olan kaya bloklarının yerleşim alanlarına ulaşmasını engellemek amacıyla inşa edilmiş olan kaya tutma hendeğinin performansını 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmişlerdir. 3 boyutlu RocPro3D yazılımı kullanılan çalışmada kaya düşme analizlerinde kullanılan sayısal yüzey modeli insansız hava aracı ile alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen nokta bulutu verisi ile oluşturulmuştur. Alptekin vd. (2019) Mersin Karahıdırlı kaya düşme alanında yapmış oldukları çalışma ile bölgenin kaya düşmelerinin olumsuz etkilerinin klasik yersel uygulamaların aksine İHA ile daha pratik bir şekilde yapıldığını vurgulamışlar ve önleme yöntemlerinin inşaa edilmesi gerekliliğini belirtmişlerdir. Şener (2019) Kasımlar Köyü Isparta için İHA verileri kullanarak CBS tabanlı 3B modellemeler ile olası kaya düşmelerini değerlendirmişlerdir. Ağca vd. (2020) Mersin Adamkayalar bölgesinde üzerinde tarihi figürlerin yer aldığı kaya yamacının 3B kaya düşmesi modellemesini İHA verileri kullanarak çalışmışlar; blokların ilerleme, mesafesi, sıçrama yükseklikleri ve blokların enerjisini tahmin etmişlerdir. Ayrıca bölgeyi ziyaret edecek turistler için güvenli yürüyüş yolları üzerinde durmuşlardır. Polat (2020) Rockyfor3d yazılımı kullanarak İHA verileri ile Sivas Kavak köyü için 3B kaya düşmesi analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın en zor kısmının bu yazılım ile veri hazırlama süreci olduğunu ifade etmişler ve bu amaçla veri hazırlama aracı geliştirerek analizleri yapmışlardır.

Utlu vd. (2020) Aladağlar'da yer alan Kazıklıalı Kanyonu'nda gerçekleştirdikleri çalışmalarında

İHA teknolojisini kullanarak kaya düşmelerini modellemişlerdir. 3B modellemelerle (RAMMS) blokların hızını, enerjilerini, sıçrama yüksekliklerini, düşme mesafelerini belirlemişler ve bölgenin yüksek kaya düşmesi tehlikesi içinde olduğunu tespit etmişlerdir. Albarelli vd. (2021) süreksizliklerin lokal ölçekte belirlenmesine yönelik yeni bir yöntem önerdikleri çalışmalarında İHA kullanarak Yunanistan'da bir kaya düşme alanına ait 3 boyutlu modelleme yapmışlardır. Aynı çalışmada otomatik olarak süreksizlik setlerinin özelliklerini belirlemişler ve şev analizleri yapmışlar ve duyarlılık değerlendirmesi ile yeni bir kaya düşmesi duraylılık indeksi belirlemişlerdir. Öztürk vd. (2022) Niğde' de gerçekleştirdikleri çalışmalarında İHA verilerini kullanarak 3B modelleme yapmışlardır. Çalışmada RAMMS yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile mühendislik çözüm önerileri sunulmuştur. Dinçer vd. (2022) Kapadokya bölgesinde 3 boyutlu kaya düşme analizlerini İHA verilerinden elde edilen modeller üzerinde RocPro3D yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, Kapadokya bölgesindeki kaya düşmelerinin önlenmesi için detaylı kaya düşme analizleri gerçekleştirilerek kaya düşme parametrelerinin belirlenmesi ve koruma ve önleme projelerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Varol vd. (2023) Kayseri-Soğanlı yerleşim alanında meydana gelebilecek kaya düşmelerini ampirik olarak enerji açısı yöntemiyle ve 3 boyutlu olasılıksal kaya düşme modellemeleri ile değerlendirdikleri çalışmalarında İHA verileri ile elde edilen SYM için CONEFALL yazılımı kullanmışlardır.

Çalışma kapsamında üç boyutlu kaya düşmesi modellemesi yapmaya imkan sağlayan HY-STONE simülasyon programı lav önü akıntılarının patlaması sonucu oluşan Zir Vadisi ve yakın çevresini etkileyen kaya düşmelerine uygulanmıştır. Ayrıca İHA'ların

çalışma alanı için hızlı bir ölçüm sağlaması ve bölgenin 3 boyutlu modelinin farklı uçuş açıları ile net bir şekilde ortaya konulması, çalışma konusunu oluşturan 3B kaya düşmesi analizlerinde büyük bir avantaj sağlamıştır. Kaya düşme alanı karayolunun şevlerinde yer almakta olup; büyük oranda yapısal hasara ve can kayıplarına neden olabilecek potansiyele sahiptir. Bu nedenle düşme potansiyeli olan blokların belirlenmesi, boyutlarının ortaya konulması, ilerleme mesafelerinin, sıçrama yüksekliklerinin, enerjilerinin hesaplanması bölgenin kaya düşmelerinden korunmasında büyük önem taşımaktadır. Kaya düşmeleri ülkemizde araştırmacılar tarafından çalışılmakta olup, bu çalışmayı değerli kılan Zir Vadisi kaya düşme alanının Ankara'nın merkezinde yoğun olarak kullanılan bir karayolunun hemen yanında yer alması ve bu alanda kaya düşme olaylarının yaşanıyor olmasıdır. Ayrıca bu çalışmayı değerli kılan bir diğer husus; kaya düşmelerinin olduğu peribacasını andıran özel jeolojik oluşumların bulunduğu Zir Vadisi ve bu tür alanların korunmasına bilimsel çalışmaların da destek olmasıdır.

ÇALIŞMA ALANI

Çalışma alanı olarak seçilen Zir Vadisi ve yakın çevresi Ankara 1/100000 ölçekli İ28 ve İ29 paftaları içinde yer almaktadır. Zir Vadisi yamaçları, Ankara ili merkez sınırları içinde yer alan Sincan-Temelli karayolunun da yamaçlarını oluşturmakta olup, özellikle çok sayıda ağır, orta yük araçlarının ve bunun yanında binek aracın yoğun olarak kullandığı bir güzergahtır. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Zir Vadisi sadece jeolojik açıdan değil, aynı zamanda tarihte bir yerleşime merkezlik etmesi açısından da Ankara İli içerisinde ayrıcalıklı bir öneme sahiptir. Zir Vadisi 2018 yılında "Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak tescil edilmiştir (Çevre,

Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018). Zir Vadisi Ayaş-Beypazarı yolu üzerindeki Yenikent'ten Gökler Köyü istikametinde tarihi Zağar Köprüsü ile başlamaktadır. Zir Vadisi; mağara yerleşimleri, tarihi mezar taşları ve dere boyu ağaçları ile rekreasyonel açıdan da bir nitelik ortaya koymaktadır (Uğur ve Akpınar, 2003).

Zir Vadisi ve yakın çevresi içinde yer alan Zir Vadisi karayolu Sincan-Yenikent-Temelli arası bağlantıyı sağlamakta olup, aynı zamanda ASKİ Tatlar Atık Su Arıtma Tesisi, Sincan Katı Atık Bölgesi, Sincan Hayvancılık Bölgesi ve Malıköy' de yer alan organize bölgelerine ulaşım için kullanılmaktadır. Bu nedenle bu yol yoğun bir trafiğin olduğu bir karayolu olup; risk altındaki eleman sayısı oldukça yüksektir. Ayrıca tıbbi atık taşıyan araçların varlığı sadece araç riski açısından değil bu araçların zarar görmesi ile etrafa yayılacak olan tıbbi atıkların yaratacağı risk açısından da değerlendirilmekte ve çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeolojisi

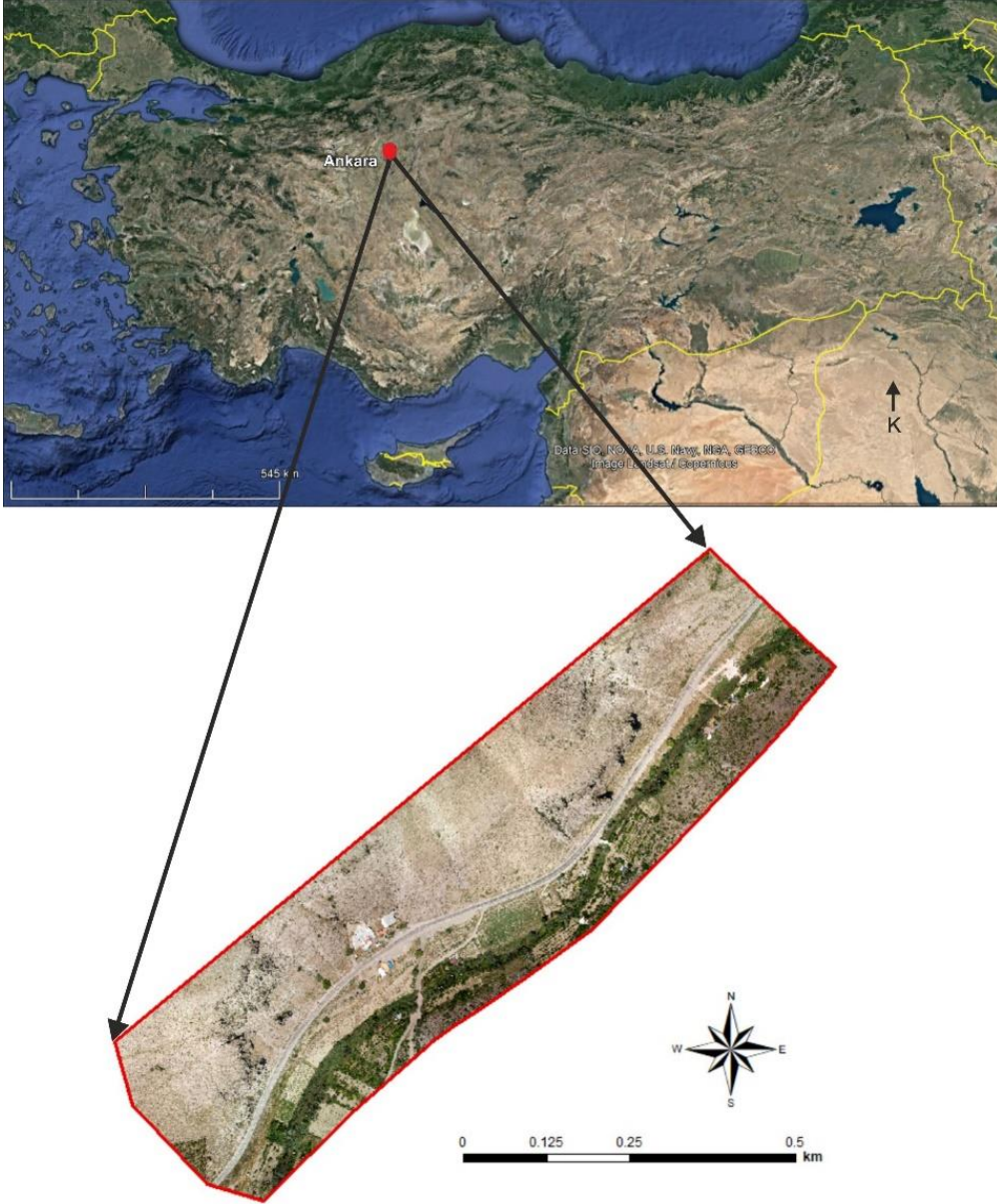
Zir Vadisi ve yakın çevresini içine alan çalışma alanı lav önü çökmesi sonucu oluşan blok ve kül akışlarının meydana getirdiği oluşumları içermektedir (Ersoy, 2003). Çalışma alanı Lütesiyen yaşlı Tekke Volkanitleri (Dönmez vd., 2009) içinde yer alan tuf-aglomera, andezit ve bazalt üyelerinden oluşmaktadır (Bilgin, 2014). Birim tuf-aglomera üyesi (Tetp), andezit üyesi (Teta) ve bazalt üyesi (Tetb) olmak üzere üç üyeye ayrılarak incelenmiştir. Çalışma alanının jeolojisi Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından hazırlanan 1/100000 ölçekli Ankara İ28-Ankara İ29 paftaları içinde yer almaktadır. Çalışma alanının jeoloji haritası Akyürek vd. (1997) ve Bilgin (2014) kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2).

Çalışma alanında tüfler genellikle, gri-beyaz renklerde olup, aglomeraları bağlamaktadır.

Aglomeraların çakılları çoğunlukla andezitlerden oluşmaktadır (Şekil 3). Zir Vadisi yamaçlarında lav önü patlaması sonucu tuf-aglomera birimleri peri bacası şeklinde morfolojik şekiller oluşturmaktadır (Şekil 4). Çalışma kapsamında değerlendirilen kaya düşmeleri tuf-aglomera birimlerde gerçekleşmekte olup; oluşumların bağlayıcı malzemesi ise küldür.

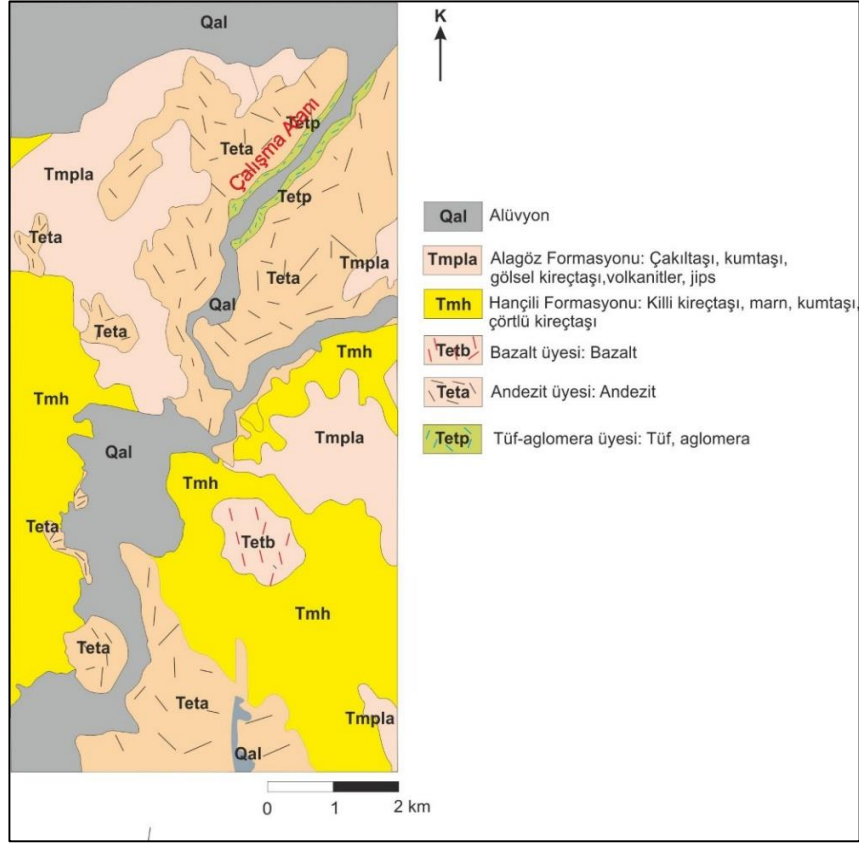
ARAZİ ÇALIŞMALARI VE FOTOGRAMETRİK ANALİZLER

Çalışma kapsamında arazi çalışmaları ve fotogrametrik analizler eş zamanlı yürütülmüştür. Arazi çalışmaları ile Zir Vadisi ve yakın çevresi için tehlike yaratan kaya düşmesi kaynak alanları tespit edilmiştir. Yine arazi çalışmaları ile düşen blokların çok yoğun olduğu alanlarda lokasyonları GPS (Global Positioning System-Global Konum Belirleme Sistemi) ile belirlenmiş ve boyutları ölçülmüş, ayrıca İHA verileri kullanılarak elde edilmiş ortofoto ile de düşen bloklar belirlenmiş CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında sayısallaştırılmıştır. Geriye dönük analizlerde düşen blokların lokasyonlarından faydalanılmıştır. Bu amaçla çalışma alanında düşen blokların ortalama boyutları belirlenmiştir. Yine CBS ortamında sayısallaştırılan bloklardan faydalanılarak bu veriler arazi ölçümleri ile birlikte kullanılarak çalışma alanı için ortalama blok boyutu tahmin edilmiştir (Şekil 5). Çalışma alanı için yapılan modelleme çalışmalarında kaya düşmelerinde blokların şekli için arazi gözlemleri etkili olmuştur. HY-STONE yazılımında küre, silindirik ve disk şeklinde örnekler için analizler gerçekleştirilmekte olup, araziye en iyi temsil ettiği düşünülerek blokların şekli küre olarak seçilmiştir. Blokların çapı olarak arazide düşmüş bloklara ve CBS ortamında sayısallaştırılmış bloklara ait ölçümler alınmış, hacimleri hesaplanmış bu arada bu hacime eşit kürenin çapı belirlenmiştir. Buna göre ortalama yarıçap 0.5 m alınmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası (Google Earth, 2023)

Figure 1. Location map of the study area (Google Earth, 2023)



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresine ait jeoloji haritası (Akyürek vd. 1997; Bilgin, 2014)

Figure 2. Geological map of the study area and its vicinity (Akyürek vd. 1997; Bilgin, 2014)



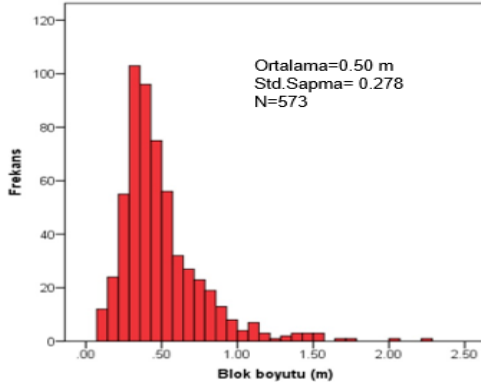
Şekil 3. Çalışma alanında gözlenen tüf-aglomera birimi

Figure 3. Tuff-agglomerate group in the study area



Şekil 4. Çalışma alanında gözlenen morfolojik oluşumlar (a,b)

Figure 4. Morphological units observed in the study area (a,b)



Şekil 5. Düşen blok boyutları

Figure 5. Dimensions of fallen blocks

Arazi çalışmaları ile alanı temsil edecek bloklar, kaya düşmesi modelleme çalışmaları için gerekli olan kaya düşmesi yüzey özellikleri, arazi kullanım haritası ve jeomorfoloji haritalarının hazırlanması için gerekli veriler alınmış, İHA verileriyle desteklenerek haritaların hazırlanmasına katkı sağlanmıştır. Kaya düşmesi analizlerinin en önemli ayaklarından birini arazi çalışmaları oluşturmuştur. Zir Vadisi ve yakın civarında gerçekleştirilen arazi çalışmaları esnasında düşmüş, hemen yol kenarında çok sayıda birikmiş blok gözlenmiştir (Şekil 6). Yola düşen bu kaya bloklarının yol kenarına alındığı açıktır.



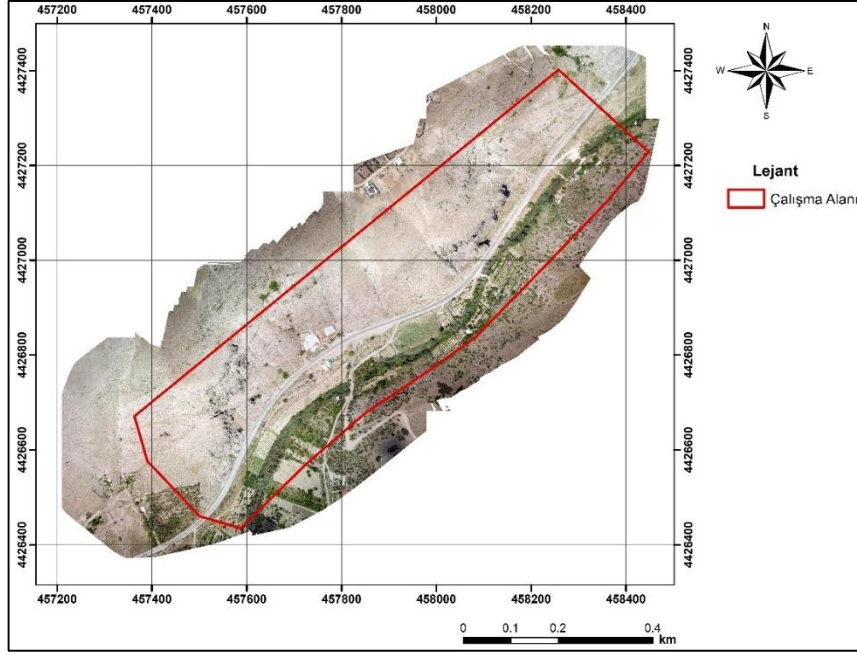
Şekil 6. Düşmüş kaya blokları

Figure 6. Fallen rock blocks

Çalışma alanında kaya düşmelerinin meydana geldiği şevler boyunca İHA ile uçuş yapılmış, uçuş verileri yardımıyla araziye ait yüksek çözünürlüklü ortofoto ve sayısal yükseklik modelinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen uçuş alanı Şekil 7'de verilmiştir. Uçuş alanı içinde analizlerin yapıldığı kırmızı ile çizilmiş çalışma alanı yer almaktadır. Çalışma alanı toplam 36.59 ha'dır. Çalışma kapsamında uçuşlar Yuneec H520 E RTK İHA ile gerçekleştirilmiştir.

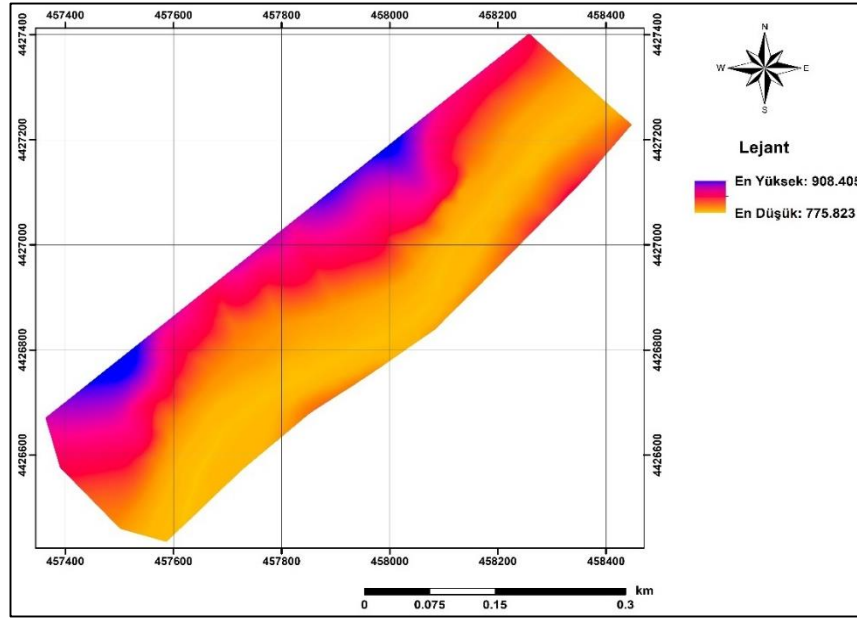
İHA kullanılarak Zir Vadisi'nde bulunan kayalık yamaçların görüntü alımı gerçekleştirilerek, elde edilen verilerin fotogrametrik yazılım ile değerlendirilmesi sonucu bölgenin ortofotosu, nokta bulutu ve katı modeli elde edilmiştir. Bu kapsamda çalışma sahasına homojen dağılımlı Yer Kontrol Noktaları (YKN) tesis edilmiştir. Tesis edilen noktaların koordinatları TUSAGA-Aktif sisteminden faydalanılarak TERSUS

Oscar GNSS alıcısı ile ITRF96 2005.00 koordinat sisteminde ölçülmüştür. Çalışmanın ED50 koordinat sisteminde sonuç ürünlerinin elde edilebilmesi için Harita Genel Müdürlüğü'nün ITRF-ED50 datum dönüşüm parametreleri kullanılarak YKN koordinatları ED50 koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Alanda nadir görüntüleme ile uçuş yapılmış, sonrasında da oblik (45°) görüntü alınmıştır. Nadir uçuşlar %80-%80 ileri ve yan bindirmeli, 3 cm GSD (Ground Sampling Distance-Yer Örnekleme Aralığı) çözünürlüğünde; oblik uçuşlar 1.5 cm GSD ile %80 yan bindirmeli olarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme aşamasında kullanılan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) Şekil 8'de verilmiştir. Çalışma kapsamında İHA verileriyle hazırlanan 0.15 m x 0.15 m çözünürlüklü SYM kullanılmıştır (Şekil 8).



Şekil 7. İHA verilerinden elde edilmiş çalışma alanına ait ortofoto

Figure 7. Orthophoto of the study area obtained from UAV



Şekil 8. Çalışma alanının Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)

Figure 8. Digital Elevation Model (DEM) of the study area

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

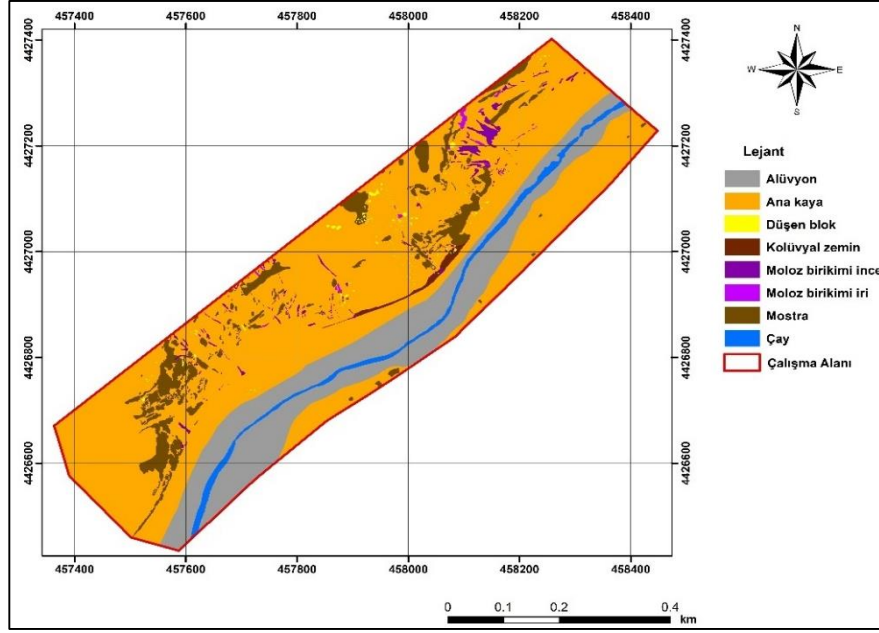
Çalışma alanında daha zayıf özellikte olan bağlayıcı malzemeden ayrılan bloklar kaya düşmelerine neden olmaktadır. Bu kapsamda kaya düşmelerine neden olan Lütésiyen yaşlı Tüf-Aglomera Üyesi'nden örnek alınmaya çalışılmıştır. Bu nedenle gerek bu ayrılan bloklardan ve gerekse bağlayıcı malzemeden alanı temsil eden örnekler alınmış ve değerlendirilmiştir. Ancak bu volkanitlerin bağlayıcı malzemesi kül olup; tüf-aglomera andezit yapısındaki malzeme bağlayıcısı ile örneklenememektedir. Çalışma kapsamında bağlayıcı malzemeden alınan örnek Hacettepe Üniversitesi HÜNİTEK bünyesinde yer alan Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM-Scanning Electron Microscope) kullanılarak malzeme ile ilgili petrografik değerlendirme yapılmıştır. Buna göre, birim petrografik olarak serbest mineraller ve mono litolojik kırıntılardan ibarettir. Kırıntılar birimin kendisine aittir. Andezitik bileşimde olduğu belirlenen birim sanidin, plajiyoklaz, amfibol, biyotit ve Fe-Ti oksit mineralleri ile temsil edilmektedir. Tali olarak apatit minerali de gözlenmektedir. Ayrıca birimde alterasyon görülmekte olup; alterasyon killeşme ile temsil edilmektedir.

Kaya düşme alanlarında düşmüş olan bloklar ise ayrıca değerlendirilmiştir. Bu amaçla, bu bloklardan karotlar alınmış, alınan karotlar üzerinde kayaların fiziksel, indeks ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler modelleme aşamasında her bir kaya düşmesi kaynak alanından düşürülecek kaya bloklarının yorumlanmasında katkı sağlamıştır ve girdi

parametresi olarak kullanılmıştır. Bu amaçla 20 adet karot örnek üzerinde yoğunluk, gözeneklilik, sonik hız deneyi (P dalga hızı ve S dalga hızı) ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre; malzeme için ortalama kuru yoğunluk değeri 2.26 g/cm³, ortalama gözeneklilik % 4.26, ortalama P dalga hızı değeri 3459 m/s, ortalama S dalga hızı değeri 2230 m/s, ortalama tek eksenli sıkışma dayanımı değeri 65.78 MPa olarak belirlenmiştir.

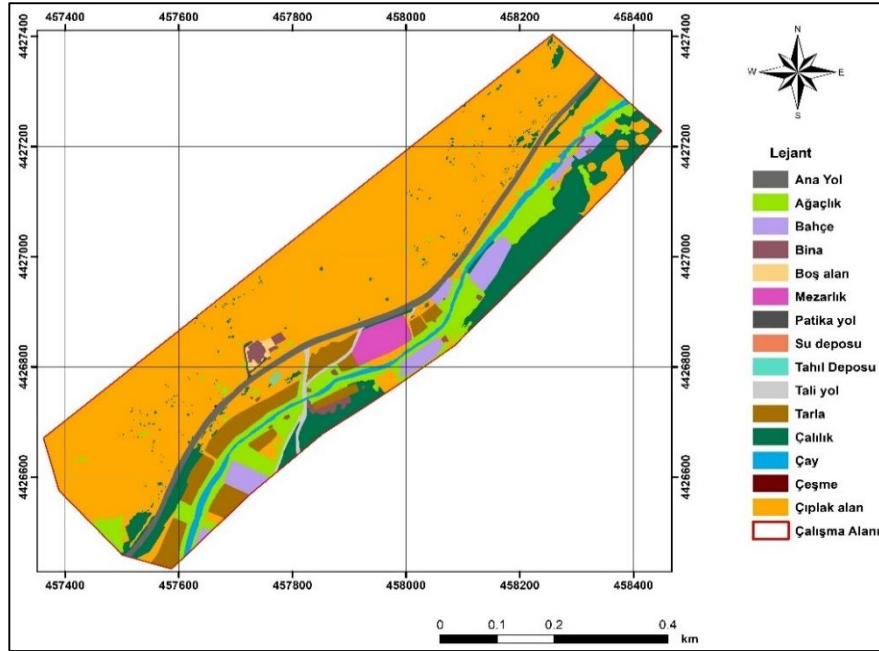
KAYA DÜŞMESİ ANALİZLERİ

Çalışma kapsamında Zir Vadisi ve yakın çevresinde kaya düşmeleri üç boyutlu analizlerle değerlendirilmiştir. Bu amaçla üç boyutlu modellemeye imkan veren ve coğrafi bilgi sistemlerini kullanan HY-STONE (Aglardi vd., 2009) yazılımı kullanılmıştır. HY-STONE Guzzetti vd. (2002) tarafından geliştirilen STONE yazılımının son şeklidir. Çalışmanın bu aşamasında HY-STONE 3B yazılımı için girdi parametresi olacak haritalar hazırlanmıştır. Bu haritaların hazırlanmasında arazi çalışmalarından ve İHA verileri ile hazırlanmış ortofotodan faydalanılmıştır. Böylece çalışma alanında jeomorfolojik açıdan ve arazi kullanımı açısından alan değerlendirilmiş ve CBS yardımıyla sayısallaştırılmıştır. Böylece çalışma alanı için jeomorfoloji haritası (Şekil 9) ve arazi kullanım haritası (Şekil 10) oluşturulmuştur. Yine CBS ortamında jeomorfoloji ve arazi kullanım haritaları çakıştırılarak iki haritanın birleştirilmesinden oluşan özel bir harita olan unique condition haritası elde edilmiştir (Şekil 11).



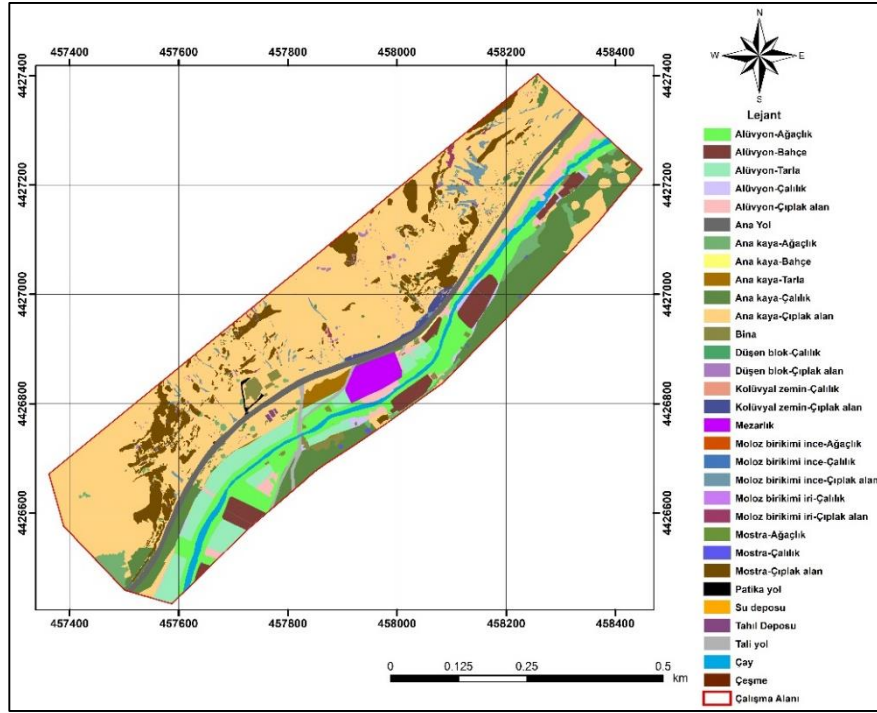
Şekil 9. Çalışma alanı için hazırlanmış jeomorfoloji haritası

Figure 9. Geomorphology map of the study area



Şekil 10. Çalışma alanı için hazırlanmış arazi kullanım haritası

Figure 10. Land use map of the study area



Şekil 11. Çalışma alanı için hazırlanmış unique condition haritası

Figure 11. Unique condition map of the study area

Çalışma kapsamında 3B kaya düşmesi modellemesinde kullanılan HY-STONE yazılımı; sayısal yükseklik modeli (SYM), jeomorfoloji ve arazi kullanım haritalarının birleştirilmesinden elde edilen unique condition haritası, kaya düşmesi kaynak alanı, enerji sönümlenmelerini ifade eden normal ve tanjansiyel katsayılar (normal (E_n) and tangential (E_t) restitution of coefficient) ve yüzey sürtünme açısı (A_t) (rolling friction coefficient), parametrelerini girdi olarak kullanılmaktadır.

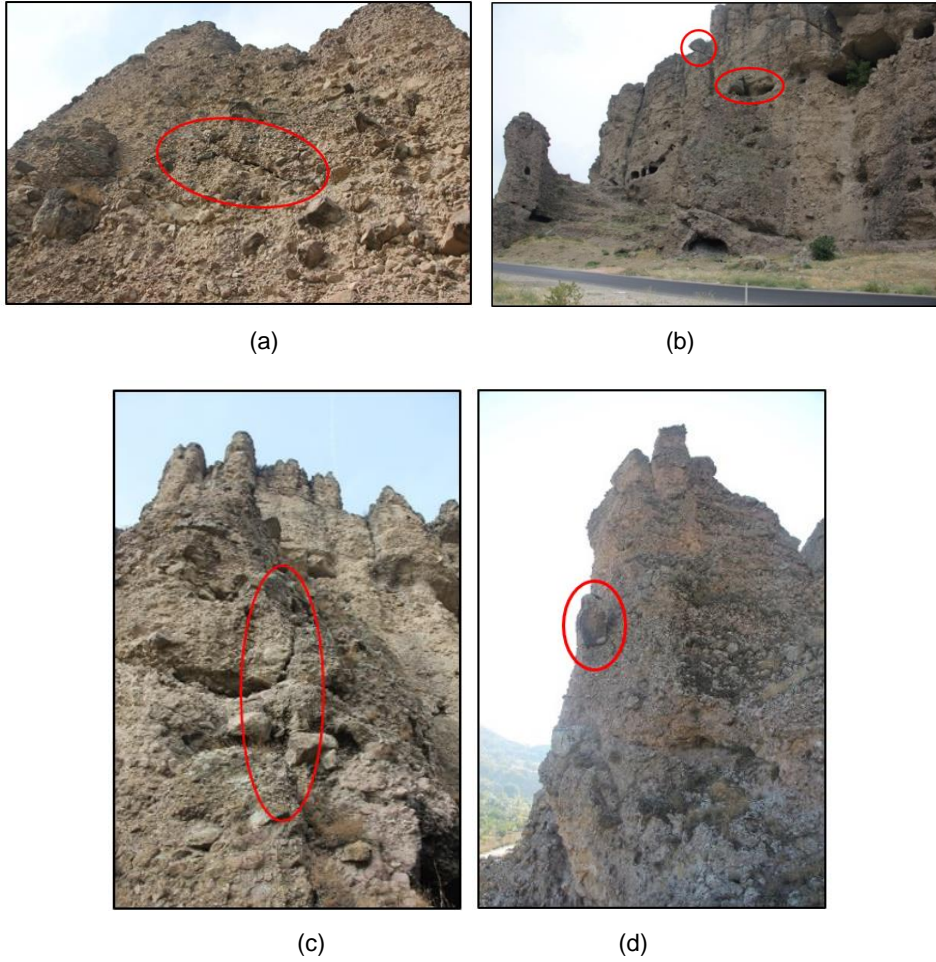
Çalışma kapsamında kaya düşmesi kaynak alanları hem arazi çalışmaları hem de ortofoto kullanılarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda arazi çalışmaları ile, ana kayadan ayrılabilir durumda blok oluşturma potansiyeline sahip ve ayrıca askıda duran çok sayıda alan tespit edilmiştir (Şekil 12). Daha sonra ortofotodan da

yararlanılarak arazide belirlenmiş bu alanlar CBS ortamında sayısallaştırılmış ve çalışma alanı için kaya düşmesi kaynak alanı haritası oluşturulmuştur (Şekil 13).

Çalışma kapsamında kaya düşmesi modellerinin oluşturulması için gerekli girdi parametrelerinden biri de yüzeyle bloklar arasındaki sürtünmeyi ve enerji sönümlenmesini ifade eden parametrelerdir. Kullanılan yazılımda düşen bloğun topoğrafyaya temas ettiği noktadaki enerji sönümlenmelerini kontrol eden normal (E_n) ve tanjansiyel katsayıları (E_t) ve düşen blok ile yüzey arasındaki sürtünme katsayısı (A_t) girdi olarak kullanılmaktadır (Çizelge 1). Bu katsayılar, düşen bloğun ve yüzeyin özelliklerine göre değişim göstermektedir. Literatürde bu katsayıları kontrol eden çok sayıda farklı yüzey tanımları önerilmektedir

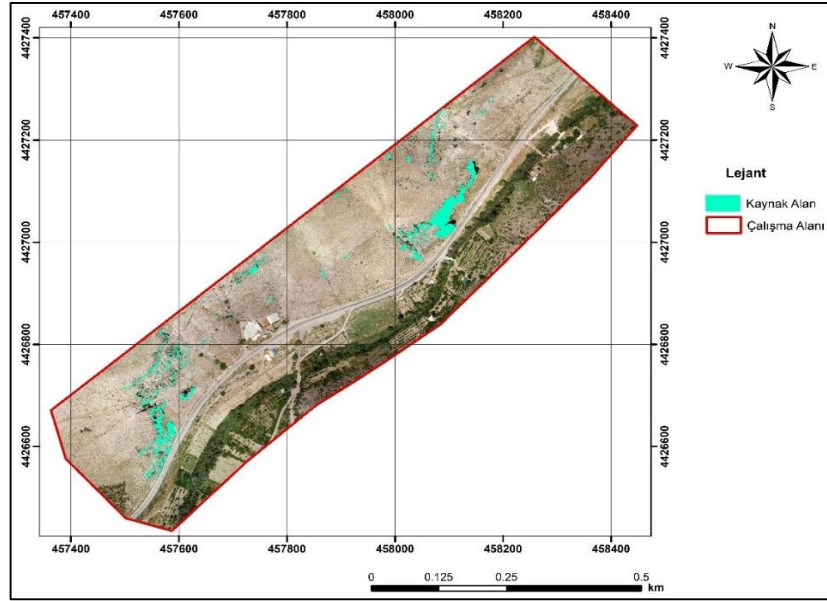
(Crosta vd., 2003; Topal vd., 2007; Frattini vd., 2008; Agliardi vd., 2009; Topal vd., 2012; Dadashzadeh vd., 2014; Ağca vd., 2020; Polat, 2020; Dincer vd., 2022). Bu tanımlar; çalışma alanında bulunan jeolojik birimlere ve arazi kullanımına göre değişiklik göstermektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için çalışılan sayısal arazi modelinin çözünürlüğüne eşit

ya da yakın literatürde kullanılan parametreler değerlendirilmiş ve unique condition haritasında yer alan yüzey özelliklerine göre sönümlenme katsayıları ve sürtünme açıları belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca geriye dönük analizlerle sönümlenme katsayıları kalibre edilmiştir.



Şekil 12. Kaya düşmesi kaynak alanlarında belirlenmiş blok oluşturma potansiyeline sahip alanlar ve askıda duran bloklardan örnekler (a,b,c,d)

Figure 12. Potential rockfall blocks and hanging blocks determined in the source area (a,b,c,d)



Şekil 13. Kaya düşmesi kaynak alanı

Figure 13. Rockfall source area

Kaya düşmesi modellerinde girdi parametresi olan normal ve tanjansiyel sönümlenme katsayıları çalışma alanının uygun olmamasından dolayı arazide elde edilememiş olup; geriye dönük analizlerden ve literatürden belirlenmiştir. Genel olarak sönümlenme katsayıları öncelikle literatürden belirlenmekte ve bu değerler geriye dönük analizlerle kalibre edilmekte ve modellerde kullanılabilir parametrelere ulaşılmaktadır. Düşen blokların lokasyonlarının belirlenmesi; modelleme aşamasında blokların ilerleme mesafelerinin bilinmesi ve modelleme için gerekli parametrelerin kalibre edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu alanda enerji sönümlenme katsayılarının ve sürtünme açılarının belirlenmesine yönelik en önemli sorun düşen blokların orijinal konumlarının tam olarak belirlenemiyor olmasıdır. Çünkü düşen bloklar özellikle düştüğü nokta yol ise trafiğin ilerleyebilmesi için kaldırılmakta, konumları değişmektedir. Bu durum çalışma alanına ait

parametrelerin kalibrasyonunun yapılmasını olumsuz etkilemektedir. Ancak sahada yola düşen bloklar dışında yamaçlara düşmüş ya da yolun karşısına geçmiş ve ilerlemiş bloklar da mevcuttur. Bu alanlar için geriye dönük analizler çok sayıda modelle, olası kaya düşmesi kaynak alanlarından her bir pikselden 20'şer adet blok fırlatılacak şekilde oluşturulmuştur. Böylece çok sayıda farklı iterasyonlar için senaryolar oluşturulmuştur. Blokların hangi kaynak alanlardan düşmüş olabileceği değerlendirilmiş ve böylece sönümlenme katsayıları belirlenmeye çalışılmıştır. HY-STONE yazılımında 20'yi aşkın model denemesi yapılmış, parametreler için kalibrasyonlar gerçekleştirilmiş ve çalışma alanını en iyi yansıtan parametrelerle analizler gerçekleştirilmiştir. Unique condition haritasında yer alan her bir yüzey özelliğine göre belirlenmiş olan At, En ve Et parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Unique condition haritasında yer alan birimler ile yüzey sürtünme açısı (A_t), normal (E_n) ve tanjansiyel (E_t) katsayılar

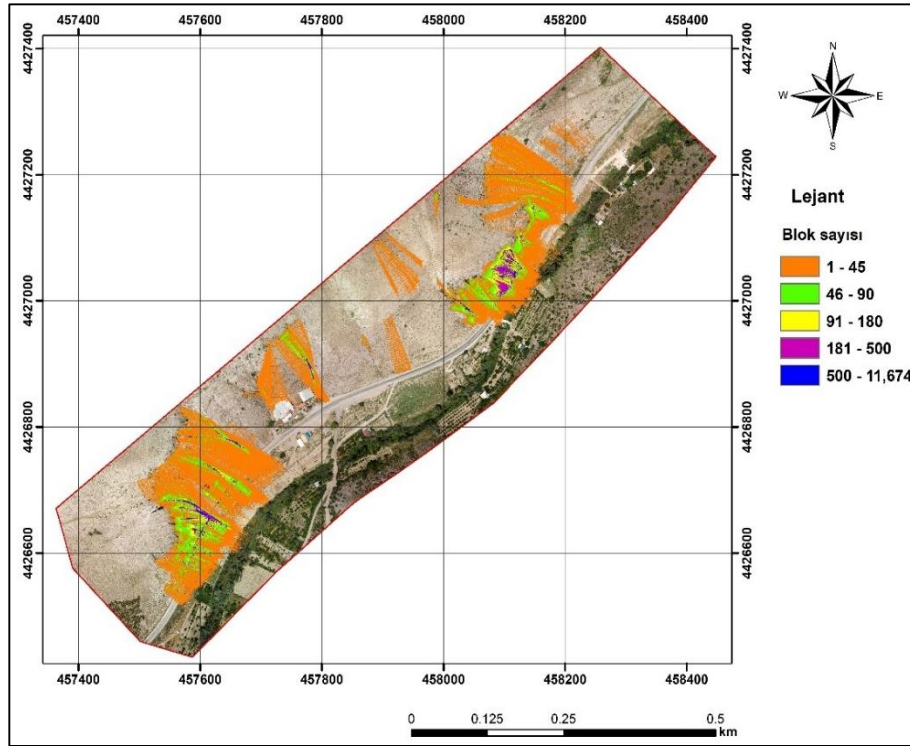
Table 1 . Units of unique condition map and rolling friction (A_t), normal (E_n) and tangential (E_t) coefficients

Birim	A_t	E_n	E_t
Mostra-Çıplak alan	0.45	52	75
Mostra-Çalılık	0.45	52	68
Mostra-Ağaçlık	0.55	52	70
Moloz birikimi ince-Çıplak alan	0.60	37	65
Moloz birikimi iri-Çıplak alan	0.45	32	65
Ana kaya-Çıplak alan	0.50	47	70
Düşen blok-Çıplak alan	0.45	52	75
Moloz birikimi ince-Çalılık	0.63	25	60
Düşen blok-Çalılık	0.45	52	68
Moloz birikimi ince-Ağaçlık	0.50	32	60
Ana Yol	0.30	35	80
Kolüvyal zemin-Çıplak alan	0.60	27	65
Kolüvyal zemin-Çalılık	0.63	27	60
Ana kaya-Çalılık	0.50	47	66
Alüvyon-Tarla	0.63	27	63
Alüvyon-Çalılık	0.63	25	60
Çay	0.30	35	70
Alüvyon-Çıplak alan	0.63	27	65
Ana kaya-Ağaçlık	0.55	44	65
Ana kaya-Bahçe	0.50	47	67
Bina	2.00	10	10
Mezarlık	1.00	30	30
Patika yol	0.30	30	70
Tali yol	0.30	35	80
Su deposu	2.00	10	10
Tahıl Deposu	2.00	10	10
Ana kaya-Tarla	0.45	52	75
Çeşme	2.00	10	10
Ana kaya-Çalılık	0.50	47	66
Düşen blok-Çalılık	0.45	52	68
Moloz birikimi iri-Çalılık	0.43	32	64
Alüvyon-Bahçe	0.62	25	60
Alüvyon-Ağaçlık	0.63	25	61

Kaya düşmesi analiz çıktıları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen kaya düşmesi analizleri için çok sayıda model çalışması yapılmış olup, araziye en iyi yansıtan model belirlenmiş ve ona ait sonuçlar verilmiştir. Çalışma alanında kaya düşmesi kaynak alanlarından blokların düşmesi durumunda ilerleme mesafesine yönelik değerlendirmeler yapılmış, çalışma alanını en iyi yansıtan model için belirlenen blok sayısı haritası sunulmuştur (Şekil 14). Hazırlanan bu haritaya göre; kaya blokları kaynak alanlarından karayoluna düşebilmekte, hatta bazı alanlarda karayolunu aşıp Ova Çayı'nın bulunduğu alanlara ulaşabilme potansiyeline

sahiptir. Analiz sonuçlarına göre blokların bir kısmı serbest düşme ile parçalanmakta, parçalanmış bloklar düştüğü zeminin sönümlenme özelliğine göre sıçrayabilmekte ve daha küçük bloklar halinde yuvarlanarak enerjilerinin bittiği yere kadar ilerleyebilmektedirler. Modelleme çalışmasında blokların ilk harekete geçebilmesi için sembolik bir hız kazandırılmıştır. Modelleme aşamalarında her bir kaya düşmesi kaynak alanının içindeki her bir pikselden düşürülen blokların izlediği yollar belirlenmiş ve haritalanmıştır. Çalışma kapsamında sunulan model için 4588824 adet kaya düşmesi güzergahı ile çalışılmıştır.



Şekil 14. Blok sayısı ve blok ilerleme mesafesi

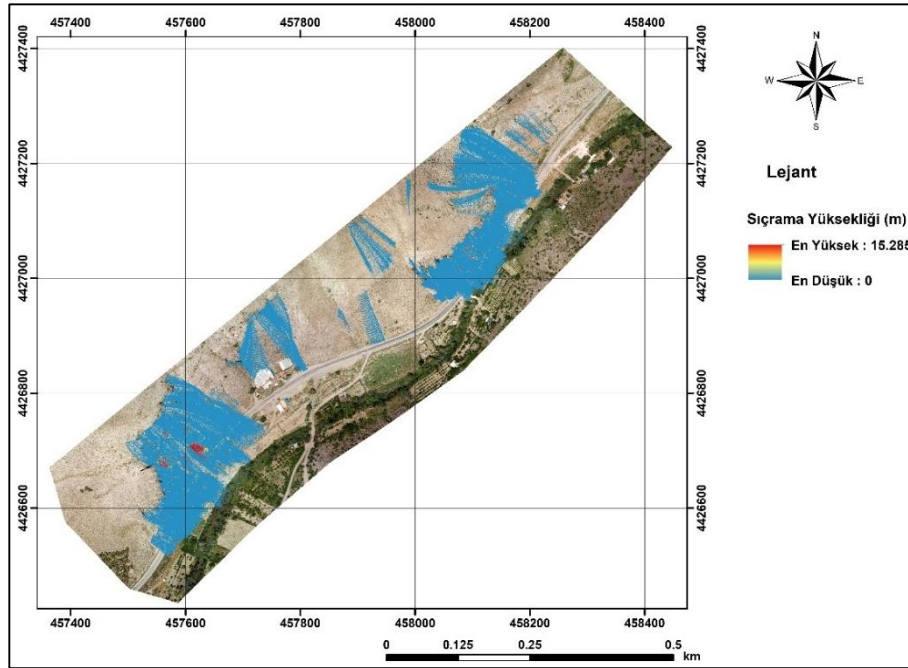
Figure 14. Number of blocks and runout distances

Çalışma kapsamında düşen blokların sıçrama yükseklikleri için de simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve haritalanmıştır. Buna göre; bloklara ait sıçrama yüksekliklerine bakıldığında 15.285 m' ye ulaşan değerler yer almaktadır (Şekil 15). Bu yüksek değerler özellikle şevin en dik ve peri bacası oluşumlarının olduğu kesimlerde yer almaktadır. Çalışma alanında kaynak alanlardan düşen malzemelerin ilerleme yolu incelendiğinde çoğunlukla mostra vermeyen alanlarda yuvarlanma şeklinde ilerlediği, hızının azaldığı, kayaların mostra verdiği alanlarda düşüp enerjisini azaltıp, sekerek yoluna devam ettiği görülmektedir. Yine çalışma alanında her bir pikselden 20'şer adet blok düşürülerek gerçekleştirilen üç boyutlu kaya düşmesi simülasyonu çalışmasında düşen blokların kinetik enerjileri de değerlendirilmiş, buna göre en yüksek toplam kinetik enerji

haritası oluşturulmuştur (Şekil 16). Buna göre düşen blokların yüksek bir kinetik enerji ile hareket edebileceği görülmektedir.

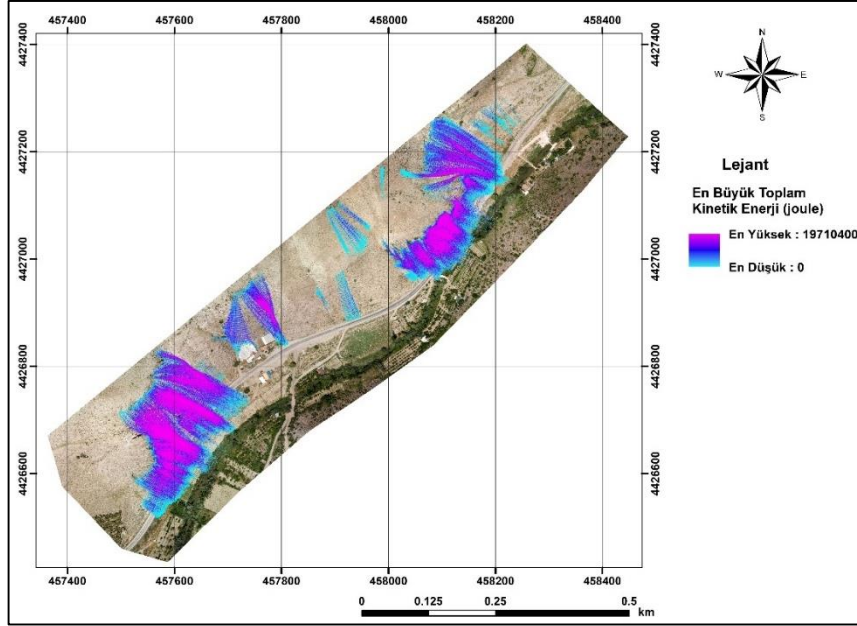
Eğimin özellikle yüksek olduğu kesimlerde kinetik enerji çok yüksektir. Eğimin düştüğü noktalarda, mostralarda ve yola geldiğinde sönümlenme etkisiyle kinetik enerji değerlerinde ani düşüşler gözlenmektedir.

Çalışma alanında, düşmesi olası bloklar için gerçekleştirilen modelleme çalışmasında blokların sahip oldukları hızlar da değerlendirilmiş ve haritalanmıştır (Şekil 17). Buna göre; en yüksek hız değeri bu modelleme için yaklaşık 31 m/s olarak belirlenmiştir. Yine kinetik enerjilere benzer şekilde hızın en fazla olduğu ve hızın arttığı alanların eğimin çok yüksek olduğu ve mostra bulunan alanlardan hızla sekip ilerlediği alanlar olduğu izlenmiştir.



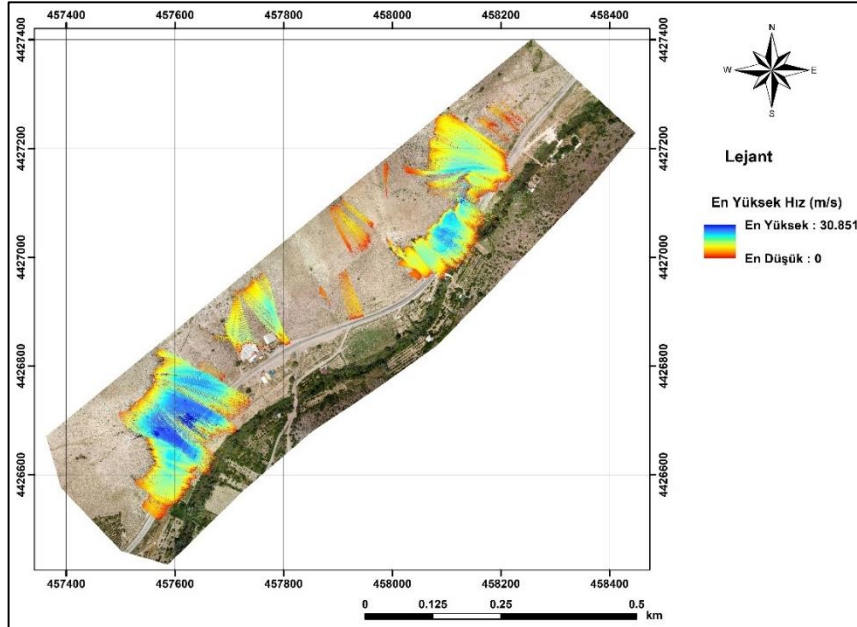
Şekil 15. Blok sıçrama yüksekliği (m)

Figure 15. Block jump height (m)



Şekil 16. Kaya düşme modellemesine ait en yüksek toplam kinetik enerjiler

Figure 16. Maximum total kinetic energy values of rockfall modeling



Şekil 17. Kaya düşme modellemesine ait en yüksek hızlar

Figure 17. Maximum velocities of rockfall modeling

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Zir Vadisi ve yakın civarının kaya düşmesinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada; üç boyutlu kaya düşmesi analiz programı HY-STONE kullanılmıştır. HY-STONE blokların düşme sonrasında izleyeceği yolu üç boyutlu izleme imkanı verebilmekte, tek bir profil üzerinden değil sayısal yükseklik modeli üzerinden çalışmaktadır. Bu durum gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının daha temsil edici sonuçlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Çalışma kapsamında sayısal yükseklik modelinin belirlenmesi amacıyla İHA verilerinden faydalanılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında düşmüş ve potansiyel kaya düşmesi kaynak alanları yerinde tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında Zir Vadisi şevlerinde toplam 36.59 ha alanda kaya düşmesi analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında alanın kaya düşmelerinin mühendislik önlemleri için gerekli karakteristik bilgileri (sıçrama yüksekliği, enerjisi, hızı, yayılma alanı) çıkarılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarından görüldüğü üzere bloklar yüksek hız ve enerjiye ulaşmakta olup, bu durum dikkate alındığında; kaya düşmesi kaynak alanı, risk altındaki eleman olan karayoluna, prefabrik yapılara, su deposu, çeşme, bahçe, ekili tarla gibi alanda bulunan yapılara çok yakındır. Karayolunun hemen kenarında yer alan kaya düşmesi kaynak alanları tehlikenin boyutunu artırmaktadır. Bu nedenle bu alanlarda hasar görme riski artmaktadır. Yapılan modelleme çalışmalarından elde edilen blok ilerleme mesafesi haritasına göre; blokların bir çok alanda karayolunu geçtiği veya karayoluna düştüğü görülmektedir. Kaya düşmeleri özellikle şevlerin hemen eteğinde yer alan karayolunu tehdit etmektedir. Modelleme çalışmalarında kara yoluna düşen blokların hızları sınırlı bir alanda 30 m/s' yi bulmakta olup; yaklaşık ortalama 13 m/s hızla

karayoluna düşmektedir. Yapılan değerlendirmelerle düşen blokların ortalama boyutu 50 cm olup; yola düşmüş ve sonrasında yol kenarına alınmış bloklara bakıldığında bu ortalamanın üzerine çıkan bloklar da yer almaktadır.

Kaya düşmelerinin kaynak bölgesinde yer alan birim; süreksizlikler ve kaya düşmelerinin gerçekleştiği aglomera-tüf özellikte olan malzeme nedeniyle, yağışlı ve donma-çözünme döngülerinin yaşandığı dönemlerde bir dayanım azalmasına maruz kalmaktadır. Dolayısı ile kaynak bölgede suyun varlığı da kaya düşmelerini tetiklemektedir. Bu alanda suyun drene edilmesine yönelik yapılacak çalışmalar gerek kaya düşmesi ve gerekse yamaçlarda biriken molozların ileride hareketine neden olacak bir başka doğal tehlikenin ortaya çıkmasını önlemede de katkı sağlayacaktır.

Çalışma, doğal sit-sürdürülebilir koruma ve kontrollü kullanım alanı olarak tescil edilmiş bir bölgenin, yoğun bir araç akışının bulunduğu bir karayolunun ve bölgedeki diğer risk altındaki elemanların kaya düşmelerinden korunması için gereken çalışmaların yapılabilmesi için literatüre önemli katkı sağlayacak niteliktedir. Bu çalışma ülkemizde gerek jeolojik miras olarak bulunan doğal oluşumların ve gerekse tarihi ve kültür mirası şeklindeki yapıların korunması konusunda ileride yapılacak çalışmalarda da yol gösterici nitelikte olacaktır. Bu kapsamda gerçekleştirilen modelleme çalışmaları Zir vadisi ve şevleri için yapılan ilk sistematik çalışma olup, bu metodolojinin hem Zir vadisi hem de diğer kültür varlıkları için kullanılması mühendislik uygulamalarının etkinliğini artıracaktır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi FHD-2022-20045 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Yazar, HY-STONE yazılımının kullanımı için, Prof. Dr. Giovanni Battista Crosta'ya, Prof. Dr. Paolo Frattini'ye ve Doç.Dr. Federico Agliardi'ye, arazi çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisi H. Serkan Tezer'e, laboratuvar çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisi Zeynel Gök ve Jeoloji Mühendisi Serkan Pişmiş'e teşekkürlerini sunar. Ayrıca yapıcı eleştirileri için hakemlere teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Agliardi, F., Crosta, G., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40, 455–471.
- Agliardi, F., Crosta, G. B. and P. Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1059–1073.
- Ağca, M., Yeşiloğlu-Gültekin, N., Efdal Kaya, E., 2020. İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. *Geomatik Dergisi*, 5(2); 134-145.
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A.Ö., Akın, M.K., Topal, T., 2019. Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 211-232.
- Akyürek, B., Duru, M., Sütçü, Y.F., Papak, İ., Şaroğlu, F., Pehlivan, N., Gönenç, O., Granit, S., Yaşar, T., 1997. 1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara-F15 Paftası, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Albarelli, D. S. N. A., Mavrouli, O. C. Nyktas, P., 2021. Identification of potential rockfall sources using UAV-derived point cloud. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80:6539–6561.
- Alptekin, A., Çelik, M.Ö., Doğan, Y., Yakar, M., 2019. Mapping of a rockfall site with an unmanned aerial vehicle, Mersin *Photogrammetry Journal*, 1(1); 12-16 Mersin *Photogrammetry Journal* <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mephoj>
- Assali, P., Grussenmeyer P., Villemin T., Pollet N., Viguiet, F. 2014. Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66, 102-114.
- Bilgin, A.Z., 2014. 1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Ankara İ28 Paftası, MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Bilgin, H.A., Düzgün, Ş., Aras, C., Kemeç, S., Gündoğan, Ü., Çakmak, B.B., 2012. Mardin Kalesi Kaya Düşmeleri Analizi ve Alınabilecek Önlemler Raporu, Kuzgun Bilişim Danışmanlık Madencilik İnşaat Enerji Mimarlık Eğitim ve Ticaret Ltd. Şti., Teknokent Projesi.
- Chiabrande, F., Lingua, A., Piras, M., 2013. Direct Photogrammetry using UAV: Tests and First Results. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, 4 – 6 September 2013, Rostock, Germany
- Crosta, G.B. and F. Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 407–422
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü. 2018. <https://tvk.csb.gov.tr/ankara-ili-sincan-ilcesi-zir-vadisi-dogal-sit-alani-dogal-sit->

- surdurulebilir-koruma-ve-kontrollu-kullanım-alani-olarak-tescil-edilmistir.-duyuru-366770 (Erişim Tarihi: 01.05.2023)
- Dadashzadeh, N., C. Aras, C., N. Yesiloglu, N., Bilgin, A., Duzgun, H.S.B, 2014. Analysis of Potential Rockfalls and Protection Measures for the Mardin Castle, Turkey. Eurock 2014 conference proceeding.
- Dinçer İ., Akın M., Orhan A., 2022. Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Analizi: Kapadokya Bölgesinden Bir Örnek. Yer Mühendisliği Dergisi, 46-59.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Türkecan, A., Evcimen, Ö., Atakay, E. ve Görmüş, T., 2009. Ankara ve Yakın Çevresinin Tersiyer Volkanitleri. MTA Rapor No: 11164, Ankara.
- Ersoy, O., 2003. Soğumakta Olan Lav Akıntısının Patlamalı Çökmesi İle Oluşan Blok ve Kül Akışının ve Patlama Zonu Özelliklerinin İncelenmesi. Zir Çayı Lav Akışı Örneği, KB Ankara, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s., Ankara.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94, 419-437.
- 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 Earth Syst. Sci.*, 15, 163–169.
- Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28, 1079–1093.
- Keskin, I., 2013. Evaluation of rock falls in an urban area: the case of Boğaziçi (Erzincan/Turkey). *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-013-2247-9.
- Öztürk, M.Z., Utlu, M., Şimşek, M., 2022. Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde), *Yerbilimleri*, 43 (2), 182-196.
- Polat, A., 2020. CBS Tabanlı 3B Kaya Düşmesi Analizi ve Veri Hızılama Süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, Sayı 3.
- Sadagah, B., 2010. Rockfalls risk reduction and redesign of rock slopes using rockfall program. *ISRM International Symposium 6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering*, New Delhi, India.
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J.C., Mateos, R.M., Tomás, R., Pastor, J.L., Cano, M., Herrera, G., 2018. Rockfall Simulation Based on UAV Photogrammetry Data Obtained during an Emergency Declaration. Application at a Cultural Heritage Site, *Remote Sens.*, 10, 1923; doi:10.3390/rs10121923
- Saroglou, C., Asteriou, P., Zekkos, D., Tsiambaos, G., Clark, M. and Manousakis, J., 2018. UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic rockfall in Lefkada island, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 321-333.

- Şasi, A. and Yakar, M., 2018. Photogrammetric modelling of Hasbey Dar'ülhuffaz (masjid) using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3 (1), 6- 11.
- Şener, E., 2019. İnsansız Hava Araçları Kullanılarak Olası Kaya Düşmelerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı 3D Modellenmesi: Kasımlar Köyü (Isparta-Türkiye) Örneği, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23 (2), 419-426.
- Tagliavini, F., Reichenbach, P., Maragna, D., Guzzetti, F. and Pasuto, A., 2009. Comparison of 2-D and 3-D computer models for the M. Salta rock fall, Vajont Valley, northern Italy. *Geoinformatica*, 13, 323–337.
- Topal, T., Akin, M., Ozden, U.A., 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environ Geol*, 53, 191–200.
- Topal, T., Akin, M. K., Akin, M., 2012. Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Nat Hazards*, 62, 255–274.
- Tunusluoglu, M. C., Zorlu K., 2009. Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental Geology*, 56, 963–972.
- Uğur, H., Akpınar, N., 2003. Yenikent Zir Vadisinde Yer Alan Kum Ocaklarının Neden Olduğu Çevre Sorunları ve Bu Alanların Geri Kazanım Olanakları, *Tarım Bilimleri Dergisi*, 9 (1) 35- 39.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z.A., and Kasmer, Ö., 2006. Assessment of environmental and engineering geological Problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. *Environmental Geology*, 50, 473-494.
- Ulvi, A. and Toprak, A.S., 2016. Investigation of three-dimensional modelling availability taken photograph of the unmanned aerial vehicle; sample of kanlıdivane church. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 1(1), 1- 7.
- Utlu, M., Öztürk, M.Z., Şimşek, M., 2020. Rockfall analysis based on UAV technology in Kazıklıali Gorge, Aladağlar (Taurus Mountains, Turkey). *International Journal of Environment and Geoinformatics* 7(3): 239-251.
- Varol O.O., Mutluhan, A., Orhan A, Dinçer İ., 2023. Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Olasılıksal Analizlerle ve Ampirik Yöntemlerle Değerlendirilmesi: Kayseri-Soğanlı Yerleşim Yeri Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 47:1–28.
- Vasuki Y., Holden, E., Kovesi, P., Micklethwaite, S. 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22–32.
- Wang, X., Zhang, L., Wang, S., Agliardi, F., Frattini, P., and Crosta, G.B., 2012. Field investigation and rockfall hazard zonation at the Shijing Mountains Sutra caves cultural heritage (China). *Environmental Earth Sciences*, 66, 1897-1908.
- Yesiloglu-Gultekin, N.,Gokceoglu, C.,Sonmez, H., 2012. Geohazard reconnaissance mapping for a settlement area. *Environmental Earth Sciences*, 66, 6, 1653-1666.