




Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde)

UAV based 3D modeling analysis in determining and preventing rockfall hazard: A case study from Murtaza Village (Niğde, Turkey)

MUHAMMED ZEYNEL ÖZTÜRK^{1*} , MUSTAFA UTLU² , MESUT ŞİMŞEK³ 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Niğde, Türkiye.

² Bingöl Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Bingöl, Türkiye.

³ Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Hatay, Türkiye.

Geliş (received): 9 Kasım (November) 2021

Kabul (accepted): 17 Mayıs (May) 2022

ÖZ

Bu çalışmada, Niğde İli Merkez ilçe sınırları içerisinde yer alan ve aktif kaya düşme olaylarının yaşandığı Murtaza köyündeki kaya düşme tehlikesi, insansız hava aracı (İHA) tabanlı oluşturulan yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli (SYM), arazi ölçüm verileri ve üç boyutlu (3B) kaya düşme modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları ile düşme potansiyeline sahip 14 kaya bloğu tespit edilmiş ve kaya bloklarının her birine ait geometrik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler aracılığıyla kaya blokları, RAMMS yazılımı içerisinde geometrik özelliklerine bağlı olarak gerçeğe yakın şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan blokların her birinden 100 adet olmak üzere yüksek çözünürlüklü SYM üzerinden toplam 1400 kaya düşmesi benzetim modellemesi gerçekleştirilmiştir. Böylece düşme potansiyeline sahip her bir kaya bloğunun kinetik enerjisi, zıplama yüksekliği, hareket hızı ve düşme yörüngeleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yerleşim birimlerine yakın mesafede bulunan kaya blokları çok uzak mesafelere taşınmadan sönmülmektedir. Kinetik enerji, hız ve sıçrama yüksekliği değerleri oldukça düşük olan bu kaya blokları görece olarak önemli bir tehlike oluşturmamaktadır. Ancak yerleşim birimlerinin kuzeybatısındaki yamaçlarda bulunan, şekil bakımından eş boyutlu ve yüksek hacimdeki kaya blokları bu bakımdan önem taşımaktadır. Bu kaya blokları geometrik özellikleri ve sahanın jeomorfolojisine bağlı olarak uzun mesafeler boyunca hareket edebilmekte, ev, yol vb., yapılar ile temas ederek ya da topografyaya bağlı olarak eğimin azaldığı yerlerde enerjileri sönmülmektedir. Bu alanda kaya bloklarının oluşturduğu tehlikenin önlenmesi amacı ile model içerisinde 142 m uzunlukta ve 1,5 m genişlikte istinat duvarları taslak model olarak oluşturulmuştur. İstinat duvarı modeli sonuçlarına göre kaya bloklarına yakın alanlarda 5 metre yüksekliğinde, kaynak alanlarına uzak konumda ise 3 metre yüksekliğinde bir istinat duvarının kaya bloklarının ilerlemesini durdurduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya düşmesi, tehlike, insansız hava aracı (İHA), RAMMS, 3B modelleme.

ABSTRACT

In this study, rockfall hazards in Murtaza village, which is located within the central district of Niğde province and where active rockfall events are experienced, were evaluated using a high-resolution digital surface model (DSM) created based on unmanned air vehicle (UAV) images, field measurement data, and three dimensional (3D) rockfall models. During the field studies, 14 rock blocks with falling potential were identified and geometric measurements for each of the rock blocks were made. Depending on their geometric properties, the rock blocks are defined in the RAMMS software and a total of 1400 rockfall simulations, 100 from each of the modeled blocks were carried out on the high-resolution DSM. Thus, the kinetic energy, jump height, velocity, and fall trajectories of each rock block were determined. According to the results, the rock blocks close to the settlements are damped without being transported very long distances. These blocks do not constitute a significant hazard since having values such as low energy, speed, and jump height. However, the rock blocks of equant shape and high volume, located on the northwest slopes above the settlements, constitute a significant in terms of hazard. These rock blocks move for long distances depending on the geometric properties of the rocks and geomorphological characteristics of the study area and their energy is absorbed in contact with houses, roads, etc., structures, or in places where the slope decreases on the topography. To prevent the danger of rock blocks in this area, retaining walls 142 m long and 1.5 m wide was created as a draft model. According to the results of these models, it was determined that while a 5 m high retaining wall in areas close to the source of rock blocks, a 3 m high retaining wall far from the source areas stops the progress of the rock blocks.

Keywords: Rockfall, Hazard, Unmanned air vehicle (UAV), 3D Modeling, RAMMS

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1021032>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: muhammed.zeynel@gmail.com

GİRİŞ

Kaya düşmeleri, engebeli ve dağlık arazilerde, şev yarmalarında ve maden ocaklarında meydana gelen ve karayolu, demiryolu gibi çizgisel yapıların yanı sıra daha geniş yayılıma sahip yerleşim yerlerine zarar verebilen bir doğal afettir (Akın vd., 2020). Meydana geliş zamanı ve oluşum şeklini tahmin etmenin çok zor olduğu kaya düşmeleri, en fazla hasara ve can kaybına

neden olan kütle hareketlerinden birisidir (Varnes, 1978; Evans ve Hungr, 1993; Liu vd., 2021). Yamaçta uzun süre duraylılığını koruyan bloklar aniden yüksek eğime sahip yamaçlardan, yer çekiminin etkisi ile aşağı düşerek yollar, tarihi yapılar, yerleşim birimleri, altyapı gibi alanlarda büyük hasara neden olabilmekte, ölüm ve yaralanmalara yol açabilmektedir (Tanarro ve Munoz, 2012; Pradhan Fanos, 2017; Lu vd., 2019). Yüksek

eğimli yamaçlarda kaya bloklarının duraylılığının bozulmasına bağlı olarak ani ve hızlı bir şekilde gerçekleşen kaya düşmeleri tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de gerek dağlık alanlarda gerekse yüksek eğimli yamaçlarda kurulmuş yerleşim birimlerinde gerçekleşmektedir. Kaya düşmeleri, neden olduğu hasar açısından Türkiye’deki tüm doğal kaynaklı afetler içerisinde %12’lik bir orana karşılık gelmekte olup (Kutluca, 2006; Topal vd., 2007; Aydın vd., 2012), 1950-2008 yılları arasında meydana gelen toplamda 2.956 kaya düşme olayı sonucunda 1.703 yerleşim birimi zarar görmüş, 19.422 kişi etkilenmiştir (Gökçe vd., 2008; Aydın vd., 2012). Türkiye’de kaya düşmesi olaylarının en sık yaşandığı bölgeler arasında başta Karadeniz Bölgesi, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi gelmektedir. İl bazında ise Kayseri, Niğde, Erzincan en fazla kaya düşme olaylarının meydana geldiği illerin başında yer alır (Ergünay, 2007). Meydana gelen kaya düşmesi afetleri nedeniyle bugüne kadar birçok yerleşim yeri afete maruz bölge olarak ilan edilmiştir (Akın vd., 2020). Türkiye’de deprem, heyelan ve taşkınlardan sonra en sık rastlanan doğal kaynaklı afetlerden olan kaya düşmeleri Türkiye’de en fazla çalışılan afet konularından bir tanesidir (Leine vd., 2014; Taga ve Zorlu, 2016; Dinçer vd., 2016; Gül vd., 2016; Aydın ve Eker, 2017; Geniş vd., 2017; Kayabaşı, 2018; Akın vd., 2019, 2021; Utlu vd., 2021, 2020a).

Bu çalışmada, hem geçmişte hem de günümüzde aktif ve yoğun bir şekilde kaya düşmelerinin yaşandığı Murtaza köyünde (Niğde) yaşanan kaya düşme olayları, İHA ile oluşturulan yüksek çözünürlüklü SYM verileri üzerinden gerçekleştirilen üç boyutlu (3B) kaya düşmesi modelleri ile kantitatif açıdan değerlendirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirilmesinde arazi çalışmaları sırasında düşme potansiyeline sahip 14 kaya bloğu tespit edilmiş ve her bir kaya bloğunda yapılan

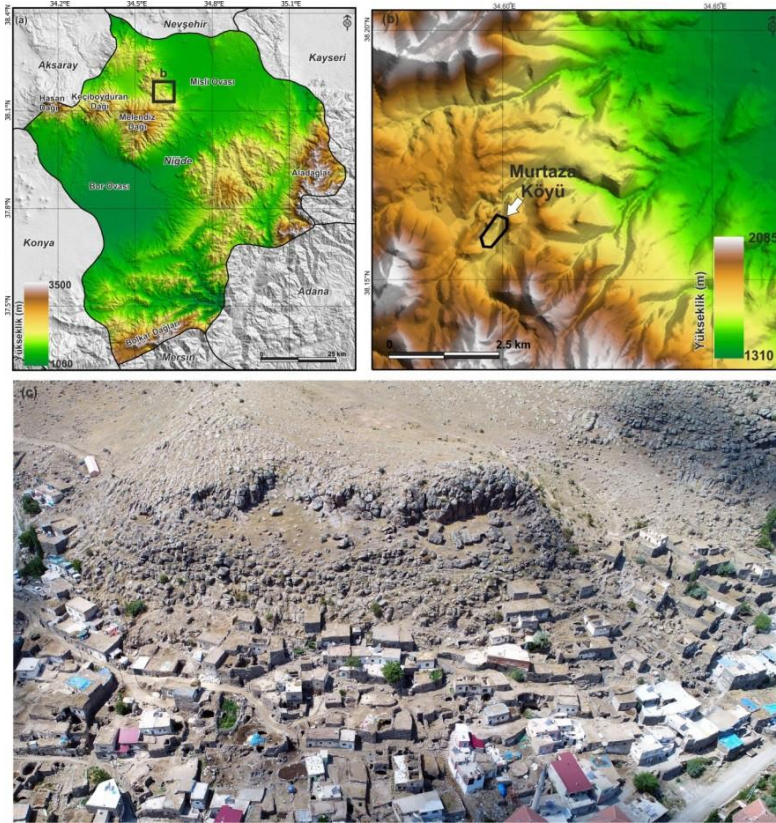
ölçümler sonucunda kaya geometrileri, kütle ve hacimleri dikkate alınarak 3B olarak Hızlı Kütle Hareketleri (RAMMS-Rapid Mass Movements) (Bartelt vd., 2016) kaya düşme yazılımı ile modellenmiştir. Ayrıca ortaya çıkan tehlike durumuna göre nasıl bir önlem alınması gerektiği yine aynı yazılım ile analiz edilmiştir.

ÇALIŞMA SAHASI GENEL ÖZELLİKLERİ

Türkiye’nin İç Anadolu Bölgesi’nde, Niğde İli sınırları içerisinde bulunan çalışma sahası 38°9'50"- 38°10'13" kuzey enlemleri ve 34°36'10"-34°35'35" doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1a-b). Ortalama yükseltisi 1796 m olan ve genel eğim değerlerinin 85°’ye kadar ulaştığı çalışma sahasında kaya düşme olayları genel olarak 50°’nin üzerinde eğime sahip kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı dik yamaçlarda meydana gelmektedir (Şekil 1c). Niğde Volkanik Kompleksi içerisinde yer alan çalışma sahası, Melendiz stratovulkanına bağlı olarak gelişen kalın yatay tabakalı andezitik kayalardan oluşmaktadır. Bu kayalar boyunca var olan yoğun soğuma çatlak yapısı çalışma alanında kaya düşmesi olaylarının meydana gelmesinde rol oynayan önemli bir etkidir (Çiflikli ve Bozkaya, 2018). Çalışma sahası Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre “BSk” harfleri ile gösterilen yarı kurak iklim özelliklerine sahiptir (Öztürk vd., 2017). Özellikle kış mevsiminde oluşan donma-çözünme süreçleri, yüksek eğimli yamaçlarda ortaya çıkan yer çekimi, çalışma sahasının genel litolojisinin yoğun çatlak yapısına sahip volkanik kökenli kayaç bloklarının olması, kaya düşme olaylarının meydana gelmesinde hazırlayıcı olarak önemli rol oynamaktadır. Bu koşullar altında çalışma sahasında tarihsel süreçte birçok kaya düşme olayı meydana gelmiş ve kaya düşmesi tehlikesi günümüzde de devam etmektedir. AFAD raporuna göre (AFAD, 2018) Murtaza Köyü’nde yapılan etüt

çalışmalarında ilk olarak, 1995 yılında kaya düşme tehlikesinin var olduğu, mevcut yerleşim alanlarının özellikle 38 konutun ıslah ya da boşaltılması amacıyla rapor edildiği, fakat 1996 yılında ıslahtan vazgeçilerek bu konutların var olan tehlikeden ötürü boşaltılmasının daha uygun olacağı konusunda karar verilmiştir. Böylece 1998

yılında Tilkiyeri Tepe mevkiine gerekli konutlar yapılarak mevcut hane halkının nakli gerçekleştirilmiştir. 2004 yılında ise 7 konutun kaya düşmesi sürecinden etkilenme durumundan bahsedilerek bu 7 konutta yaşayan köy nüfusu yine Tilkiyeri Tepe mevkiine nakledilmiştir (AFAD, 2018).



Şekil 1. (a, b) Çalışma sahası konumu ve (c) çalışma alanına ait drone görüntüsü.

Figure 1. (a, b) Location of the study area and (c) oblique aerial photograph of the study area.

MATERYAL VE METOT

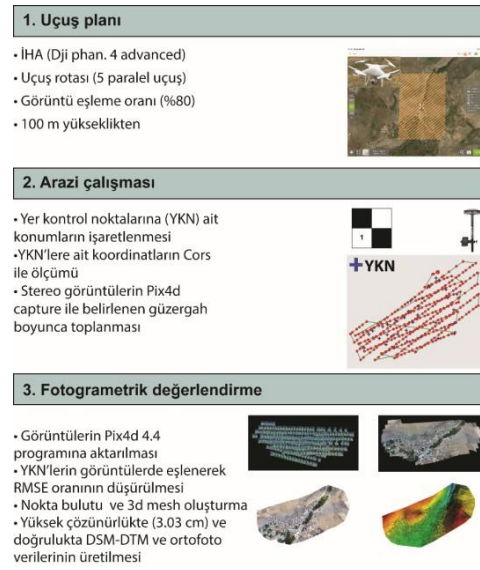
Kaya düşmelerinin modellenmesinde, özellikle kaynak, depolanma ve etki alanlarının belirlenmesinde yüksek mekansal çözünürlüklü sayısal yüzey modelleri önemli

bir rol oynamaktadır (Žabota vd., 2019). Farklı çözünürlükte SYM'leri kullanılarak düşme sürecinin iki (2B) ve üç boyutlu (3B) modellenmesi, risk ve tehlike çalışmalarının önemli bir gelişme kaydetmesine katkı

sağlamıştır (Guzzetti vd., 2002; Lan vd., 2007; Christen vd., 2012; Chen vd., 2013; Matas vd., 2017). SYM üzerinden yapılan 2B ve 3B modellemeler ile kaya bloklarının yörüngeleri, kinetik enerjileri, sıçrama yükseklikleri, hızları ve birikim zonu özellikleri gibi durumlar tespit edilmektedir (Mary Vick vd., 2019). 2B ve 3B boyutlu kaya düşmelerinin modellenmesi için RAMMS, RockPro3D, CONEFALL, STONE, Georock, Rockyfor3D, FlowR, Rotomap, RocFall gibi birçok yazılım geliştirilmiştir (Azzoni vd., 1995; Guzzetti vd., 2002; Crosta and Agliardi, 2003; Perret vd., 2004; Dorren vd., 2006; Charalambous ve Sakellariou, 2007; Wieczorek vd., 2008; Katz vd., 2011; Chen vd., 2013; Crosta vd., 2015; Borella vd., 2016). Bu yazılımlar kullanılarak orta mekansal çözünürlüklü sayısal yüzey modelleri (SYM) üzerinden birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Ancak, son yıllarda uydu ve uzaktan algılama platformlarından olan İHA teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak kısa sürede, farklı ölçekteki alanların birkaç m'den cm'ye kadar hassasiyette daha yüksek çözünürlüklü SYM'lerin yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olması (Pradhan ve Fanos, 2017; Ağca vd., 2020) kaya düşme dinamiklerinin anlaşılması ve çözülmesi açısından önemli rol oynamaya başlamıştır.

Coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada kaya düşmelerinin 3B olarak modellenmesi dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak modellemede gerekli olan yüksek çözünürlüklü SYM verisinin üretilmesi için İHA ile elde edilen stereo görüntüler fotogrametrik analizler ile işlenmiş ve 3 cm mekansal çözünürlüğe sahip SYM verisi üretilmiştir. İkinci olarak arazi çalışmaları ile düşme potansiyeline sahip kaya blokları tespit edilmiş ve bu kaya bloklarına ait konum bilgileri ile birlikte genişlik, yükseklik ve uzunluk gibi geometrik ölçümleri yapılmıştır. Üçüncü aşamada ise arazide ölçümü yapılan

kaya blokları RAMMS yazılımında tanımlanarak, SYM üzerinden kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Son olarak yerleşim birimlerine kadar ulaşabilen kaya bloklarının önlenmesi için nasıl bir koruma çözümü yapılması gerektiğine dair modeller çalıştırılmıştır. İşlemler UTM projeksiyonu WGS84 datumunda 36. zonda ArcGIS Pro 2.5, RAMMS Rocfall, Pix4Dmapper ve Pix4Dcapture yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Yüksek çözünürlüklü SYM ve ortofoto verisinin oluşturulmasında kullanılan genel aşamalar.

Figure 2. General flowcharts for DSM and orthomosaic generation steps.

Yüksek çözünürlüklü SYM verisinin üretimi

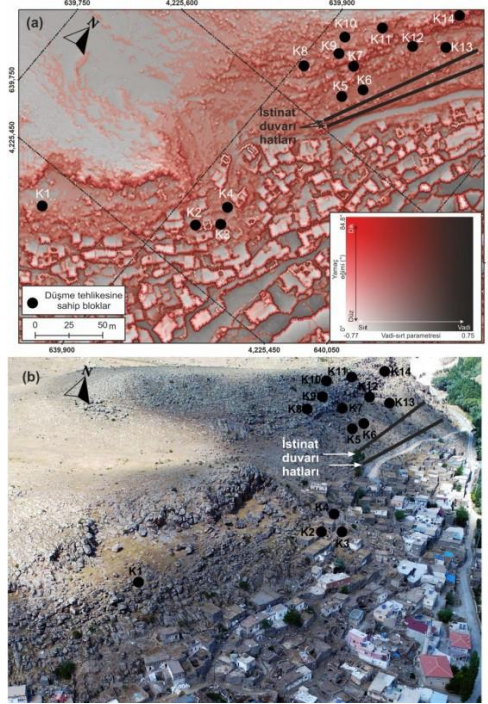
Kaya düşmesi çalışmalarında, düşme potansiyeline sahip kaya bloğunun düşme durumunu tespit edebilmek için gerçek topografik koşulları yansıtan yüksek çözünürlüklü SYM verisine ihtiyaç vardır (Utlu vd., 2020b, 2021). Bu çalışmada yüksek çözünürlüklü SYM verisinin üretilmesinde DJI Phantom 4 marka İHA kullanılmıştır. Uçuş yüksekliği, görüntü bindirme oranı, tarama

genişliği gibi planlamaların yapılmasında Pix4Dcapture yazılımı kullanılmıştır. 100 metre yükseklikte, %80 bindirme oranıyla gerçekleştirilen İHA uçuşundan 326 stereo görüntü elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesinden önce arazi üzerinde işaretlenen 41 adet yer kontrol noktasından (YKN) Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS, Global Navigation Satellite System) kullanılarak hassas koordinat ve yükseklik ölçümleri yapılmıştır. Görüntülerin ve GNSS verilerinin işlenmesinde Pix4D deneme sürümü kullanılmıştır. Pix4D'de gerçekleştirilen işlemler sonucunda (Şekil 2) 0,36 km²'lik bir alan için 3 cm çözünürlükte, 0,41 cm RMSE hatasına sahip SYM ve ortofoto verisi oluşturulmuştur. Ardından SYM verisi üzerinden arazide tespit edilen düşme potansiyeline sahip 14 adet kaya bloğu için kaya düşmesi modelleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlere ait detay bilgiler aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

Kaynak kaya bloklarına ait veriler ve benzetim modelleme çalışmaları

İHA ile görüntülerin alınmasından sonra gerçekleştirilen arazi çalışmasıyla düşme potansiyeline sahip 14 adet kaya bloğu tespit edilmiştir (Şekil 3). Bloklara ait konumlar kırmızı rölyef haritası (RRIM-Red relief image map) ve oblik hava fotoğrafı üzerinde verilmiş olup, kaya bloklarının yüksek eğim ve rölyefe sahip noktalarda yer aldığı görülmektedir (Şekil 3). Bu bloklara ait düşme modelleri oluşturulması amacıyla kaya bloklarına ait geometrik ölçümleri (genişlik, uzunluk ve yükseklik) x, y, z olacak şekilde yapılmıştır (Tablo 1). Bu ölçümler kaya düşme modellemesi sırasında kaya bloklarına ait yörünge, kinetik enerji, hız ve sıçrama yüksekliklerinin gerçeğe yakın bir şekilde temsil edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle her bir kaya

biriminin RAMMS yazılımı üzerinde şekilsel ve hacimsel açıdan değerlendirilmesi gerçekleştirilmiş, gerçeğe yakın geometrileri yazılımda eklenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Düşme tehlikesine sahip kaya bloklarının ve istinat duvarının (a) kırmızı rölyef haritası ve (b) oblik hava fotoğrafı üzerindeki konumları.

Figure 3. Location of rock blocks and retaining wall on (a) red relief image map and (b) oblique air photo.

RAMMS yazılımı maksimum 1 metre çözünürlükte çalıştığı için SYM verisi yeniden boyutlandırılarak 1 metre çözünürlüğe boyutlandırılmıştır. Kaya düşmesi modelleri üzerinde arazi özellikleri etkili olduğundan, kaya bloklarının bulunduğu konum ve modellendiği alan tamamen bitki örtüsünden yoksun sert bir litolojik özellik göstermesinden dolayı sert bir arazi formu olarak modellemeye

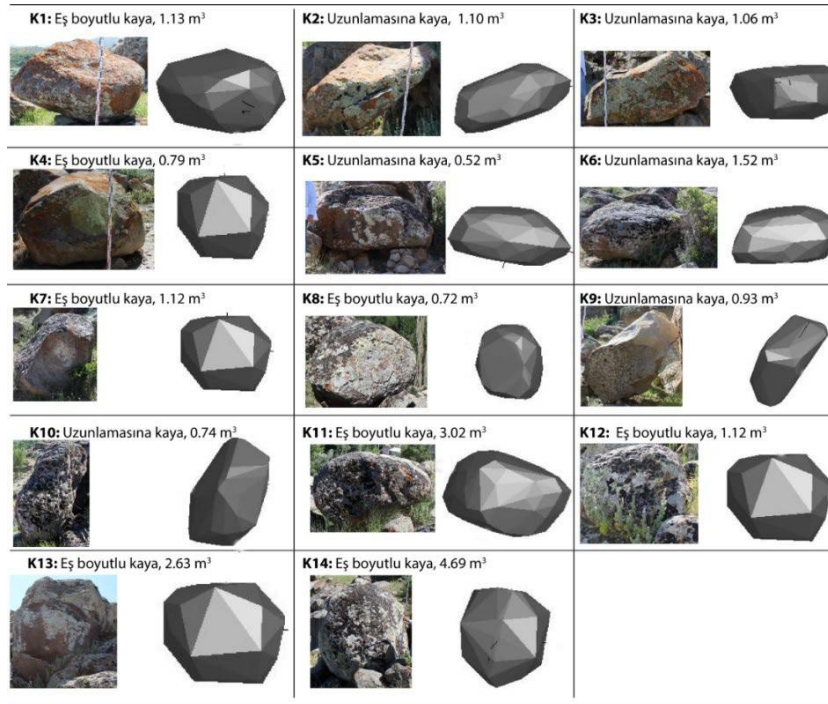
dâhil edilmiştir. Özellikle kaynak alanların ve dik yamaçların bitki örtüsünden yoksun olması İHA'dan alınan stereo görüntülerin gerçek topografik yüzeyi iyi şekilde yansıtmasını sağlamaktadır.

Kaya bloklarının oluşturduğu tehlikenin engellenmesine yönelik olarak kaya bloklarına ait düşme yörüngelerinin engellenmesi ya da sönümlenmesi amacıyla koruma yapıları oluşturulmaktadır. Bu amaçla risk altındaki yol, ev ve vb. yapılara zarar verme olasılığı yüksek olan kaya bloklarının öngörülen yükseklik ve uzunlukta kurulacak olan istinat duvarı türündeki koruma yapısı ile önüne geçilmesi mümkün olmaktadır (Bartelt vd., 2016). Bu çalışmada 142 m uzunluğa ve 1,5

m genişliğe sahip 6 farklı istinat duvarı ön değerlendirme amaçlı olarak modellenmiştir. Modeller kaynak alanına yakın ve yola yakın olacak şekilde iki farklı lokasyonda ve her bir lokasyonda 3, 4 ve 5 metre yüksekliklerde olacak şekilde çalıştırılmıştır.

BULGULAR

Arazi çalışmalarında yapılan ölçüm sonuçlarına göre kaya blokları eş boyutlu olarak tariflenebilecek, daha çok dairesel ya da geoid şekilde olan ve aynı zamanda uzunlamasına basık yapıya da sahip oldukları görülmektedir (Şekil 4). Kaya bloklarının yüksekliği 0,6 m - 2,3 m arasında, uzunlukları 1,1 m - 3,1 m arasında ve genişlikleri 0,7 m, 2,2 m arasında değişmektedir.



Şekil 4. Arazide tespit edilen kaya bloklarının fotoğrafları ile boyutsal ölçümlerine göre kaya bloklarının RAMMS yazılımı içerisinde modellenmiş görünümleri.

Figure 4. Photographs of rocks identified in field studies and model forms of these rocks in the RAMMS software according to dimensions measured in the field.

Ölçülen bu boyutların RAMMS yazılımında tanımlanması sonucunda elde edilen modellere göre kaya bloklarının hacimleri 0,52 m³- 4,69 m³ arasında, kütleleri ise 1.414 kg- 12.667 kg (1,4 ton ile 12,6 ton) arasında değişmektedir (Tablo 1).

Analiz sonuçlarına göre düşme olaylarının yüksek eğimli yamaçlarda yaklaşık 50-85°'lik eğim aralıklarından kaynaklandığı tespit edilmiştir (Şekil 3). Kaya bloklarının, düşmeye

bağlı olarak kat ettiği mesafe kaya bloğunun şekli ve hacmine göre değişiklik göstermesinin yanı sıra yamacın eğim özelliklerine göre de farklılık göstermektedir. Eğim değerlerinin yüksek olduğu ancak eğim kırıklıkları nedeniyle eğimin aniden azaldığı dik yamaçlarda kaya blokları çok ileri mesafelere taşınamamaktadırlar. Ancak eğim değerlerinin yüksek ve eğim kırıklığının olmadığı yamaçlarda çok ileri mesafelere taşınabilmektedirler.

Tablo 1. Kaya bloklarına ait genel geometrik özellikler

Table 1. Geometric properties of the simulated rocks

No	X (Uzunluk) cm	Y (Genişlik) cm	Z (Yükseklik) cm	Hacim m ³	Kütle kg	Kaya bloğunun şekli
K1	150	110	120	1.13	2969	Eş boyutlu, küresel
K2	190	190	60	1.10	2965	Uzunlamasına
K3	180	100	110	1.06	2873	Uzunlamasına
K4	110	90	110	0.79	2136	Eş boyutlu
K5	240	210	110	0.52	1414	Uzunlamasına
K6	200	150	120	1.52	4106	Uzunlamasına
K7	140	110	140	1.12	3035	Eş boyutlu
K8	150	120	120	0.72	1952	Eş boyutlu, küresel
K9	180	120	190	0.93	2497	Uzunlamasına, Yassı
K10	180	70	200	0.74	1720	Uzunlamasına
K11	230	220	150	3.02	8148	Eş boyutlu, küresel
K12	120	80	100	1.12	3035	Eş boyutlu
K13	170	140	220	2.63	7635	Eş boyutlu
K14	310	170	230	4.69	12667	Eş boyutlu

RAMMS yazılımı içerisinde 14 adet kaya bloğunun her birine 100'er adet olmak üzere toplamda 1400 adet kaya düşmesi benzetim modeli gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Kayaçların bulunduğu yamacın eğim özellikleri ile kaya bloklarının geometrik özelliklerinin bir sonucu olarak her kaya bloğu farklı oranda enerji, sıçrama yüksekliği ve hız değerlerine sahiptir (Tablo 2). 14 farklı kaya bloğunun modellenmesi sonucunda maksimum hareket

hızları 5,56 m/s ile 19,26 m/s arasında, maksimum sıçrama yükseklikleri 1,63 m ile 8,44 m, maksimum kinetik enerjileri ise 43 kJ ile 2.865 kJ arasında değişmektedir (Tablo 2, Şekil 5). En yüksek kinetik enerji 2.865 kJ ile K14 no'lu kaya bloğunda, en düşük kinetik enerji ise 43 kJ ile K3 no'lu kaya bloğunda görülmektedir. Bu değerlere göre 4,69 m³ ile en yüksek hacim oranına ve eşboyutlu bir şekle sahip K14 bloğu maksimum enerjiye

ulaşır olarak belirlenmiştir. Ancak kaya bloklarının sahip oldukları kinetik enerji her zaman hacimleri ile ilişkili değildir. Blokların geometrik şekli sahip oldukları kinetik enerji miktarları üzerinde büyük etkiye sahiptir. Örneğin 1,06 m³ hacme sahip K3 bloğu, analiz edilen en düşük hacimli kaya bloğu olmamasına rağmen kaya bloğunun yassı şeklinden dolayı en düşük kinetik enerji miktarına sahiptir. Benzer durum diğer yassı kaya bloklarında da görülmektedir. Kaya bloklarının hareket hızları 5,56 m/s - 19,26

m/s arasında değişirken en yüksek ve en düşük hız kinetik enerji oranları ile paralellik göstermektedir. Buna göre K14 en yüksek hıza, K3 ise en düşük hıza sahip kaya bloklarıdır. Kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri ise düşme sonucunda 85°'yi bulan dik eğimli noktalarda 1,63 m - 8,44 m arasında değişmektedir. Enerji ve hız miktarlarının yüksek olduğu kaya blokları aynı oranda maksimum sıçrama yüksekliklerine ulaşmaktadır.

Tablo 2. Kaya düşmelerine ait benzetim modelleme sonuçları (E: Ev, Y: Yol, A: Ağaç)

Table 2. Results of rockfall simulations (E: House, Y: Road, A: Tree)

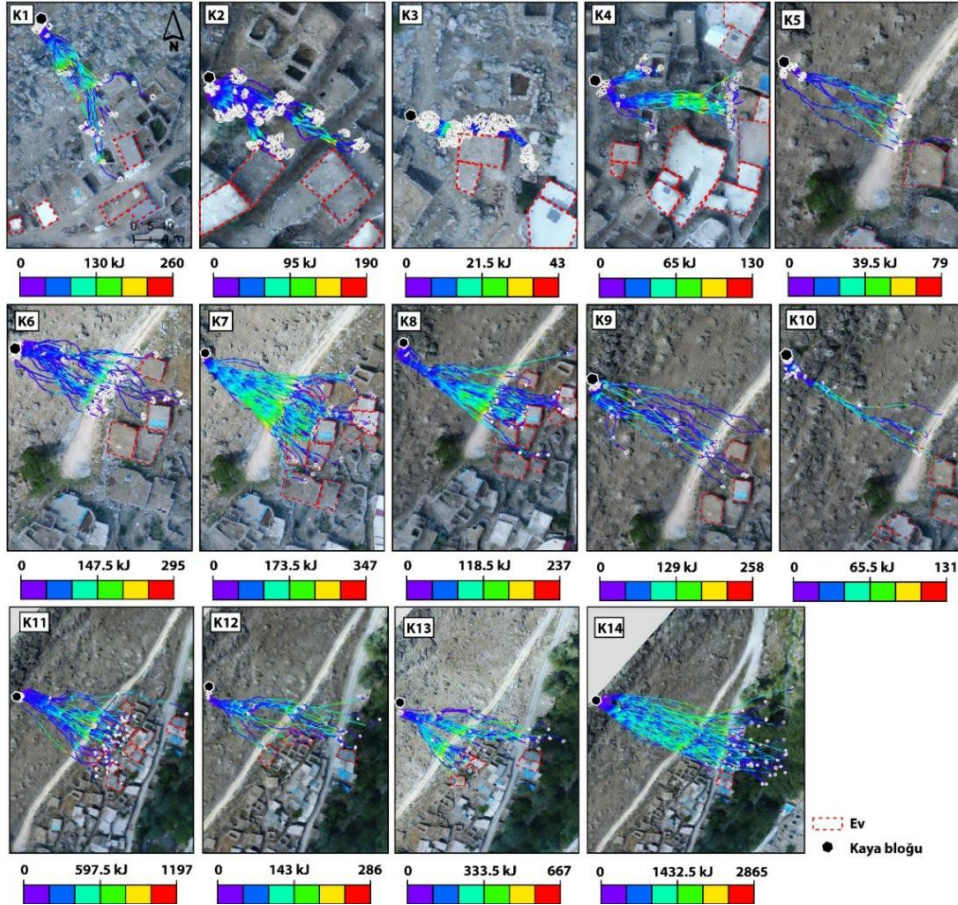
No	Mak. kinetik enerji (kJ)	Mak. hız (m/s)	Mak. sıçrama yüksekliği (m)	Mak. ilerleme mesafesi (m)	Risk altındaki unsurlar
K1	260	12.67	4.56	49	E
K2	190	11.02	3.01	27	E
K3	43	5.56	1.63	16	E
K4	130	10.35	3.65	41	E, Y
K5	79	10.25	3	46	Y
K6	295	11.59	3.22	56	E, Y
K7	347	14.2	4.89	62.5	E, Y
K8	237	14.56	5.14	68.5	E, Y
K9	258	13.48	4.94	63	E, Y
K10	131	11.65	3.98	73	E, Y, A
K11	1197	15.85	5.19	107.5	E, Y, A
K12	286	12.89	3.68	105	E, Y, A
K13	667	12.15	5.04	77.5	E, Y, A
K14	2865	19.26	8.44	156	E, Y, A

Her bir kaya bloğunun 100 farklı şekilde benzetim modellemesiyle kaya bloklarının olası ulaştıkları noktaların değerlendirilmesi sonucunda tehlike ve risk açısından şekilsel özelliklerinin büyük bir rol oynadığı, kaya bloklarının bulunduğu alanın topografik ve jeomorfolojik özelliklerinin kaya bloklarının

ilerleyişi bakımından önem taşıdığı görülmektedir. Bu nedenle, yerleşim birimleri içerisinde tespit edilen kaya bloklarının ilerleyişi genel olarak ev, yol, ağaç tarafından engellendiği fakat yörüngelerinde farklı rotalara saptıkları, yine yapılar ile büyük oranda temasta olduğu görülmektedir.

Neredeyse modellenen bütün kaya bloklarının ev, yol ve diğer unsurlara ulaşmakta olduğu belirlenmiştir (Şekil 5, Tablo 2). Kaya bloklarının ilerleyişi bakımından yine topografik ve jeomorfolojik özelliklerin uzun mesafeler katedilmesi noktasında öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanısıra yol ve ev gibi unsurların kaya bloklarının sönümlenmesinde ya da ilerleyişinin engellen-

mesinde bariyer görevi gördüğü fakat bu blokların büyük bir risk kaynağı oluşturduğu görülmektedir. Model sonuçlarına göre kaya blokları yerleşim birimleri içerisinde 16 m - 41 m arasında bir maksimum ilerleme mesafesine sahiptir. Kaynak alanına göre ise K5-K14 no'ları arasında yer alan kaya blokları ise 46 m - 156 m arasında bir maksimum mesafe katetmektedir.



Şekil 5. Kaya bloklarına ait yörünge ve kinetik enerji dağılım sonuçları

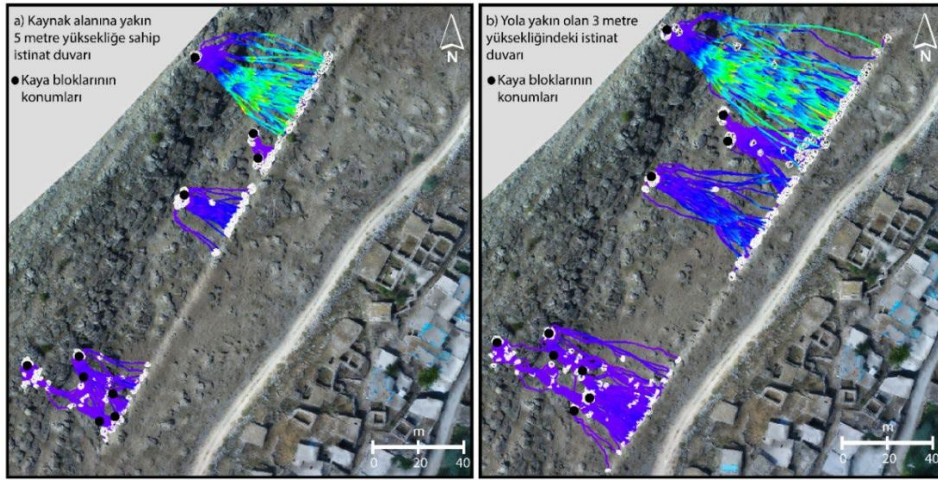
Figure 5. Trajectory and kinetic energy distribution results of rock blocks.

Kaya düşmesi benzetim modeli sonuçlarına göre yıkılmamış şekilde olan birçok yapıya ulaşma potansiyeli bulunan K5-K14 no'lu kaya

bloklarının yer aldığı kuzeydoğu kesiminin en yüksek kaya düşmesi tehlikesine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5). Çok farklı

yörüngelere sahip bu kaya bloklarının kritik alanlarda barındırmış olduğu risklerin azaltılması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. RAMMS yazılımında yeni modelleme kapsamında SYM verisine sayısal olarak 142 m uzunluğunda ve 1,5 m genişliğinde istinat duvarları eklenmiştir. İstinat duvarları hem kaynak alanlarına hem

de yola yakın olacak şekilde iki farklı lokasyonda farklı yüksekliklere sahip olarak test edilmiştir (Şekil 6a). Sonuç olarak kaynak alanlarına yakın lokasyonda 5 m, yola yakın lokasyonda ise 3 m yükseklikli istinat duvarı tüm kaya düşmesi sürecini engellediği, yani modelde çalıştırılan tüm kaya bloklarını tuttuğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Olası tehlike ve riskin önlenmesine yönelik modellenen istinat duvarları

Figure 6. Retaining walls modeled to avoid potential danger and risk

SONUÇ

Kaya düşme çalışmalarında arazi çalışmaları ve ölçümlerinin yanı sıra yüksek çözünürlüklü ve güncel topografik veriler büyük önem taşımaktadır. Bu açıdan küçük alanlar için İHA görüntülerinden oluşturulacak yüksek çözünürlüklü SYM'leri gerçeğe yakın model çalışmalarının gerçekleştirilmesi bakımından son derece faydalı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada hem tarihsel süreçte hem de günümüzde kaya düşmeleri olaylarının yaşandığı Murtaza köyünde var olan kaya düşme tehlikeleri İHA görüntülerinden elde edilen SYM verisi üzerinden 3B olarak

RAMMS kaya düşme yazılımı ortamında değerlendirilmiştir. Çalışmada arazide tespit edilen 14 kaya bloğu için toplam 1400 kaya düşmesi modeli oluşturulmuş ve sonuçlar hem kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi hem de bu tehlikenin nasıl azaltılabileceği bakımından değerlendirilmiştir. Model sonuçlarına göre kaya bloklarının maksimum hareket hızları 5,56 m/s ile 19,26 m/s arasında, maksimum sıçrama yükseklikleri 1,63 m ile 8,44 m, maksimum kinetik enerjileri ise 43 kJ ile 2.865 kJ arasında değişmektedir. Kaya bloklarının büyük bölümü, özellikle çalışma alanının kuzeybatısında, ev ve yol gibi yapılara ulaşmaktadır. Riskin en fazla olduğu bu

kesimde olası kaya düşmesi risklerinin engellenmesi için 142 m uzunluğunda 1.5 m genişliğinde istinat duvarları modellenmiştir. Model sonuçlarına göre kaynak alanlarına yakın noktalarda 5 metre yüksekliğinde, kaynak alanından daha uzak ancak yola yakın konumda ise 3 metre yüksekliğinde bir istinat duvarının tüm kaya düşmelerini engelleyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Elde edilen tüm bu sonuçlara göre arazi ölçüm verileri, güncel topografyayı gerçeğe yakın temsil edebilen yüksek çözünürlüklü SYM verileri ve 3B kaya düşmesi modellerinin birlikte kullanılmasının kaya düşmeleri çalışmalarında çok etkili sonuçlar ortaya çıkardığı anlaşılmıştır.

KATKI BELİRTME

Çalışmaya katkılarından dolayı Niğde Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

AFAD 2018. Murtazaköy Jeolojik Etüd Raporu. T.C. Niğde Valiliği, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü., 11pp.

Ağca, M., Gültekin, N. ve Kaya, E. 2020. İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. Geomatik, 5, 134–145.

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A.Ö., Orhan, A., Akin, M.K. ve Topal, T. 2021. Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing. *Engineering Geology*, 283, 106001.

Akın, M., Dinçer, İ. ve Orhan, A. 2020. Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz. AFAD (T.C. İçişleri Bakanlığı Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), 154pp.

Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A., Akin, M. ve Topal, T. 2019. Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses: Akköy (Ürgüp) Case. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 211–232.

Aydın, A. ve Eker, R. 2017. Kaya yuvarlanmalarından etkilenen orman alanlarının belirlenmesi: İnebolu örneği. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 67, 136–149.

Aydın, A., Köse, N., Akkemik, Ü. ve Yurtseven, H. 2012. Assessment and analysis of rockfall-caused tree injuries in a Turkish fir stand: A case study from Kastamonu-Turkey. *Journal of Mountain Science*, 9, 137–146.

Azzoni, A., La Barbera, G. ve Zaninetti, A. 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 32, 709–724.

Bartelt, P., Bieler, C., Bühler, Y., Christen, M., Christen, M., Dreier, L., Gerber, W., Glover, J., Schneider, M., Glocker, C., Leine, R. ve Schweizer, A. 2016. RAMMS: ROCKFALL User Manual v1.6. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, 102pp.

Borella, J.W., Quigley, M. ve Vick, L. 2016. Anthropocene rockfalls travel farther than prehistoric predecessors. *Science Advances*, 2.

Charalambous, S. ve Sakellariou, M. 2007. Estimation of rockfall hazard using a GIS-based three-dimensional rockfall simulation model. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 40, 1934.

Chen, G., Zheng, L., Zhang, Y. ve Wu, J. 2013. Numerical simulation in rockfall analysis: A close comparison of 2-D and 3-D DDA. *Rock Mechanics and Rock*

- Engineering, 46, 527–541.
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., Mcardell, B.W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T. ve Volkwein, A. 2012. Integral Hazard Management Using a Unified Software Environment Numerical Simulation Tool 'RAMMS'. In: 12th Congress INTERPRAEVENT. Grenoble, 77–86.
- Çiflikli, M. ve Bozkaya, Ö. 2018. Niğde Volkanik Kompleksi (Kb Niğde) Erken-Geç Pliyosen Yaşlı Melendiz Volkanitlerinin Hidrotermal Alterasyon Özellikleri. In: Uluslararası katılımlı Kapadokya Yerbilimleri Sempozyumu 24-26 Ekim 2018, Niğde. Niğde, 242–248.
- Crosta, G.B. ve Agliardi, F. 2003. Natural Hazards and Earth System Sciences A methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407–422.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., Frattini, P. ve Lari, S. 2015. Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection. In: G. Lollino (Editor) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*. Switzerland, Springer International Publishing, 43–58.
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P. ve Crosta, G.B. 2016. Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82, 1075–1098.
- Dorren, L.K.A., Berger, F. ve Putters, U.S. 2006. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 145–153.
- Ergünay, O. 2007. Türkiye'nin Afet Profili. In: TMMOB Afet Sempozyumu. Ankara, 1–14.
- Evans, S.G. ve Hungr, O. 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620–636.
- Geniş, M., Sakız, U. ve Çolak Aydın, B. 2017. A stability assessment of the rockfall problem around the Gököl Tunnel (Zonguldak, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 1237–1248.
- Gökçe, O., Özden, Ş. ve Demir, A. 2008. Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı, Afet bilgileri envanteri. Ankara, BAYINDIRLIK VE İSKAN BAKANLIĞI, 122pp.
- Gül, M., Özbek, A. ve Karacan, E. 2016. Rock fall hazard assessment in Asar Hill, ancient Mabolla City, Mugla—SW Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1310.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. ve Agliardi, F. 2002. STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, 28, 1079–1093.
- Katz, O., Reichenbach, P. ve Guzzetti, F. 2011. Rock fall hazard along the railway corridor to Jerusalem, Israel, in the Soreq and Refaim valleys. *Natural Hazards*, 56, 649–665.
- Kayabaşı, A. 2018. The assesment of rockfall analysis near a railroad: a case study at the Kızılınler village of Eskişehir, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 800.
- Kutluca, A.K. 2006. The Izmir City and Natural Hazard Risks. In: 46th Congress of the European Regional Science Association: 'Enlargement, Southern Europe and the Mediterranean'. Volos, Greece, 46th

- Congress of the European Regional Science Association: 'Enlargement, Southern Europe and the Mediterranean', 1–22.
- Lan, H., Derek Martin, C. ve Lim, C.H. 2007. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers and Geosciences*, 33, 262–279.
- Leine, R.I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P. ve Gerber, W. 2014. Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape., 241–271pp.
- Liu, G., Li, J. ve Wang, Z. 2021. Experimental Verifications and Applications of 3D-DDA in Movement Characteristics and Disaster Processes of Rockfalls. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Lu, G., Caviezol, A., Christen, M., Demmel, S.E., Ringenbach, A., Bühler, Y., Dinneen, C.E., Gerber, W. ve Bartelt, P. 2019. Modelling rockfall impact with scarring in compactable soils. *Landslides*, 16, 2353–2367.
- Mary Vick, L., Zimmer, V., White, C., Massey, C. ve Davies, T. 2019. Significance of substrate soil moisture content for rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 1105–1117.
- Matas, G., Lantada, N., Corominas, J., Gili, J.A., Ruiz-Carulla, R. ve Prades, A. 2017. RockGIS: a GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. *Landslides*, 14, 1565–1578.
- Öztürk, M.Z., Çetinkaya, G. ve Aydın, S. 2017. Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye'nin İklim Tipleri. *Coğrafya Dergisi / Journal of Geography*, 35, 17–27.
- Perret, S., Dolf, F. ve Kienholz, H. 2004. Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories - considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. *Landslides*, 1, 123–130.
- Pradhan, B. ve Fanos, A.M. 2017. Rockfall Hazard Assessment: An Overview. In: *Laser Scanning Applications in Landslide Assessment*. Cham, Springer International Publishing, 299–322.
- Taga, H. ve Zorlu, K. 2016. Assessment of rockfall hazard on the steep-high slopes: Ermenek (Karaman, Turkey). *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–32.
- Tanarro, L.M. ve Munoz, J. 2012. Rockfalls in the Duratón canyon, central Spain: Inventory and statistical analysis. *Geomorphology*, 169–170, 17–29.
- Topal, T., Akin, M. ve Özden, U.A. 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey. *Environmental Geology*, 53, 191–200.
- Utlu, M., Öztürk, M.Z. ve Şimşek, M. 2020a. Emli Vadisi'ndeki (Aladağlar) Talus Depolarının Kantitatif Analizlere Göre İncelenmesi. In: S. Birinci, Ç. Kivanç Kaymaz and Y. Kızıllan (Editors) *Coğrafi Perspektifle Dağ Ve Dağlık Alanlar (Sürdürülebilirlik-Yönetim-Örnek Alan İncelemeleri)*. İstanbul-Turkey, Kriter Yayınevi, 51–72.
- Utlu, M., Öztürk, M.Z. ve Şimşek, M. 2020b. Rockfall analysis based on UAV technology in Kazıklıali Gorge, Aladağlar (Taurus Mountains, Turkey). *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7, 239–251.
- Utlu, M., Öztürk, M.Z. ve Şimşek, M. 2021. Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modellerine Uygulanan Üç Boyutlu Analizler ile Kaya Düşmelerine Ait Sayısal Risk Değerlendirmesi: Ünlüyaka Köyü (Niğde, Türkiye). In: M.F. Döker and E.

Akköprü (Editors) Coğrafya Araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları II. Ankara-Turkey, Pegem Akademi, 51–69.

Varnes, D.J. 1978. Slope Movement Types and Processes. In: R.L. Schuster and R.J. Krizek (Editors) Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board. 11–33.

Wieczorek, G.F., Stock, G.M., Reichenbach, P., Snyder, J.B., Borchers, J.W. and Godt, J.W. 2008. Investigation and hazard assessment of the 2003 and 2007 Staircase Falls rock falls, Yosemite National Park, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8, 421–432.

Žabota, B., Repe, B. and Kobal, M. 2019. Influence of digital elevation model resolution on rockfall modelling. *Geomorphology*, 328, 183–195.