

Araştırma Makalesi / Research Article

Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği

Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses: Akköy (Ürgüp) Case

Mutluhan AKIN¹ , İsmail DİNÇER¹ , Ahmet ORHAN¹ ,
Ali Özgün OK² , Müge K. AKIN³ , Tamer TOPAL⁴

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir

²Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri

⁴Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş (Received): 08 Mart (March) 2019 / Düzeltme (Revised): 09 Nisan (April) 2019 / Kabul (Accepted): 20 Nisan (April) 2019

ÖZ

Nüfus yoğunluğunun fazla olmadığı kaya düşme tehlikesi altındaki yerleşim yerlerinde kaya düşmelerinden korunmak amacıyla kaya tutma hendekleri veya alanları inşa edilebilmektedir. Ancak, bu tür koruma yapılarının tasarımında çoğu zaman sahaya özgü gerekli mühendislik incelemeleri ve analizleri yeterince gerçekleştirilmemektedir. Bu nedenle, kaya tutma hendekleri zaman zaman kaya düşmelerinden korunmada yeterli olamamaktadır. Bu çalışma kapsamında, turistik işletmelerin de bulunduğu Akköy (Ürgüp) yerleşiminde düşen kaya bloklarının yaşam alanlarına ulaşmasını engellemek amacıyla üst kotlarda 2012 yılında inşa edilen 2 m derinliğindeki ve 1 km uzunluğundaki kaya tutma hendeğinin performansı 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan kaya düşme risk sınıflamasına göre yerleşim orta derecede kaya düşme riski altındadır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılan sayısal yüzey modeli insansız hava aracı ile alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen nokta bulutu verisi ile oluşturulmuştur. Arazi gözlemlerinde daha önceden düşen ignimbirit bloklarının boyutlarının 2 m'ye ulaşabildiği belirlenmiştir. Öte yandan, kaynak bölgesindeki yüksek süreksizlik devamlılığı, düşebilecek blokların boyutlarının da büyük olabileceğini işaret etmektedir. RocPro3D yazılımında gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda, genel olarak düşen blokların kaynak zon ile yerleşim yeri arasında kazılan hendek tarafından tutulduğu ancak bazı bölümlerde bu blokların kaya tutma hendeğini aşarak yuvarlanmaya devam edebileceği ortaya konmuştur. Buna göre, Akköy yerleşimi kısmen de olsa halen kaya düşme tehlikesi altındadır. Kaya tutma hendeğinin zaman içerisinde periyodik olarak temizliği yapılmadığı takdirde hendeğin kapasitesinin azalması ile birlikte tehlikenin boyutu daha da artacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kaya Düşmesi, Hendek, 3-Boyut, Performans, Ürgüp

ABSTRACT

Rockfall ditches or areas can be constructed in order to protect against rockfalls in settlements that are in danger of rockfalls when the population density is not high. Nevertheless, in the design of such protection structures, essential site-specific engineering studies and analyzes are often not carried out appropriately. Therefore, rockfall

ditches are occasionally not capable of preventing rockfalls. Within the scope of this study, the performance of a 2 m-deep and 1 km-long rockfall ditch excavated at the upper elevation of touristic Akköy (Ürgüp) settlement in 2012 in order to prevent the entrance of falling rocks to the residential area was evaluated on the basis of 3-dimensional rockfall analyses. According to the rockfall risk classification, the settlement is under moderate rockfall risk. The digital surface model used in 3-dimensional rockfall analyses was generated by point cloud data obtained from photogrammetric images taken by unmanned aerial vehicle. During field observations, it was determined that the dimension of the previously fallen ignimbrite blocks could reach up to 2 m. On the other hand, the high persistency of discontinuities in the source zone indicates that the dimensions of the potential rockfall blocks may be large. As a result of the 3-dimensional rockfall analyses carried out in RocPro3D software, it was defined that the falling blocks are generally caught by the ditch excavated between the source zone and the settlement, but in some sections of the ditch those blocks may continue to roll over the rockfall ditch. Eventually, Akköy settlement is still partially under the danger of rockfalls. If the rockfall ditch is not periodically cleaned in the course of time, the extent of danger will enlarge with the decrease in the capacity of the trench.

Keywords: Rockfall, ditch, 3-dimension, performance, Ürgüp

GİRİŞ

Kaya kütle duraysızlıklarından biri olan kaya düşmesi, yamaç veya şevlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılan kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle yamaç/şev eğimi yönündeki oldukça hızlı ve ani hareketi olarak tanımlanabilir (Varnes, 1978). Süreksizlik yüzeylerindeki suların donma-çözülme etkisi ile oluşturduğu basınçlar, ağaç köklerinin büyümesi, ayrışma ve deprem dalgaları gibi çeşitli faktörlerin etkisi altında kaynak zondan kopan kaya blokları, dik yamaçlardan aşağı doğru serbest düşerek, eğimin azalmasına bağlı olarak yuvarlanarak, kayarak ve/veya sıçrayarak hareket ederler (Wyllie, 2015). Kaya düşmeleri, kaynak alan ve tetikleyici unsurlar açısından değerlendirildiğinde kestirilmesi güç bir kütle duraysızlık türüdür. Yamaç yüzeyinde uzun süre duraylılığını koruyan bloklar, aniden kütleden ayrılarak düşebilmekte, can ve mal kaybına neden olabilmektedir.

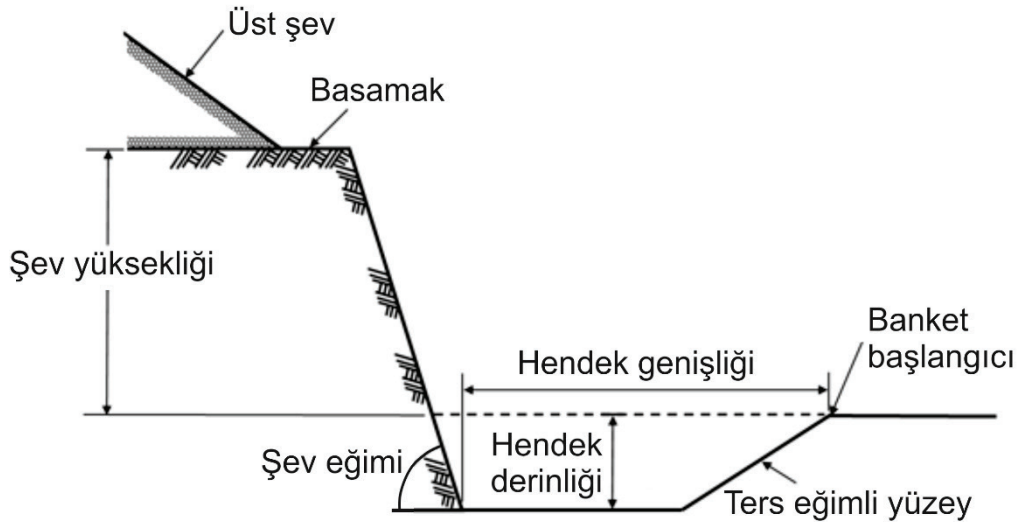
Bilindiği üzere ülkemiz jeolojik, morfolojik ve iklimsel konumu gereği farklı doğal afetlerin tehdidi altındadır. Ortaya çıkardıkları etki açısından depremler öne çıkan en önemli doğal afet türü olmasına rağmen, kaya kütle duraysızlıkları ve özellikle kaya düşmeleri de

ülkemizin maruz kaldığı önemli afet türlerinden biridir. Bu bağlamda, can ve mal kaybına neden olan kaya düşme sıklığı açısından değerlendirildiğinde ülkemiz içerisinde Kayseri, Erzurum ve Nevşehir illeri ön plana çıkmaktadır (Gökçe vd., 2008). Kaya düşmesi kaynaklı problemlerin önüne geçilebilmesi için yerleşim yerlerinde ve ulaşım güzergahlarında kaya düşme analizlerinin yapılarak tehlike sınırlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Topal vd., 2007; Tunusluoğlu ve Zorlu, 2009; Topal vd., 2012; Dinçer vd., 2016; Kayabaşı, 2018; Sarro vd., 2018; Fanos ve Pradhan, 2019). Büyük bir bölümü Nevşehir ili sınırları içerisinde yer alan Kapadokya yöresinde kaya düşmelerinin can ve mal kaybına neden olmasının yanı sıra, kültürel ve doğal miras üzerinde de olumsuz etkileri bulunmaktadır. Kapadokya ve çevresinde kaya düşmelerinin yoğunlaştığı alanlar jeolojik birimler açısından değerlendirildiğinde, mevcut duraysızlıklar Neojen yaşlı volkanik birimler içerisinde meydana gelirken, litolojiler üzerindeki farklı erozyon etkilerinin kaya düşmelerini tetikleyen en önemli unsur olduğu belirtilmiştir (Zorlu vd., 2011). Düşük yamaç eğimine sahip alt seviyelerde marn, kıltaşı ve tuf gibi ayrışmaya ve erozyona karşı düşük duraylılığa sahip volkanosedimanter birimler yer alırken, dik

morfoloji sunan ve kaya düşmeleri için kaynak zonunu oluşturan üst seviyelerde ise bazalt ve iyi kaynaşmış ignimbirit gibi daha duraylı litolojiler gözlenmektedir. Bu tür jeolojik ve morfolojik yapıların gözlemlendiği alanlarda önemli ölçüde kaya düşmesi tehlikesi yaşanmaktadır.

Kaya düşmelerinin meydana gelmesini ve ulaşım hatlarına veya yerleşim yerlerine zarar vermesini önlemek amacıyla birçok farklı yapısal önlem ve koruma yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin bir kısmı ağaçlandırma, kaya tutma hendekleri ve toprak seddeler gibi doğal veya yarı-doğal çözümleri içerirken, diğer önemli bir bölümü de tamamen endüstriyel malzemelerden üretilen kaya tutma bariyerleri ve duvar türü

yapıları kapsamaktadır (Volkwein vd., 2011). Kaya tutma hendekleri, düşen kaya bloklarını tehlike altındaki yerleşim yerlerine veya ulaşım hatlarına ulaşmadan önce enerjilerini düz veya ters eğimli topoğrafik yüzeyler üzerinde veya belirli derinlikteki çukurlar içerisinde sönmüleyerek durdurmaya yarayan, çok fazla mühendislik uygulaması gerektirmeyen, ekonomik kaya düşmesi koruma yöntemlerinden bir tanesidir (Şekil 1). Kaya tutma hendeklerinin yapımı ve bakımı kolay, imatları da maliyetli olmadığından, ulaşım hatları kenarlarında ve küçük yerleşim yerlerinin üst kotlarında kaya düşmelerinden korunmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedirler.



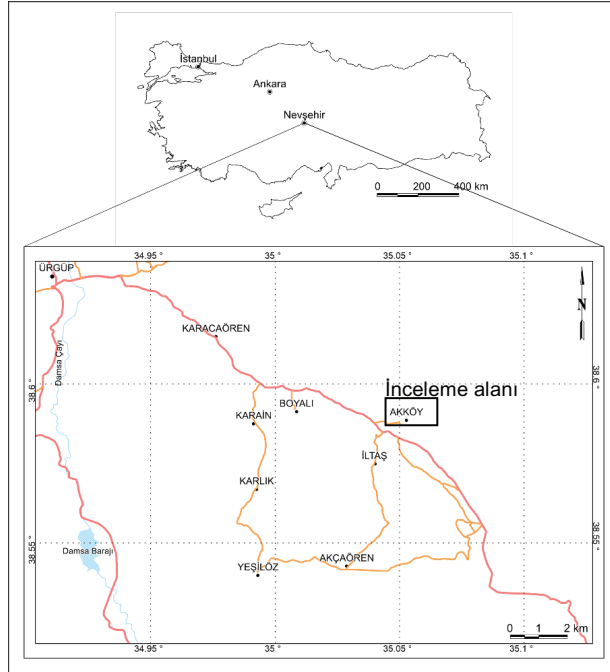
Şekil 1. Bir kaya tutma hendeğinin genel kesit görünümü (Turner ve Schuster, 2012).

Figure 1. A general cross-sectional view of rockfall ditch (Turner and Schuster, 2012).

Bir kaya tutma hendeğinin düşen kaya bloklarını durdurabilmesi için doğru geometride ve lokasyonda projelendirilmesi oldukça önemlidir. Bu tasarımda göz önüne alınması gereken başlıca nitelikler arasında hendeğin yeri, genişliği, derinliği, şekli ve taban yapısı yer almaktadır. Bu nedenle hendek bileşenlerin tasarlanmasında incelenen sahaya ait kaya düşmesi hatlarına ait özelliklerin ve düşen blokların dinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kaya tutma hendeklerinin projelendirilmesinde başlıca iki yöntem izlenebilir. Birinci yöntemde hendek tasarımı Ritchie Hendek Ölçütü (Ritchie, 1963; FHWA, 1989) veya Kaya Düşmesi Tutma Alanları Tasarım Rehberi (Pierson vd., 2001) gibi önceden hazırlanmış grafikler veya yol gösterici şartnameler doğrultusunda yapılabilmektedir. İkinci ve daha gerçekçi olan

yöntemde ise 2 veya 3-boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirildikten sonra kaya bloklarının davranış özellikleri ortaya konmakta ve belirlenen blok sıçrama yükseklikleri, darbe noktaları vb. gibi parametrelere bağlı olarak kaya tutma hendeklerinin boyutlandırması yapılabilmektedir. Ancak, uygulamalarda çoğu zaman herhangi bir tasarım ölçütü kullanılmadan veya kaya düşme modelleri gerçekleştirilmeden kaya tutma hendekleri inşa edilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kaya düşmelerinin yoğun olarak gözlemlendiği bir yerleşim yeri olan Akköy'de (Ürgüp-Nevşehir) 2012 yılında inşa edilen kaya tutma hendeğinin, kaya düşmelerinin önlenmesinde gösterebileceği performans 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiştir. İnceleme alanına ait yerbulduru haritası Şekil 2'de sunulmaktadır.



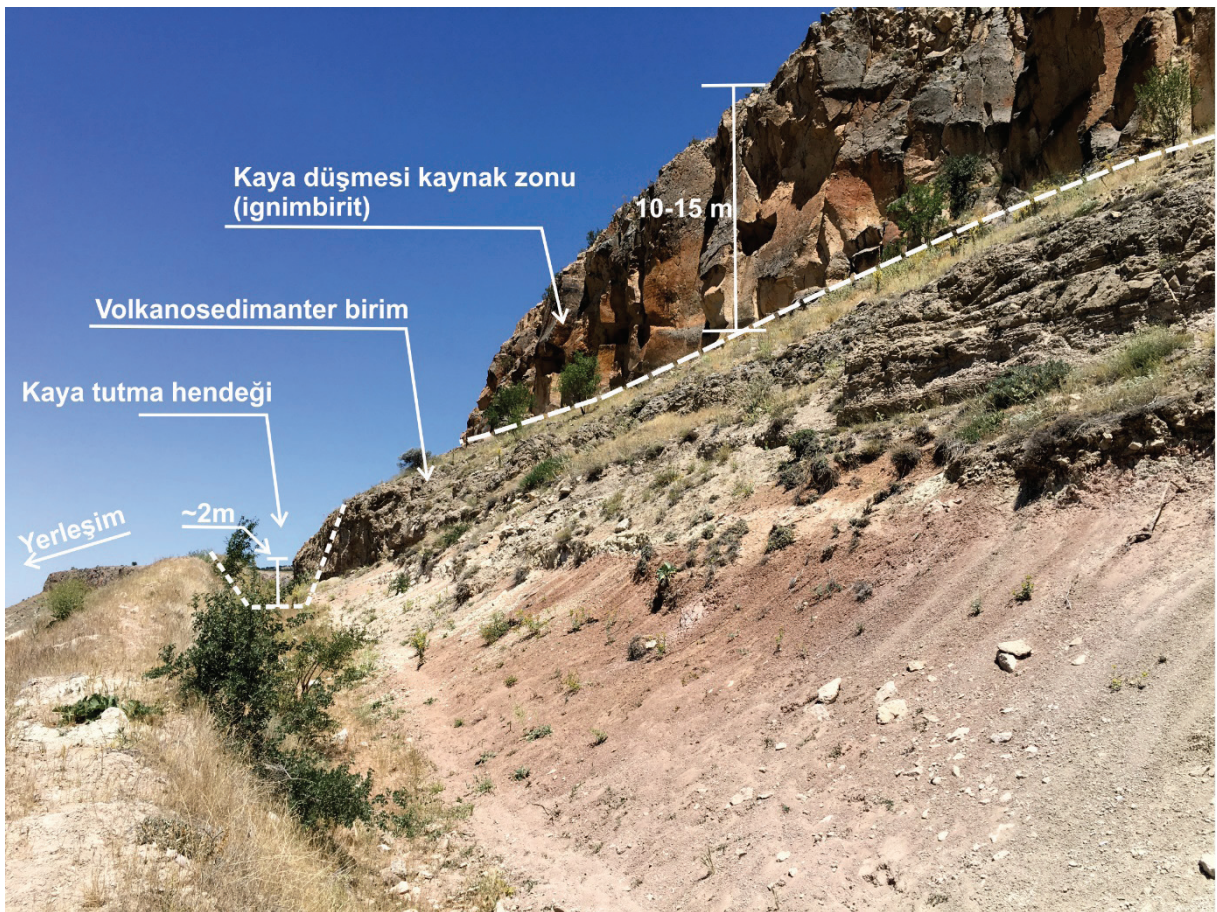
Şekil 2. İnceleme alanı yerbulduru haritası.

Figure 2. Location map of the study area.

İNCELEME ALANININ TANITIMI VE JEOLojİSİ

Akköy yerleşimi Ürgüp'ün yaklaşık 15 km güneydoğusunda yer almaktadır. Yerleşim sarp bir topoğrafyanın yamaçlarında kurulmuştur. Köy statüsünde bulunmasına rağmen Akköy'de halen faaliyet gösteren turistik tesisler mevcuttur. Yerli ve yabancı turistler doğa güzellikleri ve sakinlik açısından bu yerleşim yerinde konaklamaktadır.

Bölgede 2010'lu yıllardan önce meydana gelen kaya düşmeleri nedeniyle yerleşim halkı ve turistler can ve mal kaybı tehlikesiyle karşı karşıya kalmıştır. Bu nedenle, 2012 yılında İl Özel İdaresi ve Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı tarafından yerleşimin üst kotlarındaki dik kayalıkların topuk kısmında yaklaşık 2 m derinliğinde ve 1 km uzunluğunda bir kaya tutma hendeği imal edilmiştir (Şekil 3).

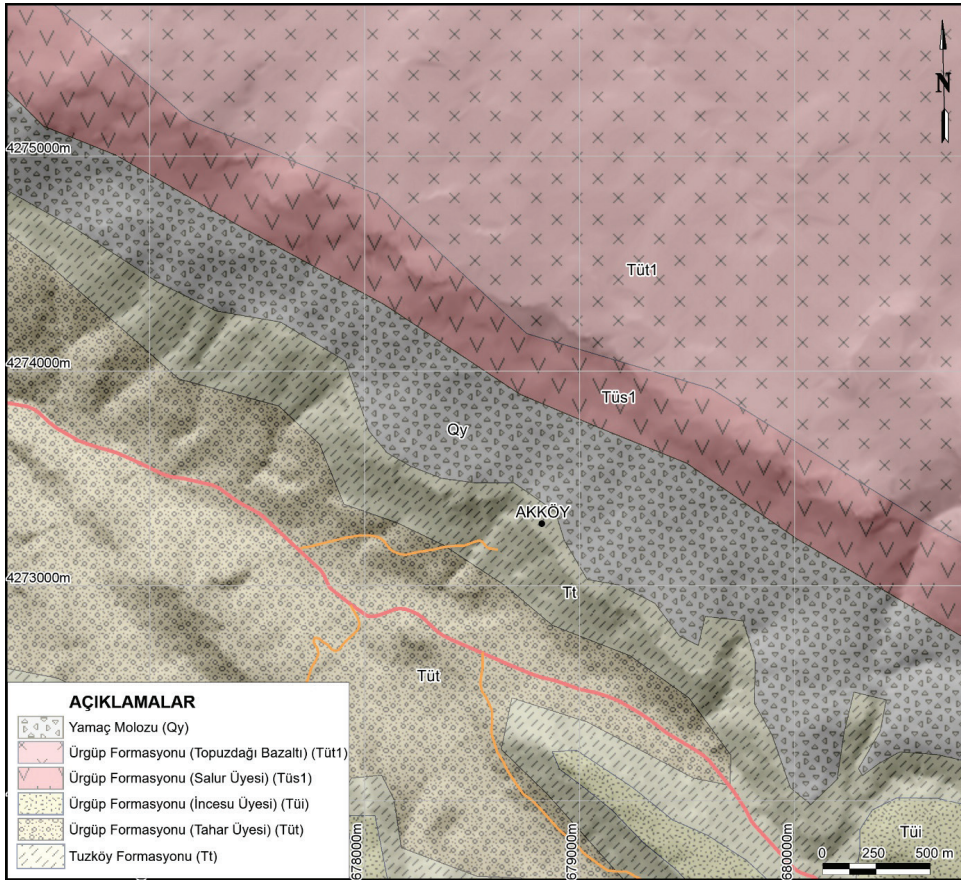


Şekil 3. İnceleme alanındaki kaya tutma hendeğinden ve kaynak zonundan bir görünüm.

Figure 3. A view of rockfall ditch and source zone at the study area.

Akköy ve yakın çevresine ait jeoloji haritası Şekil 4'te gösterilmiştir. Akköy yerleşiminin bulunduğu bölgede, jeoloji haritasından da görüleceği üzere, Ürgüp Formasyonu'na ait farklı volkanik ve volkanosedimanter kaya birimleri yayılım göstermektedir. İnceleme alanının üst kotlarında Topuzdağı Bazaltı (Tüt1) olarak adlandırılan kısmen mafik bazaltik lav akıntısı yer almaktadır. Birimin alt düzeyleri olivinsiz, ojit ve hiperstence zengin, üst seviyeleri ise olivin bazalt özelliğindedir. Akköy'ün kuzeydoğusunda, Topuzdağı Bazaltı'nın alt seviyelerinde inceleme alanındaki kaya düşmelerinin de kaynak zonunu oluşturan ignimbiritler yer almaktadır. Ürgüp Formasyonu Salur üyesi (Tüs1) genelde kum,

kumtaşı ve tüflü çakıltaşından oluşmaktadır. Çakılların hemen hepsi gri – siyah bazalt ve andezit türündedir. Aynı bileşimli piroklastik malzeme de içerir. Ürgüp Formasyonu İncesu üyesi (Tüi) genel olarak inci grisi, pembe renkli, ignimbirit ve dasitik tüften oluşmaktadır. Birimde üç düzey ayırtlanmıştır. Alt düzey ince taneli, homojen, gözeneksiz, kaynaşmamış olup, pomzaca zengindir. Makro biyotit, kuvars ve feldspat içerir. Orta düzey gözenekli ve orta tanelidir. Matriksi alt düzey ile aynıdır. Üst düzey ise masif, ince – orta taneli, boşluksuz, volkanik cam parçaları ve pomza içermektedir. Birimin yaklaşık kalınlığı 60 m'dir (Atabey, 1989).



Şekil 4. İnceleme alanı jeoloji haritası (Atabey, 1989).

Figure 4. Geology map of the study area (Atabey, 1989).

Bölgedeki Ürgüp Formasyonu Tahar üyesi (Tüt), kumlu matriks içinde yer alan pomza ve lav parçaları ile pembemsi beyaz renkli tüfit tabakalarının ardalanmasından oluşmaktadır. Üye orta – kalın tabakalı olup, toplam 80 m kalınlığındadır. Akköy'ün hemen güneydoğusunda gözlenen Tuzköy Formasyonu (Tt) sarı renkli, ince tabakalı ve laminalı, bol biyoturbasyonlu silttaşı, laminalı silisli kiltası, ince tabakalı ve laminalı kumtaşı ve tüfit ardalanmasından oluşmuştur (Atabey, 1989). Yamaç eğimlerinin azaldığı noktalarda yamaç molozları (Qy) gözlenmektedir.

KAYA DÜŞMESİ KAYNAK ZONUNDAKİ DURAYSIZLIK MEKANİZMASI

Akköy yerleşiminin kuzeydoğusunda yer alan ve yaklaşık 10-15 m yüksekliğindeki ve 80-85° yamaç eğimine sahip ignimbiritler bölgedeki kaya düşmelerinin ana kaynak zonunu oluşturmaktadır. Söz konusu ignimbiritlerde soğuma etkisiyle meydana gelmiş dik ve dike yakın soğuma çatlakları göze çarpmaktadır. Yüksek devamlılığa sahip bu süreksizlikler boyunca ayrılan kaya blokları kaya düşmelerini oluşturan ana unsurdur (Şekil 5).



Şekil 5. Kaynak zonundaki dik süreksizlikler ve potansiyel duraysız bloklar.

Figure 5. Vertical discontinuities in the source zone and potentially unstable blocks.

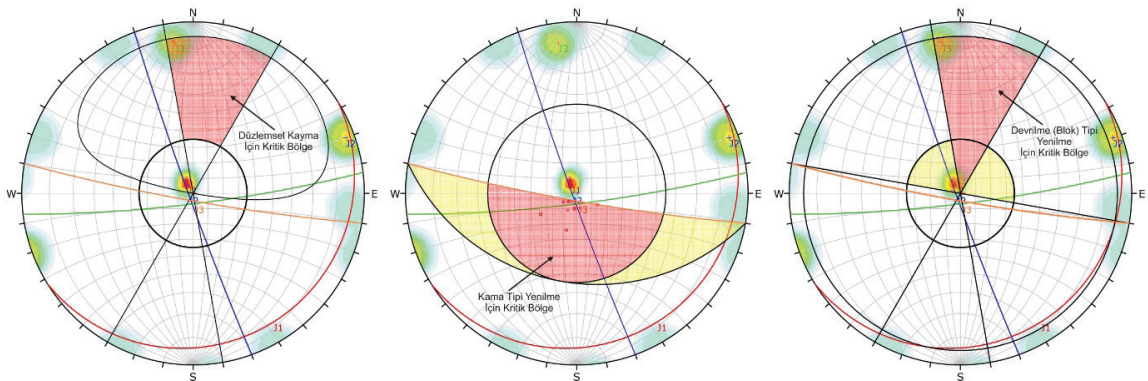
Kaynak zonunda gerçekleştirilen süreksizlik hat etütleri sonucunda ignimbiritlerde 7/148, 87/250 ve 83/173 eğim/eğim yönü değerine sahip üç egemen süreksizlik takımı belirlenmiştir. Yamaç yönelimleri genel olarak güneybatıya doğru olup, kinematik analizler için yamaç eğim/eğim yönü 85/190 olarak alınmıştır. Araziden alınan blok numunelerden laboratuvarında silindirik karotlar alınmış ve bu karotlar üzerinde gerçekleştirilen tilt deneyleri sonucunda Barton ve Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak ignimbiritlerdeki süreksizlik sürtünme açısının 35° civarında olduğu tespit edilmiştir.

İnceleme alanındaki kaynak zon için Dips v7.0 yazılımında (Rocscience Inc., 2019) gerçekleştirilen kinematik analizler sonucunda, ignimbiritlerde süreksizlik ve yamaç yönelimlerine bağlı olarak düzlemsel, kama ve devrilme türünde süreksizlik kontrollü yenilmelerin meydana gelme potansiyeli olduğu saptanmıştır (Şekil 6). Kinematik analizlerden elde edilen sonuçlar arazi gözlemleri ile uyum göstermekte olup, Şekil 5'teki fotoğraflarda da görüldüğü üzere birbirini kesen iki dik süreksizlik kaynak zonda kama oluşumlarına neden olmaktadır. Öte yandan, yamaç yönelimine ve eğimine yakın olan süreksizlik setine bağlı olarak düzlemsel kayma ve blok devrilmesi oluşma potansiyeli de bulunmaktadır.

İNCELEME ALANINDAKİ KAYA DÜŞME RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Akköy (Ürgüp) yerleşiminde daha önceki yıllarda kaya düşmeleri gözlenmiş olup, bu yerleşim için kaya düşme risk durumu Saroglou vd. (2012) tarafından yerleşim yerleri için önerilen risk sınıflaması ile değerlendirilmiştir. Bu kaya düşmesi risk sınıflamasında kaya düşmesi riski farklı kategoriler altında değerlendirilmiş olup, öncelikle her bir kategori için farklı ağırlık değerleri atanmıştır (Çizelge 1).

Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen sınıflamada A kategorisi altında şev geometrisi ve kaya düşme kaynak zonu konumu, şev pürüzlülüğü, bitki örtüsü durumu gibi parametreler dikkate alınmış olup, bu parametrelerin toplam puanlamadaki (toplam puan 100 üzerinden değerlendirilmiştir) etki oranı %25'tir. A grubundaki parametreler ve bu parametrelere ait sınıflama aralıkları ana sınıflama tablosu olan Çizelge 2'de sunulmaktadır. İlgili sınıflamada jeolojik yapı ve kaya düşmesinin gerçekleştiği kaya kütlelerine ait özellikler B kategorisi altında incelenmiştir ve bu parametrelerin de toplam puanlamadaki etki oranı %25'tir. Yağış, sismik aktivite, yamaç/şevdeki drenaj koşulları C kategorisindedir ve



Şekil 6. Kaynak zonundaki ignimbiritler için düzlemsel, kama ve devrilme (blok) türü yenilmelerin kinematik analizi.

Figure 6. Kinematical analysis of planar, wedge and toppling (direct) failure for the ignimbrites at the source zone.

Çizelge 1. Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen kaya düşmesi risk sınıflamasında kullanılan dört parametre ve bu parametreler için atanan ağırlık değerleri.

Table 1. Four parameters used for the rockfall risk classification suggested by Saroglou et al. (2012) and the weight values assigned to those parameters.

Parametre kategorisi	Tanımlama	Kategori ağırlığı
A	Şev geometrisi ve kaya düşme kaynak zonu konumu, şev pürüzlülüğü, bitki örtüsü durumu	%25
B	Jeoloji ve kaya kütlesi durumu	%25
C	Potansiyel tetikleyici faktörler (yağış, sismik aktivite), drenaj durumu	%10
D	Sonuçları ve ilgili faktörler, kaya düşmesi geçmişi	%40

kaya düşme risk sınıflamasındaki etki oranları %10'dur. Son olarak, kaya düşmelerinin yerleşim yeri için oluşturacağı sonuçlar ve bölgede daha önceki yıllarda yaşanan kaya düşmeleri D kategorisinde değerlendirilmiş olup, en yüksek etki oranı (%40) bu kategoriye atanmıştır.

Çizelge 2'de Akköy yerleşimi için Saroglou vd. (2012) yöntemine göre hazırlanan kaya düşmesi risk sınıflaması verilmektedir. Örneğin inceleme alanındaki yamaç açısı 85° civarındadır. Buna göre, 85 derecelik şev açısı >60° (çok yüksek, askıda) sınıfına girmektedir ve bu sınıfa atanan puan 100'dür. Kategori/parametre ağırlık faktörü bu parametre için %A/7 (Çizelge 2'de kategori/parametre ağırlık faktörü sütunu) olarak dikkate alındığında, bu parametre için kaya düşmesi skorunun 7 olduğu $[(100*7)/100=7]$ belirlenmiştir. A, B, C ve D

kategorilerindeki farklı parametreler için yapılan değerlendirme sonucunda, tüm skor değerleri toplandığında Akköy yerleşimi için toplam kaya düşme riski puanı 49.4 olarak bulunmuştur. Bu değer, Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen ve Çizelge 3'te sunulan risk sınıflamalarına göre "orta" derecede kaya düşmesi risk sınıfını işaret etmektedir.

Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen kaya düşmesi risk sınıflama sistemi yerleşim yerleri için kaya düşme riskini ortaya koymak açısından yol gösterici olmakla birlikte, önerilen iyileştirme yöntemleri oldukça geneldir ve bu yöntemlerin detay çalışmalarla ortaya konması daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Söz konusu kaya düşmesi riski sınıflama sistemi, yerleşim yerlerinin kaya düşme riskinin belirlenmesinde uygulanabilecek bir yöntemdir.

Akın, Dinçer, Orhan, Ok, Akın, Topal

Çizelge 2. Akköy için Saroglou vd. (2012) yöntemine göre kaya düşme risk sınıflaması.

Table 2. The rockfall risk classification of Akköy according to Saroglou et al. (2012) method.

Parametre kategorisi	Parametre	Kategori/Parametre ağırlık faktörü	Tanım				Puan	Skor	
			25-40	40-50 (orta)	50-60 (yüksek)	>60 (çok yüksek, askıda)			
A	1. Şev açısı (°)	%A/7	25-40	40-50 (orta)	50-60 (yüksek)	>60 (çok yüksek, askıda)	100	7	
		Puanı	10	30	60	100			
	2. Şev yüksekliği (m)	%A/4	<15	15-30	30-60	>60	60	2.4	
		Puanı	10	30	60	100			
	3. Kaynak zonu yüksekliği (H toplam şev yüksekliği)	%A/7	Şevin alt kotlarından kaya düşmeleri (H/4)	Şevin orta kotlarından kaya düşmeleri (H/2)	Şevin orta-üst kotlarından kaya düşmeleri (3H/2)	Tüm şev yüzeyi boyunca kaya düşmeleri (H)	60	4.2	
Puanı		10	30	60	100				
4. Şev pürüzlülüğü	%A/3	Pürüzlü düzlemsel (sürtünme kayayı yavaşlatıyor)	Düzlemsel (kayayı hızlandırıyor)	Pürüzlü, dar hendekli (ziplamaya neden oluyor)	Çok pürüzlü, dar hendekli	60	1.8		
	Puanı	10	30	60	100				
5. Şev yüzeyi bitki örtüsü	%A/4	Yoğun bitki örtüsü, yüksek ağaçlar	alçak bitli örtüsü, çalılar	Seyrek bitkiler	Bitki örtüsü yok	60	2.4		
	Puanı	10	30	60	100				
B	6. Süreksizlik pürüzlülüğü/dolgu malzemesi	%B/6	Pürüzlü, basamaklı	Düz, basamaklı	Dalgalı veya köşeli parçalar içeren dolgu malzemesi, pürüzlülüğünden bağımsız veya orta derecede açıklık 2.5-10 mm	Düşük derecede pürüzlü veya katı kil dolgusu (>5 mm), pürüzlülüğünden bağımsız veya orta derecede açıklık 10-100 mm	Düzlemsel düz veya yumuşak kil dolgu (>5 mm), pürüzlülüğünden bağımsız veya yüksek derecede açıklık 10-100 mm	15	0.9
		Puanı	10	15	30	60	100		
	7. Süreksizlik yönelimi	%B/5	Stabilite için uygun	Orta	Kötü	Çok kötü	100	5	
		Puanı	10	30	60	100			
	8. Süreksizlik devamlılığı	%B/4	Çok düşük (<1m)	Düşük (1-2 m)	Orta (2-5 m)	Yüksek (5-10 m)	Çok yüksek (>10 m)	100	4
		Puanı	10	15	30	60	100		
	9. Süreksizlik yüzeyi tek eksenli basınç dayanımı (JCS, MPa)	%B/1	>30	20-30	5-20	<5, bozunmuş	60	0.6	
		Puanı	10	30	60	100			
	10. Sağlam kaya dayanımı (MPa) (Düşük dayanım yuvarlanan kaya bloklarının parçalanmasını, yüksek dayanım zıplamayı kontrol eder)	%B/1	<10	10-30	30-60	>60	30	0.3	
		Puanı	10	30	60	100			
	11. Kaya kütleli blokluğ/Blok hacmi (m ³)	%B/4	<1	1-2,5	2,5-4	4-8	>8	15	0.6
		Puanı	10	15	30	60	100		
	12. İncelenen şev genişliği boyunca daha önceden düşmüş tahmini blok adedi	%B/2	Yok	1-5	5-10	>10	100	2	
Puanı		10	30	60	100				
13. Karstlaşma	%B/2	Yok	Sevrek	Orta	Sık	10	0.2		
	Puanı	10	30	60	100				
C	14. Yağış koşulları ve yoğunluğu	%C/3	Nadir	Seyrek	Mevsimsel	Sık	Çok sık, tüm yıl boyunca	30	0.9
		Puanı	10	15	30	60	100		
	15. Permeabilite/Şevdeki drenaj durumu	%C/3	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük	30	0.9
Puanı		10	15	30	60	100			
16. Sismik tehlike (yer ivmesi, \bar{D})	%C/4	$\bar{D} < 0,16$	$0,16 < \bar{D} < 0,24$	$0,24 < \bar{D} < 0,36$	$\bar{D} > 0,36$	30	1.2		
	Puanı	10	30	60	100				
D	17. Kaya tutma zonunun genişliği (m)	%D/10	>20	10-20	5-10	2-5	Yok	10	1
		Puanı	10	15	30	60	100		
	18. Kaya düşmesi geçmişi	%D/5	Hic - birkaç	Nadiren	Birçok	Sık sık	Devamlı	30	1.5
		Puanı	10	15	30	60	100		
	19. Şevin ulaşılabilirliği	%D/5	Her türlü iyileştirme yöntemi uygun	İyileştirme yöntemlerinin çoğu uygun	İyileştirme yöntemlerinin birkaçı uygun	İyileştirme yöntemlerinin çok azı uygun	Şeve ulaşım çok zor	10	0.5
Puanı		10	15	30	60	100			
20. Çarpmanın potansiyel sonuçları ve yapıların değeri	%D/20	İhmal edilebilir; insan yapısı ve daimi aktivitesi mevcut değil	Düşük; insan aktivitesi az bir bölgede	İnsan aktivitesi orta derecede; düşük sıklıkta evler	Yüksek; sık insan mevcudiyeti; birçok ev	Çok yüksek; devamlı insan mevcudiyeti; yoğun verileşim	60	12	
	Puanı	10	15	30	60	100			
TOPLAM SKOR (EN FAZLA 100)								49.4	
KAYA DÜŞMESİ RİSK SINIFI								Orta	

Çizelge 3. Saroglou vd. (2012) risk sınıflamasında risk sınıfı açıklamaları ve önerilen iyileştirme yöntemleri.

Table 3. Risk class definitions of Saroglou et al. (2012) risk classification and suggested stabilization methods.

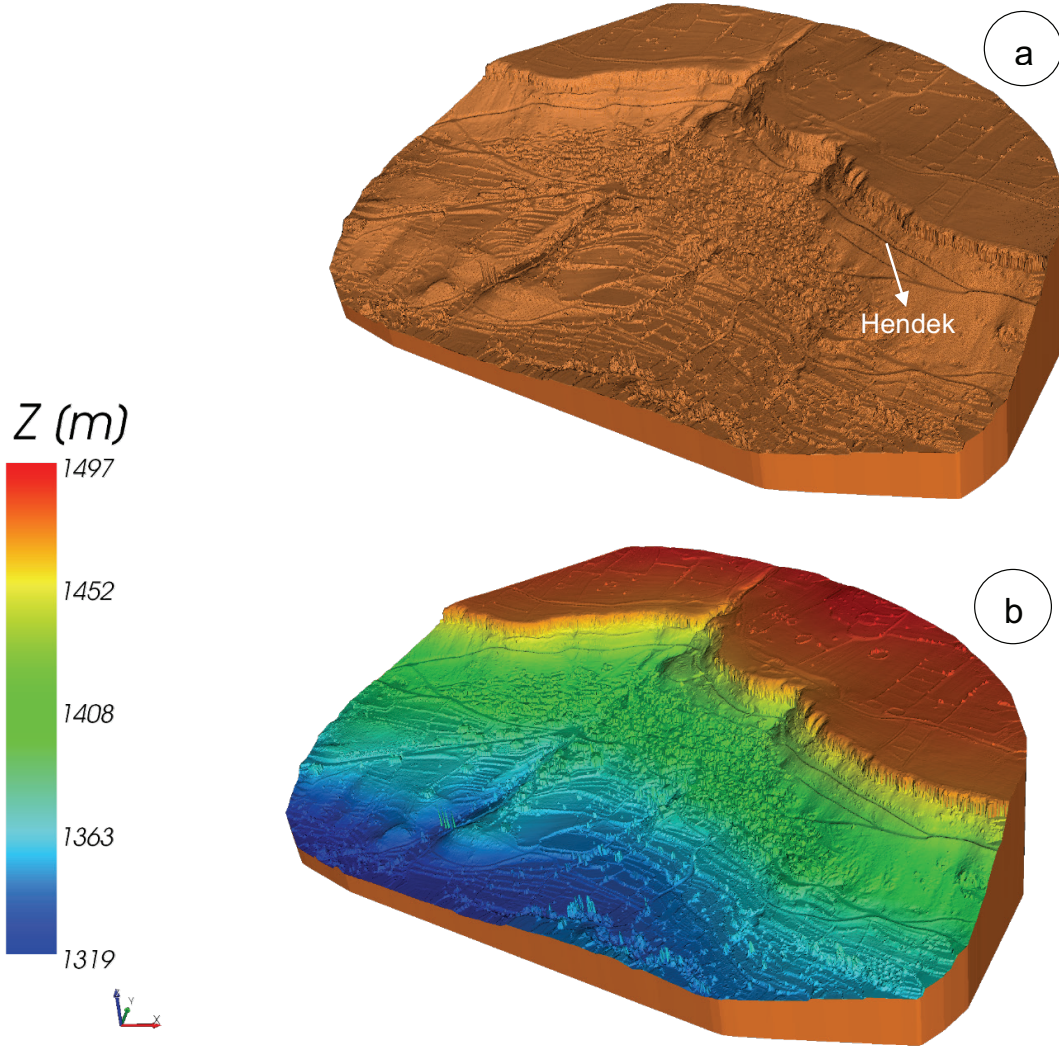
Risk sınıfı	Toplam ağırlıklı skor (1-100)	Risk	Önerilen koruma yöntemleri (seçim sahaya özgüdür)
I	<20	Çok düşük	Gerekli değil, seyrek yerel müdahaleler mümkün
II	21-40	Düşük	Sınırlı boyutta
III	41-60	Orta	Basit önlemler (örneğin bulonlar, ağlar, duraysız blokların temizlenmesi, basit hafif bariyerler)
IV	61-80	Yüksek	Aktif (örneğin bulonlar, ankrajlar) ve pasif (örneğin ağlar, tel halat kablolar, dayanma yapıları, bariyerler ve duraysız blokların temizlenmesi) önlemlerin kombinasyonu
V	81-100	Çok yüksek	Duraysızlık kritik durumda, yaygın ve/veya dayanımı yüksek aktif ve pasif yöntemlerin kombinasyonu. Önleme rağmen bir miktar risk göz önüne alınmalıdır.

3-BOYUTLU KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

Akköy yerleşimi eğimli bir yamaç üzerine kurulmuştur. Üst kotlarda dike yakın bir topoğrafya sunan ignimbiritlerdeki düşey soğuma çatlakları boyunca kopan bloklar yamaç aşağı doğru kaya düşme problemine neden olmaktadır. Bu blokların boyutlarının arazi gözlemleri ve ölçümleri sonucunda yer yer 2m'yi bulabildiği belirlenmiştir. Önceki yıllarda bölgede kaya düşmesi nedeniyle olumsuzlukların yaşandığı yerleşim sakinleri tarafından belirtilmektedir. 2012 yılında kaya tutma hendeğinin yapımından sonra 2019 yılına kadar herhangi bir kaya düşme problemi yaşanmadığı da yine yerli halk tarafından ifade edilmektedir. Kaya düşmelerinin Akköy için risk yaratmaması amacıyla inşa edilen 2m derinliğindeki hendeğin yeterli olup olmadığı, bu çalışma kapsamında yapılan

3-boyutlu kaya düşmesi analizleri ile ortaya konmuştur.

Akköy yerleşim yerinin 3-boyutlu sayısal yüzey modelleri insansız hava aracı (İHA-multikopter) ile alınan fotogrametrik görüntülerden, görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yaklaşık 3 cm yersel çözünürlüklü nokta bulutlarından oluşturulmuştur. 3-boyutlu kaya düşme analizleri RocPro3D (RocPro3D, 2014) 3-boyutlu kaya düşme analiz yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Akköy yerleşimi için İHA görüntüsünden elde edilen nokta bulutu yardımıyla RocPro3D yazılımında oluşturulan ve 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin altlığını oluşturan sayısal yüzey modelinden üretilen düzensiz üçgen ağı (TIN) ve buna ait yükseklik modeli Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. RocPro3D yazılımında İHA verisi kullanılarak oluşturulan sayısal yüzey modeli (a) düzensiz üçgen ağı (TIN) ve (b) yükseklik modeli.

Figure 7. Digital surface model (a) triangulated irregular network (TIN) (b) elevation model constructed in RocPro3D software using UAV data.

Şekil 7'den görüleceği üzere inceleme alanındaki deniz seviyesinden yükseklik 1319 ile 1497 m arasında değişmektedir. Kaya düşme kaynak lokasyonunu oluşturan ve dik bir topoğrafya (80-90°) sunan ignimbiritlerin en yüksek kotu ise 1465 m civarındadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, en olumsuz

koşulu yansıtmak açısından, bloklar kaynak zonun en üst seviyesinden (1465 m kotundan) geçen bir hat boyunca düşürülmüştür.

RocPro3D yazılımında kaya düşmesinin modelleneceği 3-boyutlu sayısal yüzey modeli üzerine farklı jeolojik birimler tanımlanabilmekte ve bu birimler için farklı geri verme

katsayıları (R_n ve R_t) ve sürtünme katsayıları atanabilmektedir. Akköy yerleşiminde, kaya düşmelerinin gerçekleştiği bölgede arazi gözlemlerine bağlı olarak 3 ana jeolojik birim ayırtlanmıştır. Buna göre, 1319 m ile yaklaşık 1355 m kotları arasında yamaç molozu, 1355 m ile 1435 m arasında volkanosedimanter birimler (tuf ve sedimanter özellikteki gölsel çökellerin ardalanması) ve 1435 m kotundan sonra ise kaynaklaşmış ignimbirit birimi yer almaktadır. Araziye daha önceden düşen blokların konumlarına bağlı olarak yapılan geri analizler ve literatür verilerine bağlı olarak Akköy yerleşiminin 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılan parametreler Çizelge 4'te özetlenmiştir.

RocPro3D yazılımında Akköy yerleşimi için İHA verisinden elde edilmiş sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, düşen blokların (ignimbirit) birim hacim ağırlığı laboratuvar deney sonuçlarına göre 1760 kg/m^3 olarak belirlenmiş olup, analizlerde 2 m boyutundaki 5000 adet blok

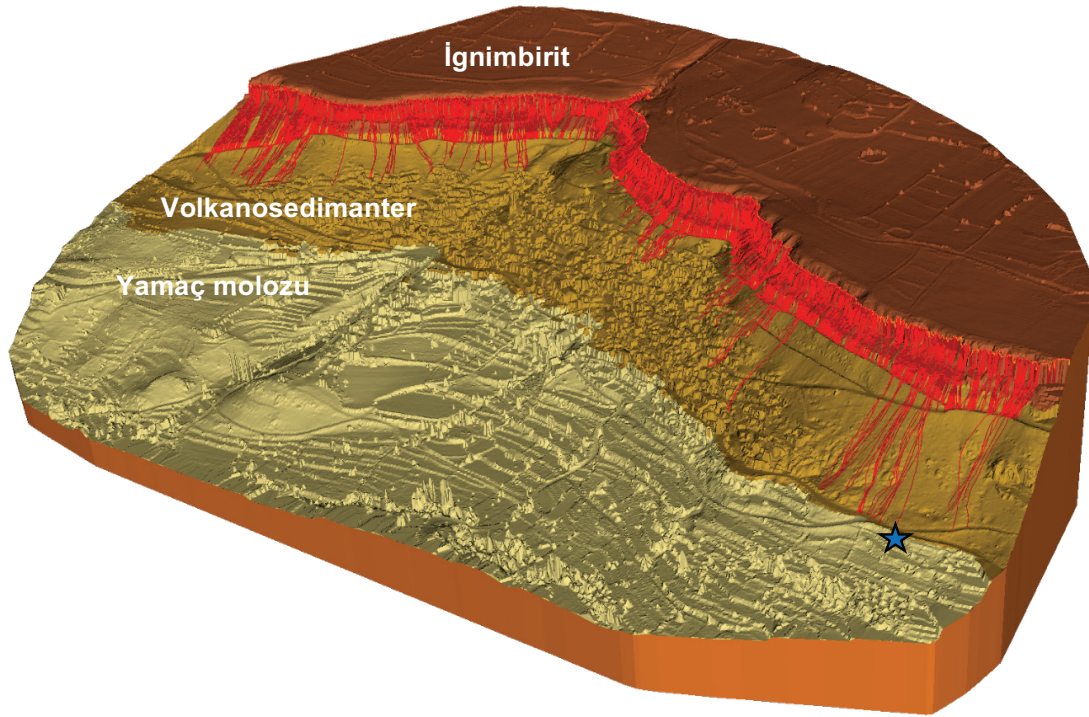
1465 m kotundan düşürülmüştür. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden elde edilen yuvarlanma hatları Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 8'de sunulan kaya düşme hatları (kırmızı hatlar) incelendiğinde, yuvarlanan blokların önemli bir bölümünün kaya tutma hendeği tarafından tutulduğu görülmektedir. Ancak, yerleşimin kuzeybatısında ve güneydoğusunda kalan bölgelerde bir kısım bloğun hendek yapısını aşarak yamaç aşağı kotlara doğru ilerleyebileceği tespit edilmiştir. Öte yandan, 1 km^2 'lik hendeğin orta bölümündeki yerleşimin yoğun olduğu bölgenin hemen üstünde de bazı bloklar hendeği aşır yerleşim yerine kadar ulaşabilmektedir. 3-boyutlu kaya düşme analiz sonuçları dikkate alındığında, kaya düşmelerinin önlenmesi amacıyla açılmış olan hendek yapısının ilgili yerleşim yeri için kaya düşme riskini tamamen ortadan kaldıramadığı ve özellikle büyük boyutlu blokların (örn. $\sim 2\text{m}$) kaya tutma hendeğini aşabileceği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4. RocPro3D yazılımında 3-B kaya düşme analizleri için kullanılan parametreler.

Table 4. Parameters of 3-D rockfall analyses in RocPro3D software.

Birim	Normal geri verme katsayısı (R_n)	Tanjant geri verme katsayısı (R_t)	Sürtünme katsayısı (k)
İgnimbirit	0.78	0.77	0.35
Volkanosedimanter birim	0.73	0.71	0.45
Yamaç molozu	0.50	0.70	0.60



Şekil 8. RocPro3D yazılımında gerçekleştirilen 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatları.

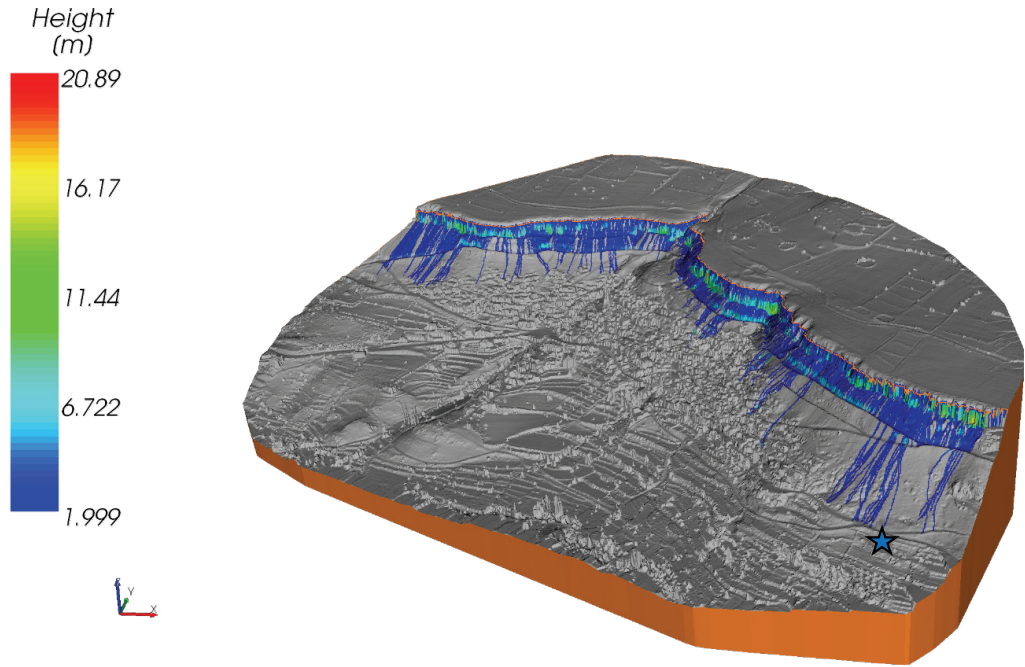
Figure 8. Rockfall trajectories determined by 3-D rockfall analysis performed in RocPro3D software.

RocPro3D yazılımı ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, düşen blokların sıçrama yükseklikleri, kinetik enerjileri ve hızları da belirlenmiştir. Buna göre, her bir kaya düşme hattı için hesaplanan sıçrama yüksekliği, kinetik enerji ve hareket hızı yine 3 boyutlu model üzerinde sırasıyla Şekil 9, 10 ve 11’de sunulmuştur. Şekil 9’da sunulan sıçrama yükseklik haritasına göre, yaklaşık 10 m yükseklikteki dik yamaçtan serbest düşmelerini yapan bloklardaki sıçrama yükseklikleri hendek yapısından sonra çoğunlukla 2 m’nin altındadır. Ancak bazı bölümlerde sıçrama yükseklikleri 4.5 – 5 m’ye (blok boyutu olan 2 m dahil) ulaşabilmektedir.

İnceleme alanında düşen kaya bloklarının toplam kinetik enerjilerine bakıldığında (Şekil

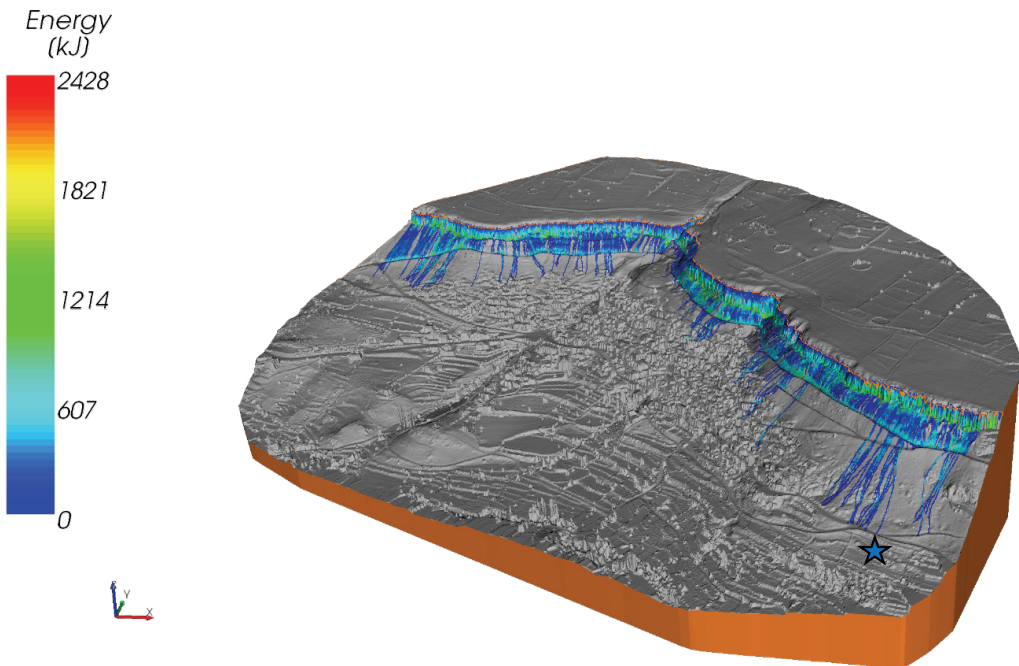
10), kaya tutma hendek yapısının gerisindeki dik yamaç boyunca 300 kJ’un üzerinde kinetik enerjiye sahip olan blokların bulunduğu görülmektedir. Hendek yapısından yamaç aşağı olan bölümde ise düşen blokların kinetik enerjileri azalmakta ve kinetik enerji değerleri 30 ile 300 kJ arasında değişmektedir.

RocPro3D 3-boyutlu kaya düşme yazılımının en önemli avantajlarından biri de 3-boyutlu analizler ile belirlenen kaya düşme hatlarının 2-boyutlu kesitler üzerinde incelenmesine olanak sağlamasıdır. Bu kesitler üzerinde, yuvarlanan blokların hareketleri sırasındaki sıçrama yüksekliği, kinetik enerji, yuvarlanma hızı vb. gibi özelliklerindeki değişim mesafeye bağlı olarak değerlendirilebilmektedir.



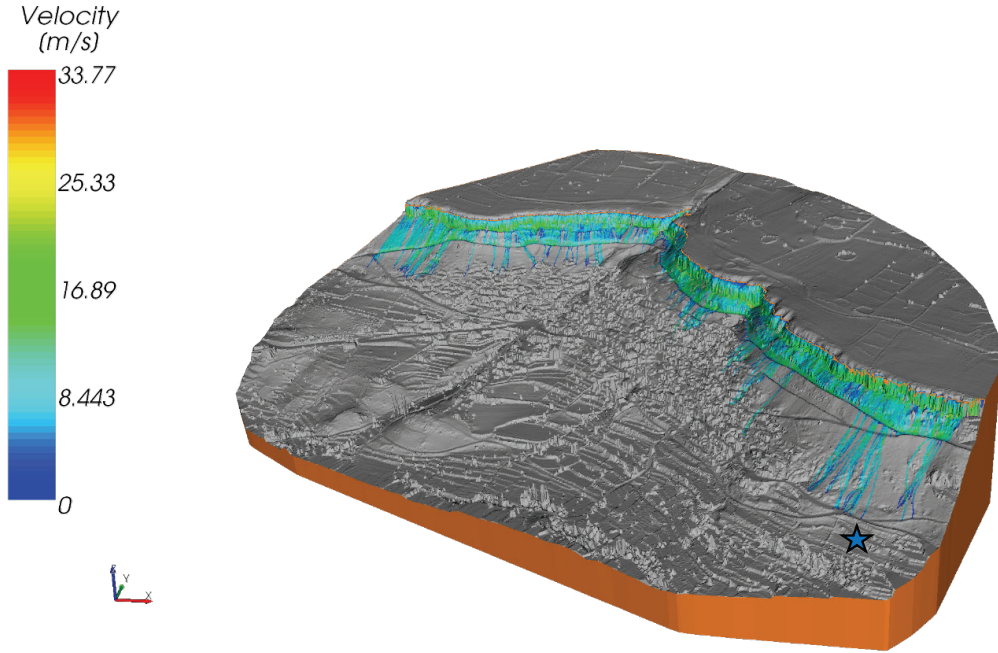
Şekil 9. Düşen kaya bloklarının sıçrama yüksekliği dağılımı.

Figure 9. Bounce height variation of falling rocks.



Şekil 10. Düşen kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi dağılımı.

Figure 10. Total kinetic energy variation of falling rocks.

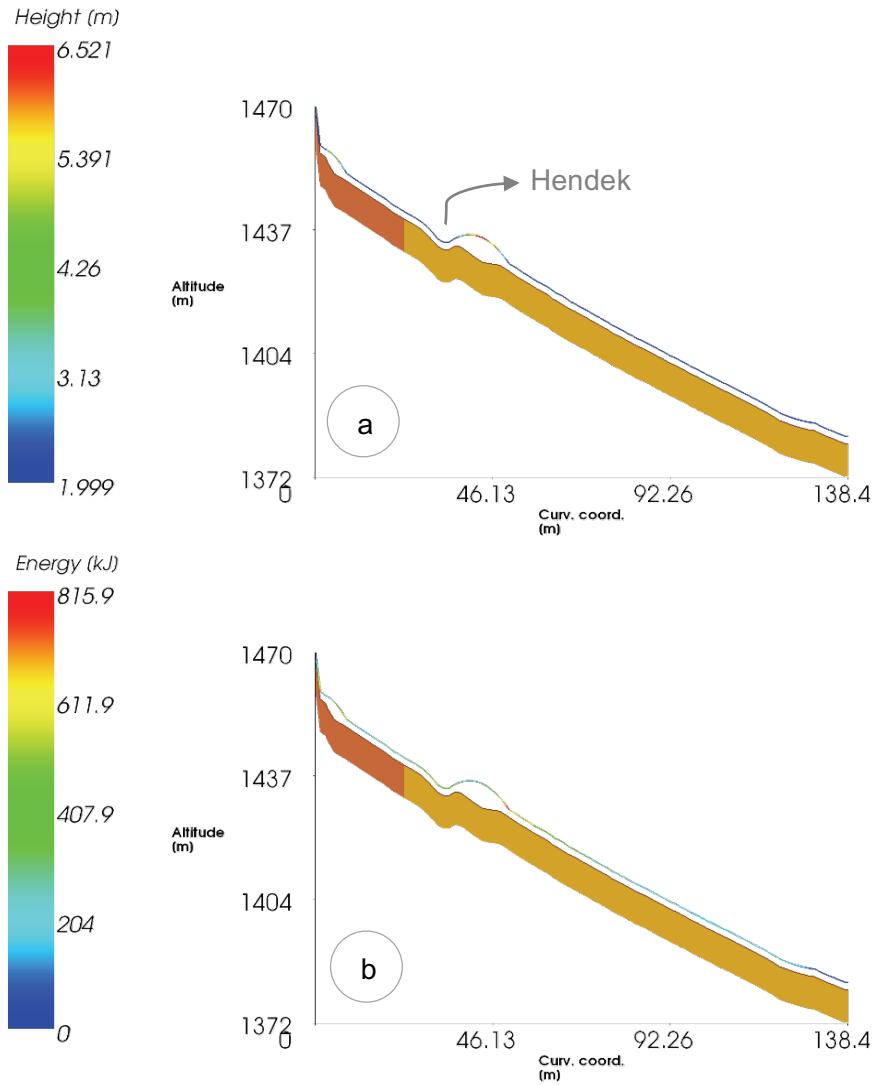


Şekil 11. Düşen kaya bloklarının hareket hızı dağılımı.

Figure 11. Motion velocity variation of falling rocks.

İnceleme alanının güneydoğusuna doğru kaya tutma hendeğini aşan bir bloğun (Şekil 8, 9, 10 ve 11'deki modeller üzerinde mavi yıldız ile gösterilen 4628 nolu yuvarlanma hattı) hareketi sırasındaki sıçrama yüksekliği ve kinetik enerji değerlerindeki değişimi gösteren 2-boyutlu kesitler Şekil 12'de verilmiştir. 138.4 m maksimum yuvarlanma mesafesine sahip olan bu blok, 1465 m kotundan itibaren ilk serbest düşüşünden sonra hendeği aşarken yaklaşık 6.5 m'lik (blok çapı olan 2 m dahil) bir sıçrama yüksekliğine ulaşmıştır. Kaya tutma hendeğini aştıktan sonra, blok hareketine çoğunlukla yuvarlanarak devam etmiştir (Şekil 12-a). Öte yandan, söz konusu bloğun kinetik enerjisi dik yamaçtan düşümü esnasında 700 kJ civarındadır. 2 m'lik hendeği aşarken bloğun toplam kinetik enerjisi 800 kJ mertebesine yükselmektedir. Blok yamaç aşağı hareketine devam ederken, toplam kinetik enerjisi sönümlenmektedir (Şekil 12-b).

İHA verisinden üretilen sayısal yüzey modeli kullanılarak gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda belirlenen kaya düşme hatları, yine İHA uçuşları sonrasında ham görüntülerden elde edilen gerçek ortogörüntü mozaïği üzerine aktarılmış ve inceleme alanındaki kaya düşmelerinin yerleşim yeri için oluşturacağı tehlikenin boyutları ortaya konmuştur. Şekil 13'te sunulan gerçek ortogörüntü mozaïği incelendiğinde, kaya tutma hendeğini aşan blokların çoğunun yerleşimin hemen üst bölümünde durduğu görülmektedir. Hendeği aşan 2 m çapındaki bloklar herhangi bir engele çarparak durabilmekte veya yön değiştirmektedir (Şekil 13-a). Diğer taraftan, Akköy'ün güneydoğusundaki bir bölümde ise yuvarlanan bloklar, yerleşimin iç kesimlerine kadar ulaşabilmektedir (Şekil 13-b). 3-boyutlu kaya düşme analiz sonuçları, Akköy yerleşiminin bir bölümünün, üst kotlardaki 2 m derinliğindeki hendek yapısına rağmen halen kaya düşme tehlikesi altında olduğunu göstermektedir.

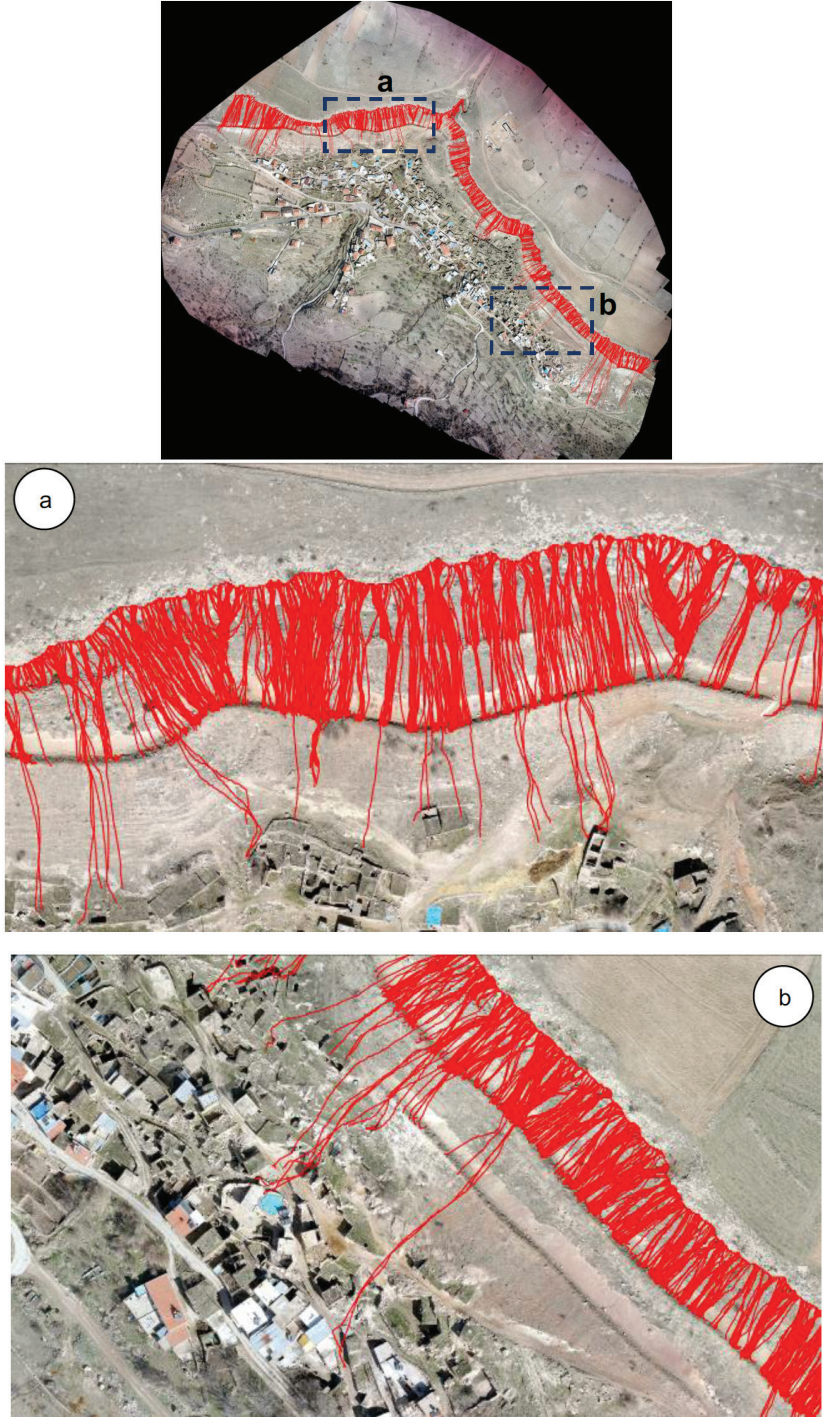


Şekil 12. 4628 nolu kaya düşme hattına ait sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji kesitleri.

Figure 12. Cross-sections of bounce height and total kinetic energy for the rockfall trajectory 4628.

3-boyutlu kaya düşme analizlerinin ve bu analizlerde kullanılan sayısal yüzey modeli çözünürlüğünün kaya düşme hatlarının yönelimi ve yuvarlanma mesafeleri üzerindeki etkisi Şekil 13'te sunulan gerçek ortogörüntülerde belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. 2-boyutlu kaya düşme analizlerinde kaya düşmeleri sırasındaki topoğrafyaya bağlı sapmaları

gözlemlemek mümkün değildir. Oysa kaya düşmeleri sonucu hareket halindeki bloklar topoğrafik düzensizlikler ve/veya insan yapımı engeller (bina, duvar, çit vb.) nedeniyle yön değiştirebilmekte veya hareketlerini sonlandırabilmektedir. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizleri daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadırlar.



Şekil 13. Kaya düşme hatlarının gerçek ortogörüntü mozaïği üzerindeki yakın görünümleri.

Figure 13. Views of rockfall trajectories on true orthoimage mosaic.

SONUÇLAR

Kaya düşme tehlikesi altında olan alanlarda kayadüşmelerini iyileştirilmesi için çeşitli önleme ve koruma yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu yöntemler arasında kaya tutma hendekleri veya alanları küçük yerleşim yerlerinde ekonomik ve kolay yapılabilirlik açısından sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, doğru projelendirilmeyen kaya tutma hendeklerinde kaynak zonundan kaya düşmesinin devam etmesi durumunda, düşen bloklar hendeği aşarak tehlike yaratmaya devam edebilmektedir. Bu çalışma kapsamında Akköy (Ürgüp) yerleşiminde 2012 yılında kaya düşmelerinden yerleşimi korumak amacıyla inşa edilen 2 m derinliğindeki ve yaklaşık 1 km uzunluğundaki kaya tutma hendeğinin performansı 3-boyutlu kaya düşme analizleri ile incelenmiştir. Bu tür uzun kaya düşmesi koruma yapılarının tasarımında 3-boyutlu kaya düşmelerinden faydalanılması sonuçların daha gerçekçi elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Öte yandan, topoğrafik değişkenliklere bağlı olarak belirli kesit hatları boyunca yapılan 2-boyutlu kaya düşme analizlerinde düşen blokların yanal yön değişimlerini belirlemek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizleri bu açıdan da önemli bir avantaj sunmaktadır.

Çalışma alanı için gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucuna göre Akköy yerleşiminin üst kotlarında inşa edilen 2 m derinliğindeki kaya tutma hendeğinin bazı bölümlerde kaya düşmelerini önlemede yetersiz kaldığı ve hendeği aşan blokların yerleşim yerine kadar ulaşabildiği belirlenmiştir. İnceleme alanında yüksekliği 10 ile 15 m arasında değişen kaynak zonunda yüksek devamlılığa sahip soğuma çatlakları boyutları 2 m'yi geçebilecek blokların oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle, çalışma alanında inşa edilen hendek

derinliği ile maksimum blok çapı birbirine çok yakındır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerince de doğrulandığı üzere, düşen blokların hendek bölgesindeki ufak sızramaları bile bloğun hendeği kolaylıkla aşmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, inşa edilen hendeğe rağmen Akköy yerleşimi kısmen de olsa kaya düşme tehlikesi altındadır. Bununla birlikte, kaya tutma hendeğinin uzun dönem içerisinde düşen kaya bloklarınca dolması ve periyodik bakımının (blok temizliği) yapılmaması durumunda tehlikenin boyutu daha da artacaktır.

3-boyutlu kaya düşme analizlerinde oldukça yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla yersel lazer tarama (TLS) veya insansız hava araçları ile alınan fotogrametrik görüntülerin işlenmesinden elde edilen nokta bulutları son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak hendek, vadi vb. gibi derin topoğrafik düzensizliklerin bulunduğu lokasyonlarda TLS yöntemiyle oluşturulan nokta bulutlarının bu tür düşey yapıları tam ve gerçekçi olarak yansıtmakta zorlanabilmesine bağlı olarak, kaya düşmesi sonrası yuvarlanma rotalarının tam belirlenememesinin, kaya düşme analizi sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olabilmektedir. Çünkü TLS yönteminde, kaynak zondan çok daha düşük kotlarda konumlandırılan ölçüm aletinden gönderilen lazer ışınları, topoğrafya üzerindeki düşey düzensizlikleri ortaya çıkaramamaktadır. Bu tür durumlarda topoğrafyadaki düşey yapıların sayısal yüzey modelinde ortaya çıkarılabilmesi için TLS ölçümlerinin en az bir ters açıdan tekrar yapılması gerekmektedir. Ancak bu inceleme alanında olduğu gibi, hendek türü yapıların oldukça uzun olması durumunda bu işlemin oldukça zaman alması ve zahmetli olması durumu söz konusudur. Bu nedenle insansız hava araçlarıyla alınan fotogrametrik görüntüler ile daha kapsamlı ve oldukça fazla

detay içeren bir sayısal yüzey modelini hızlı bir şekilde oluşturmak ve devamında işlemek mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak, gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında yerleşimin orta derecede kaya düşme riski altında olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda, Saroglou (2012) tarafından önerilen kaya düşme riski sınıflamasında bu tür alanlar için basit kaya düşmesi önlemlerinin yeterli olabileceği ifade edilmesine rağmen, doğru tasarlanmayan bu önlemler neticesinde kaya düşmeleri yerleşimler için halen risk teşkil etmeye devam edecektir. Bu nedenle, kaya tutma hendeklerinin tasarımında öncelikle bölgeye özel kaya düşme modelleri gerçekleştirilerek, düşen kaya bloklarının darbe noktaları ve sıçrama yükseklikleri belirlenmeli, tutma hendeğinin lokasyonu, derinliği ve genişliği bu analizler sonucunda ortaya konmalıdır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, UDAP-G-16-03 numaralı proje ile Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı'na desteklenmiştir. Projeyi destekleyen ilgili kuruma teşekkür ederiz. Bununla birlikte AFAD, Planlama ve Risk Azaltma Dairesi Başkanlığı'ndan H. Gürhan İlgen ve Ahmet Demir'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Atabey, E., 1989. MTA Genel Müdürlüğü, 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Kayseri H19 (K33) Paftası, 18 syf.
- Barton, N., Bandis, S. C., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 603-610.
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., Crosta, G.B., 2016. Rockfall at the heritage site of the Tatların Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82 (2), 1075-1098.
- Fanos, A.M., Pradhan, B., 2019. A novel rockfall hazard assessment using laser scanning data and 3D modelling in GIS, *Catena*, 172, 135-150.
- FHWA, 1989. Rock Slopes: Design, Excavation and Stabilization. Publication FHWA-TS-89-045. Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean.
- Gökçe, O., Özden, S., Demir, A., 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Dairesi Başkanlığı, Ankara, 112 sf.
- Kayabaşı, A., 2018. The assessment of rockfall analysis near a railroad: a case study at the Kızılınler village of Eskişehir, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 800.
- Pierson, L.A., Gullixson, C.F., Chassie, R.G., 2001. Rockfall Catchment Area Design Guide. Final Report SPR-3(032) Oregon Department of Transportation, Salem.
- Ritchie, A.M., 1963. Evaluation of rockfall and its control. *Highw Res Board Rec* 17, 13-27.
- RocPro3D, 2014. RocPro3D software. http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php.
- Rocscience Inc., 2019. <https://www.rocscience.com/help/dips/> Erişim tarihi: 08.04.2019.
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P., Tsiambaos, G., 2012. Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 12, 1823-1836.
- 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 Sensing*, 10, 1923; doi:10.3390/rs10121923.

- Topal, T., Akin, M. K., Ozden, A.U., 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle. *Environmental Geology*, 53(1):191–200.
- Topal, T., Akin, M.K., Akın, M., 2012. Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, Vol. 62: 255–274.
- Tunusluoğlu, M.C., Zorlu, K., 2009. Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey). *Environmental Geology*, 56(5):963–972.
- Turner, A.K., Schuster, R.L., 2012. *Rockfall Characterization and Control*, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., 658 p.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes, In: R. L. Schuster and R. J. Krizek, Eds., *Landslides, Analysis and Control*, National Academy of Sciences, pp. 11-33.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterization and structural protection-a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2617-2651.
- Wyllie, D.C., 2015. *Rock Fall Engineering*. CRC Press, Taylor & Francis Group. 270 pp.
- Zorlu, K., Tunusluoglu, M.C., Gorum, T., Nefeslioglu, H.A., Yalcin, A., Turer, D., Gokceoglu, C., 2011. Landform effect on rockfall and hazard mapping in Cappadocia (Turkey). *Environmental Earth Sciences*. 62, 8, 1685-1693.