





Torul-Kürtün (Gümüşhane) karayolu şevlerinde kaya düşme potansiyelinin 3 boyutlu analizlerle araştırılması ve koruma yöntemlerinin değerlendirilmesi

Investigation of rockfall potential on Torul-Kürtün (Gümüşhane) highway slopes by 3D analyses and evaluation of slope protection methods

Hakan ERSOY^{*1} , Murat KARAHAN² , M. Oğuz SÜNNETÇİ¹ , Arzu FIRAT ERSOY¹ 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon MYO, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 16.05.2024

• Kabul tarihi / Accepted: 19.08.2024

Öz

Bu çalışmada Tortul-Kürtün Karayolunda bulunan kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyeli 3 boyutlu kaya düşme analizleriyle değerlendirilmiş, analiz sonuçlarına göre farklı ıslah yöntemleri önerilmiştir. Bu amaçla ilk aşamada sayısal arazi modelinin kurulması amacıyla LİDAR entegre insansız hava araçları ile uçuşlar yapılmış, elde edilen fotogrametrik veriler kullanılarak çalışma konusu kaya şevlerine ait sayısal arazi modeli hazırlanmıştır. Çalışmada süreksizlik ölçümlerinden elde edilen veriler ve daha önce düşerek şev tabanlarında biriken bloklar dikkate alınarak 3 boyutlu analizlerde kaynak olarak kullanılacak blok boyutları ve şekilleri belirlenmiş, literatür verileri dikkate alınarak normal geri verme katsayısı 0.75, tanjant geri verme katsayısı 0.75, sürtünme katsayısı 0.4 olarak kabul edilmiştir. Yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde blok enerjisi, sıçrama yüksekliği, hareket eden blokların durduğu noktalar ve blok hızı değerleri hesaplanmış ve bu değerlere ait 3 boyutlu görseller hazırlanmıştır. Analiz sonuçları blok hızı değerlerinin ortalama 15 m/s olduğunu, blok enerjilerinin maksimum değerlerinin farklı alanlarda 50-200 kJ arasında değiştiğini göstermektedir. 3 boyutlu kaya düşme analiz sonuçları, şevlerin konumu ve yüksekliği, şevler ile karayolu arasındaki tampon bölgelerin genişliği gibi özellikler bir bütün olarak değerlendirilerek blok enerji değeri 100 kJ'dan küçük olan alanlarda yamaç temizliği sonrası "güçlendirilmiş çelik ağ", blok enerji değeri 100 kJ'dan yüksek olan alanlarda "güçlendirilmiş çelik ağ" üzerinde "yüksek kapasiteli halka ağ" kullanarak şevlerin sarılması önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çelik ağ, Gümüşhane, Karayolu, Kaya düşmesi, Şev, 3 boyut

Abstract

In this study, the rockfall potential of the rock slopes on the Tortul-Kürtün Highway was evaluated by three-dimensional rockfall analyses. Based on the results of these analyses, different slope protection methods were proposed. To this end, in the first stage, flights were made with LIDAR-integrated unmanned aerial vehicles in order to establish a digital terrain model. This was followed by the preparation of a digital terrain model of the rock slopes using the photogrammetric data obtained. In the study, the block sizes and shapes to be used as a source in 3D analyses were determined by taking into account the data obtained from discontinuity measurements and the blocks that had previously fallen and accumulated on the slope bases. Furthermore, the normal coefficient of restitution was accepted as 0.75, the tangential coefficient of restitution as 0.75, and the friction coefficient as 0.4 by considering the literature data. In the 3D rockfall analyses, the following parameters were calculated: block energy, bounce height, stoop points, and block velocity values. The resulting 3D visuals of these values were prepared. The results of the analyses indicate that the average block velocity values are 15 m/s, with maximum values of block energies varying between 50 and 200 kJ in different areas. The results of the 3D rockfall analysis, the location and height of the slopes, the width of the buffer zones between the slopes and the highway were evaluated as a whole. It was recommended that the rock slopes be covered using "wire rope net" after stone/rock cleaning in areas with block energy values less than 100 kJ and "high capacity steel wire ring net" over the "wire rope net" in areas with block energy values higher than 100 kJ.

Keywords: Steel fence, Gümüşhane, Highway, Rockfall, Slope, 3D

*Hakan ERSOY; ersoy@ktu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

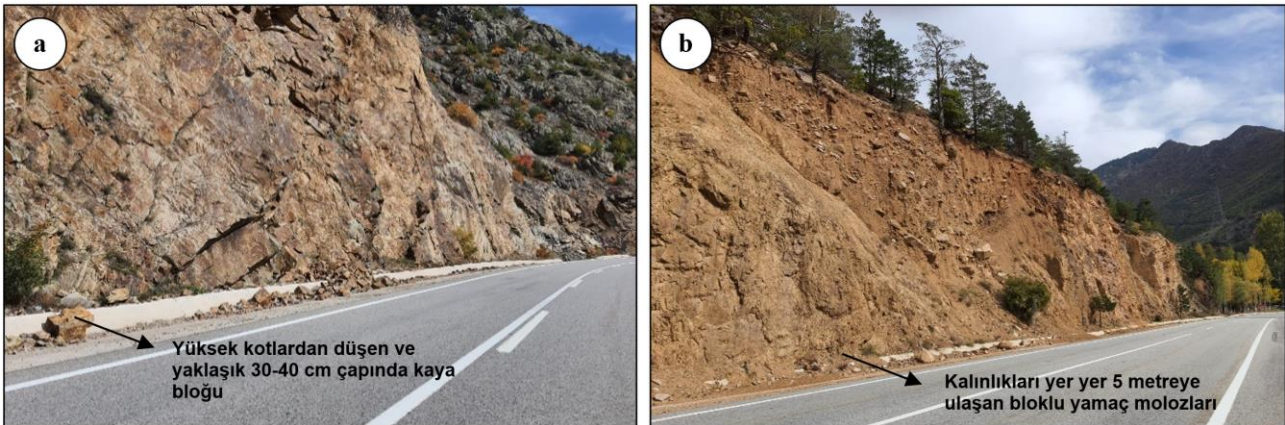
Ülkemizde iklim değişikliğinin etkilerinin en fazla hissedildiği Doğu Karadeniz Bölgesi'nde heyelan, kaya düşmesi ve taşkınlar sıklıkla meydana gelmektedir. Oluşma sıklığı bakımında heyelanlar ve kaya düşmeleri ön plana çıkarken, taşkınlar ise etki alanının büyüklüğü ile öne çıkmaktadır (Ersoy vd., 2020). Ülke genelinden farklı olarak bölgede, bölgede gelişen doğa kaynaklı afetleri %95'ini heyelan, taşkın ve kaya düşmeleri oluşturmaktadır.

Kaya düşmesi, eğimli yamaçlarda bulunan büyük kaya parçalarının, özellikle atmosferik olayların etkisiyle eğim aşağı hareket etmesi olayıdır. Bölgede meydana gelen kaya düşmeleri heyelanlar kadar etkili olmaktadır. Özellikle karayolu şevlerinde gelişen kütle hareketleri üzerinde yapılan araştırmalarda, yenilmelerin birincil nedeninin su etkisi (aşırı ve ani yağışlar) olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak ayrışma, dike yakın eğimli yamaçlar ve zemin koşulları sıralanmaktadır (Reis vd., 2008; Alemdağ vd., 2015; Kul Yahşi & Ersoy, 2018; Karahan vd., 2020, Sünnetci vd., 2021).

Torul-Kürtün arasında meydana gelen kütle hareketlerinin incelenmesine yönelik ilk lisansüstü çalışmalar 1990'lı yıllarda başlamıştır (Şirin, 1995; Peker, 1998). Bu bölgede Torul ve Kürtün baraj inşaatları sırasında, mevcut karayolunun rezervuar suyu altında kalacak olması nedeniyle üst kotlarda bulunan yamaçlarda yol yapımı amaçlı kazılar nedeniyle kütle hareketi riskini arttırmıştır. Özellikle kaya kütlelerinde açılan dike yakın karayolu şevlerinde her yıl birçok kaya düşme olayı meydana gelmektedir. Karayolları şevlerinde genellikle kaya düşmesi vakalarına rastlanırken, ayrışmanın ve buna bağlı olarak zemin kalınlığının fazla olduğu alanlarda heyelanlarda gelişmektedir (Pehlivan, 2008; Erkan, 2010; Özdoğan, 2010; Yüregir, 2021). Gacener (2019) tarafından yapılan çalışmada Torul-Kürtün karayolu güzergahında birçok kaya düşme olayının meydana geldiği, bu olayların ise bu bölgede bulunan yerleşim yerlerini ve karayolu kullanımını ciddi olarak tehdit ettiği belirtilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda 3 boyutlu analizler ve konumsal analiz teknikleri kullanılarak bu alanda kaya düşme riski detaylı olarak irdelenmiştir (Alemdağ vd., 2021; Alemdağ vd., 2022). Bu çalışmada ise kapsamında Torul-Gümüşhane Karayolu'nda bulunan 2 farklı bölgede kaya düşme potansiyeli 3 boyutlu analizlerle araştırılmış, karayolu güvenliği için gerekli ıslah yöntemleri önerilmiştir.

2. Çalışma alanının konumu ve genel özellikleri

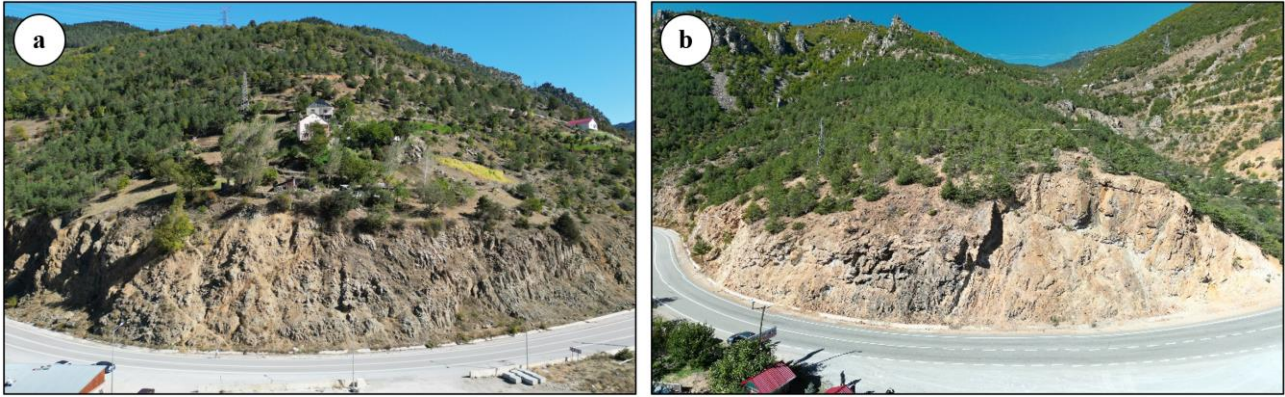
Çalışma, Torul-Kürtün yol ayrımından Kürtün'e devam eden karayolu üzerinde 2 ayrı kaya şevinde gerçekleştirilecektir. Bu hat boyunca ileri derece ayrılmış kaya kütlelerinde hemen hemen her noktada süresizliklere bağlı gelişen kaya düşmesi ve devrilmeler (yer yer kayma) sonucu yol kenarlarında birikmiş moloz döküntüsü ve kaya bloklarına rastlanılmaktadır (Şekil 1). Ayrıca kalınlıkları yer yer 5 metreye ulaşan ve yer yer 1 m çapa kadar blok içeren yamaç molozlarının yüzeyletiği görülmüştür (Şekil 1). Gerek literatür verileri gerekse arazi gözlemleri Torul-Kürtün karayolu şevinde her mevsim ve sürekli olarak kaya düşme olaylarının gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 1 Torul-Kürtün arasında ayrışmaya ve süresizliklere bağlı gelişen kaya düşmeleri (a) ve kalınlıkları yer yer 5 metreye ulaşan yamaç molozları (b)

Figure 1. Rockfall events due to weathering and discontinuities between Torul and Kürtün Highway, and the talus with a thickness of 5 meters

Çalışma kapsamında ilki Yeşilyol Köyü'nün yaklaşık 3 km kuzeybatısında (Şev-1), ikincisi ise Kirazlık Köyü sınırları içerisinde (Şev-2) yer alan şevler çalışılmıştır. İlk şev Gümüşhane-Torul Devlet Karayolu KM: 36+200 – 36+300 arasında, ikinci şev KM: 40+100 – 400+200 arasında bulunmaktadır (Şekil 2).



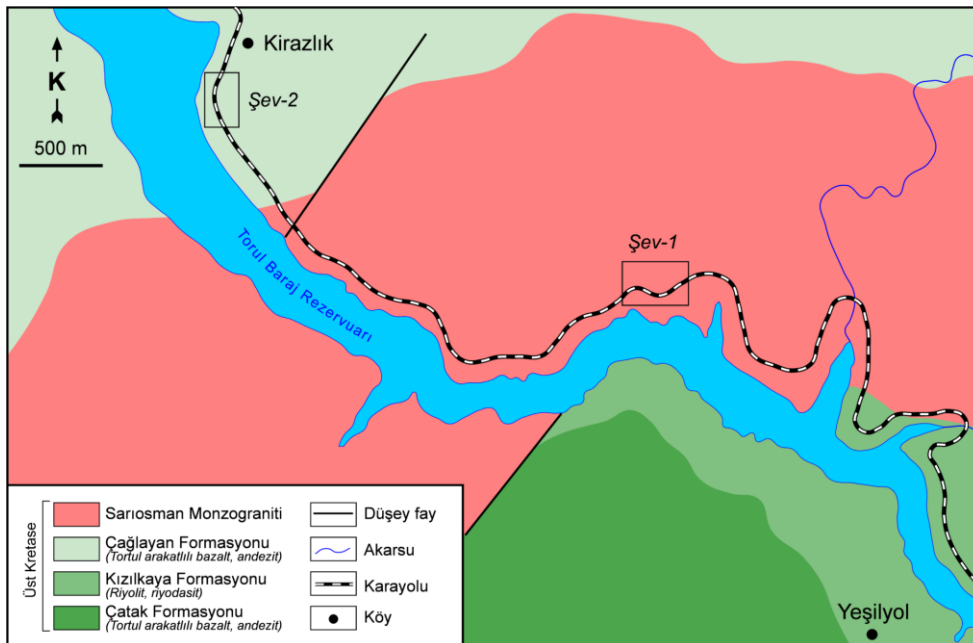
Şekil 2. Çalışma kapsamında değerlendirilen 2 ayrı karayolu şevi (sol şekil: Şev-1, sağ şekil: Şev-2)
Figure 2. 2 different highway rock slopes evaluated in the study (a: Slope-1, b: Slope-2)

3. Çalışma alanının jeolojisi

3. Geology of the study area

Çalışma alanı ve çevresinde bulunan kayalar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları esas alınarak tanımlanmıştır. Bölgede yaşlıdan gence doğru Üst Kretase yaşlı Çatak Formasyonu, Kızılkaya Formasyonu, Çağlayan Formasyonu ve Sariosman Monzograniti yüzeyleme vermektedir. Proje konusu karayolu şevinde Üst-Kretase yaşlı Çağlayan Formasyonu'na ait kayaların yüzeylenme verdiği belirlenmiştir (Şekil 3).

Gümüşhane-Torul Devlet Karayolu KM: 36+200 – 36+300 arasında kalan alanda bulunan şevde (Şev-1) Sariosman Monzograniti ait kayalar yüzeylenme vermektedir. İlk olarak Güven (1993) tarafından adlandırılan birim, Kaygusuz (2000) tarafından Sariosman Monzograniti olarak adlandırılmıştır. Açık pembe, grimsi renkli ve ince-orta daneli olan granitler ortoklas, plajiyoklas, kuvars, biyotit ve amfibol mineralleri içermektedir (Gacener, 2019). Gümüşhane-Torul Devlet Karayolu KM: 40+100 – 400+200 arasında kalan alanda (Şev-2) bulunan şevde Çağlayan Formasyonuna ait kayalar yüzeylenme vermektedir. Güven (1993) tarafından tanımlanan ve genel olarak kumtaşı, marn, killi kireçtaşı ara katkılı bazalt, andezit ve piroklastitlerden oluşan birim, çalışma konusu kaya şevinde bazalt ve andezitlerle karakteristiktir. Genellikle koyu renkli olan bu kayalar yerel olarak kırıklı ve çatlaklı bir yapı sunmaktadır.

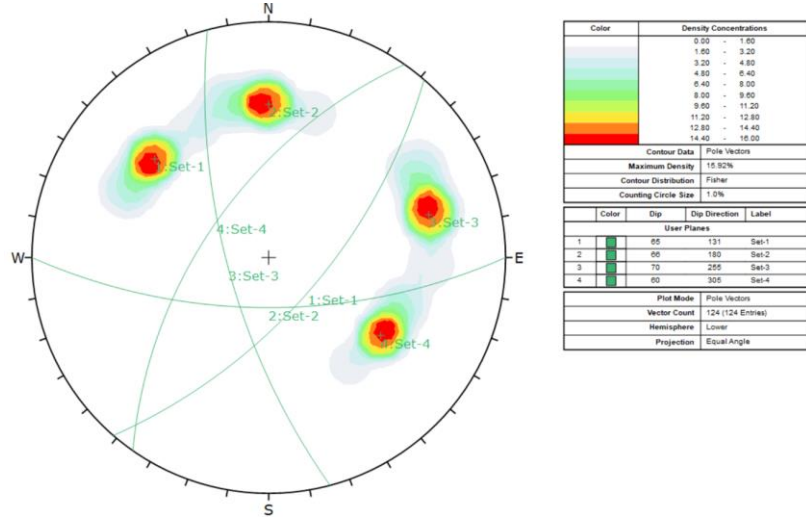


Şekil 3. Çalışma konusu kaya şevlerinin bulunduğu alanın jeoloji haritası (Kaygusuz 2000'den değiştirilerek)
Figure 3. Geological map of the studied rock slopes (Modified from Kaygusuz 2000)

3. Kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri

3. Discontinuity Properties of rock masses

Çalışmada kaya kütlelerinde görülen mevcut süreksizliklerin yönelimleri belirlenmiş, arazide pusula ölçümleri ile 124 adet süreksizlik ölçümü alınmış, Dips v5.0 programı yardımıyla kontur diyagramları hazırlanmış, 131/65, 180/66, 255/70, 305/60 duruşlu 4 adet süreksizlik takımı belirlenmiştir. Çalışmada hat etütleri ile süreksizlik ara uzaklığı, açıklığı, devamlılığı, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü ve dalgalılığı, süreksizlik yüzeylerindeki bozuşma, su ve dolgu durumu gibi özellikler [ISRM \(2007\)](#) tarafından önerilen tanımlamalar dikkate alınarak belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir. Süreksizlik ölçümleri sonucunda elde edilen veriler bu çalışmada kullanılmamış olup, ilerleyen dönemlerde süreksizlik kontrollü kütle hareketi risklerinin araştırılmasına yönelik çalışmalar için altlık oluşturulması amaçlanmıştır.



Şekil 4. Süreksizliklere ait kontur diyagramı (alt yarı küre)

Figure 4. Contour diagram of the discontinuity (lower hemisphere)

Tablo 1. Çalışma alanındaki süreksizliklerin ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütlere göre tanımlanması

Table 1. Classification of discontinuities properties in the study area according to the criteria suggested by ISRM (2007)

Süreksizlik Özelliği	131/65	180/66	255/70	305/60
Ara uzaklık	Yakın ara uzaklık	Orta derecede ara uzaklık	Yakın ara uzaklık	Yakın ara uzaklık
Açıklık	Açık	Açık	Açık	Kısmen açık
Devamlılık	Yüksek devamlılık	Çok yüksek devamlılık	Yüksek devamlılık	Yüksek devamlılık
Pürüzlülük	Pürüzlü, dalgalı	Pürüzlü, dalgalı	Pürüzlü, dalgalı	Pürüzlü, dalgalı
Ayrışma	Az	Orta	Az	Orta

4. Üç boyutlu kaya düşme analizleri

4. 3D rockfall analysis

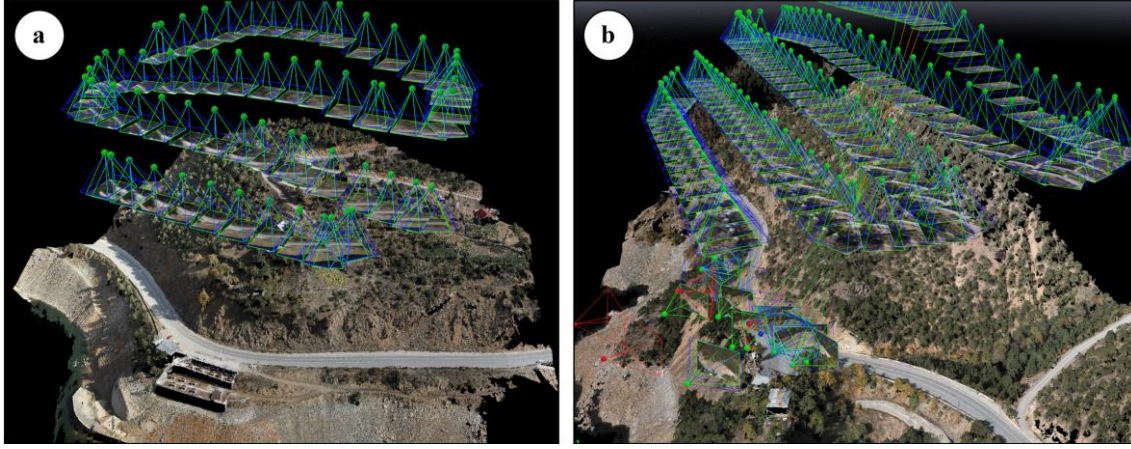
Çalışma kapsamında 3 boyutlu kaya düşme modeli 3 ana başlık altında irdelenmiştir. Bu kapsamda ilk aşamada araziye ait 3 boyutlu arazi modeli oluşturulmuş, farklı boyutlardaki blok hareketleri modellenmiş ve kaya düşme etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kaya düşme analizlerinde girdi parametresi olarak arazinin sayısal yükseklik modeli, çalışma alanı ve çevresinin jeolojisi, bitki varlığı ve yoğunluğu, yüzeylerin geri sıçrama değerleri ve sürtünme açısı, düşen blokların şekilleri ve boyutları, çalışma alanındaki kayaların yoğunluğu (kg/m^3) gibi parametreler kullanılmıştır.

4.1. Sayısal arazi modelinin oluşturulması

4.1. Creating of the digital terrain model

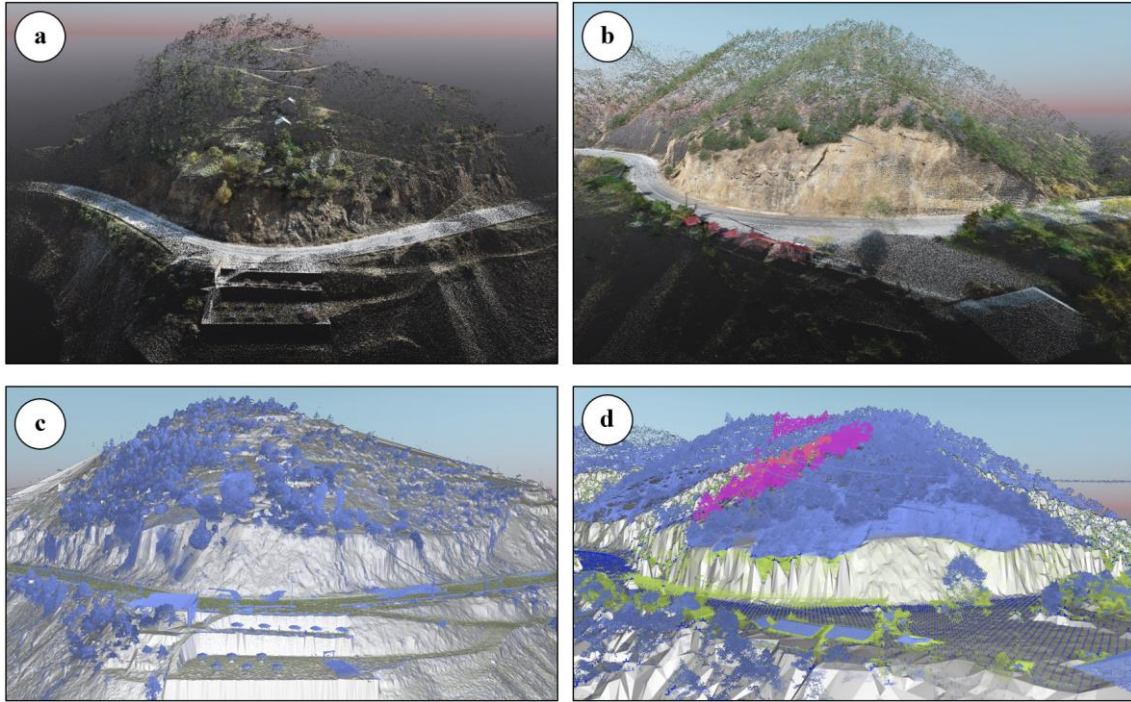
Bu çalışma kapsamında fotogrametrik çalışmalarda DJI Matrice 300 dron kullanılmıştır. Matrice 300 kullanılır iken yer istasyonu olarak D RTK 2 modülü ile cm hassasiyetinde ölçüm yapılmıştır, Zennume L1 Lidar

Kamera ile çift yönlü 3 dönümlü terrain oblik uçuş yapılarak ağaç örtüsü kaldırılmış ve yüzey modeli oluşturulmuştur. Matrice 300 ile Zennume P1 kamera kullanılarak yüksek çözünürlükte orthophoto oluşturulmuştur. Uçuşlar 100 metre yükseklikten terrain (arazi yüzeyini takip eden) uçuşlar olarak gerçekleştirilmiştir, veriler UTM WGS84 6 derece olarak işlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Bindirmeli (70x80) fotoğrafların birleştirilmesi ile oluşturulan 3D model (a: Şev-1, b: Şev-2)
Figure 5. 3D model created by combining photos with overlapping (70x80) (a: Slope-1, b: Slope-2)

Lidar verileri DJI Terra yazılımı ile işlenerek nokta bulutu oluşturulmuş ve LAS dosyası olarak kaydedilmiştir. Sonrasında PIX 4D SURVEY yazılımı aracılığı ile nokta bulutları sınıflandırılarak (Şekil 6) yüzey modelleri hazırlanmış ve kaya şevinin konumsal bilgileri ve boyutları belirlenmiştir. Sayısal yükseklik modeli, sayısal yüzey modeli ve sayısal arazi modellerine verilen isimdir. DJI Terra programı yardımı ile elde edilen LAS formatındaki nokta bulutu verilerinin Pix4D Survey programında analizleri yapılarak Sayısal Yüzey Modeli (SYM) oluşturulmuş, oluşturulan sayısal yüzey modellerinde yapılan temizleme sonrasında arazinin ham hali yani sayısal arazi modeli (SAM) hazırlanmıştır (Şekil 6).

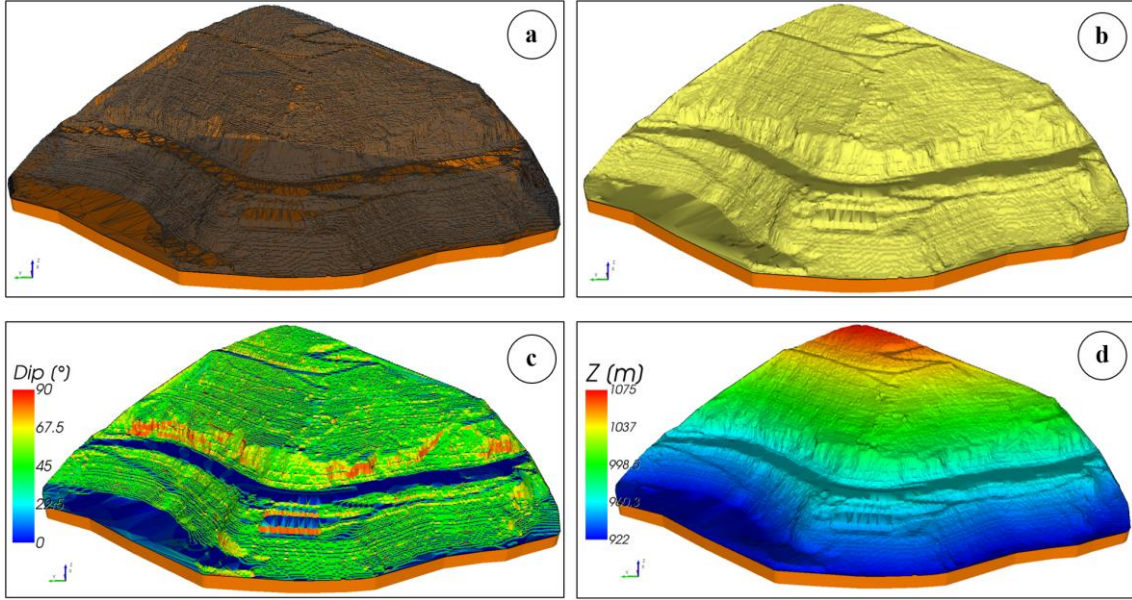


Şekil 6. Zenmuse L1 verilerinin işlenmesi sonucunda oluşan 3D nokta bulutu (a: Şev-1, b: Şev-2) ve çalışılan kaya şevlerine ait sayısal arazi modeli (c: Şev-1, d: Şev-2)
Şekil 6. 3D point cloud (upper figures) created as a result of processing Zenmuse L1 data (a: Slope-1, b: Slope-2) and digital terrain model of the studied rock slopes (a: Slope-1, b: Slope-2)

4.2. Üç boyutlu modelin kurulması

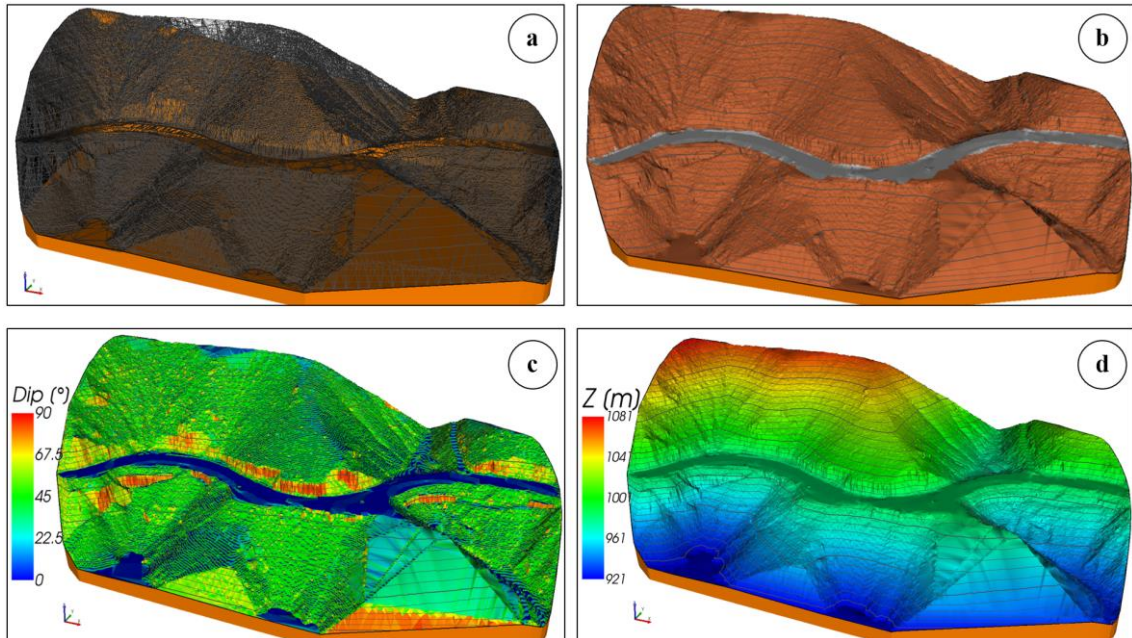
4.2. Preparation of the 3D model

Çalışma kapsamında, 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile gerçekleştirmek için dron uçuşları ile oluşturulan nokta bulutları kullanılarak hazırlanan sayısal haritalar, RocPro3D (RocPro3D, 2014) yazılımına aktarılmıştır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin altlığını oluşturan düzensiz üçgen ağı (TIN), buna bağlı olarak yazılıma aktarılan katı model, 3 boyutlu eğim ve yükseklik haritaları Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Şev-1 için RocPro3D yazılımında oluşturulan düzensiz üçgen ağı (a), 3 boyutlu katı model (b), eğim (c) ve yükseklik kademeleri (d) modeli

Figure 7. Triangulated irregular network (a), 3D solid model (b), slope degree (c) and gradient model (d) created in RocPro3D software for Slope-1



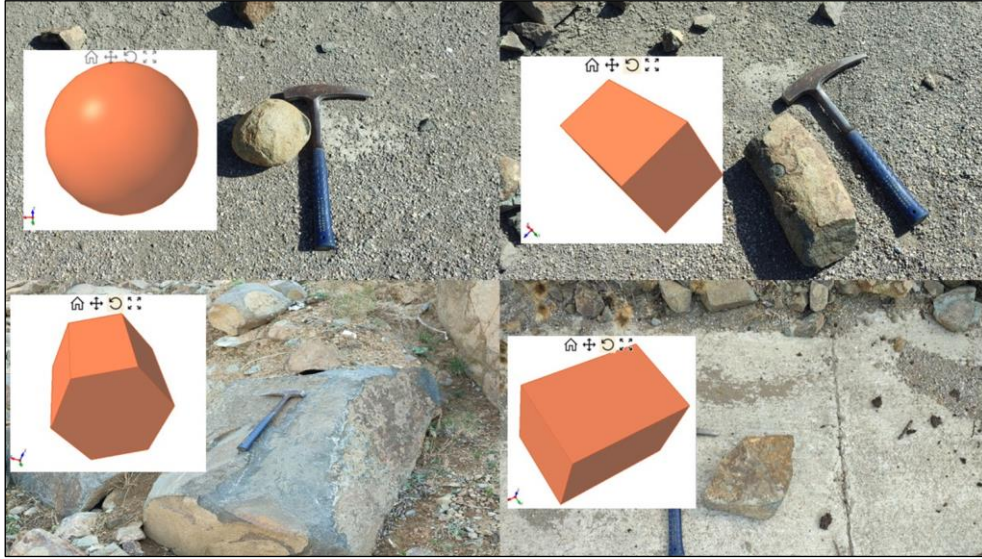
Şekil 8. Şev-2 için RocPro3D yazılımında oluşturulan düzensiz üçgen ağı (a), 3 boyutlu katı model (b), eğim (c) ve yükseklik kademeleri (d) modeli

Figure 8. Triangulated irregular network (a), 3D solid model (b), slope degree (c) and gradient model (d) created in RocPro3D software for Slope-2

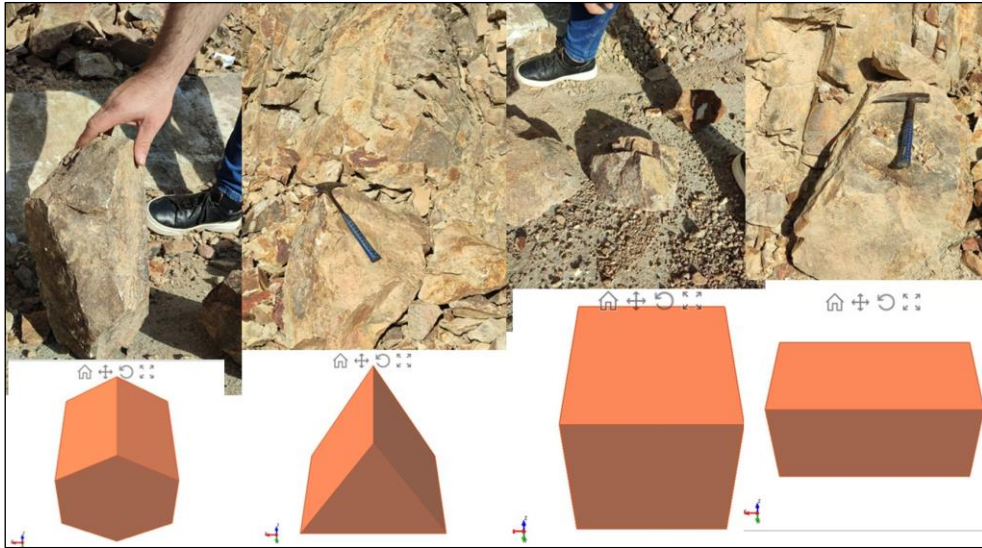
4.3. Kaya düşme analizlerinin uygulanması

4.3. Applying of the rockfall analysis

Kaya düşme analizlerinde, analiz için gerekli tüm bilgiler ve altlıklar temin edildikten sonra kaynak bölgeler model üzerine işlenmektedir. Kaynak bölgeler noktasal, çizgisel, poligonal ve alansal olarak tanımlanabilmektedir. Bununla birlikte, sonuçları etkileyen önemli parametrelerinden biri geri sıçrama değerleri ve sürtünme açısı değerleridir (Kara, 2020). Ayrıca, düşen blokların şekilleri ve boyutları enerjiyi, sıçrama yüksekliğini, hızı ve ilerleme mesafesini etkilemektedir. Bu nedenle kaya düşme vakalarında düşmüş veya düşme riski bulunan blokların boyutları ve şekilleri arazi çalışmalarında tespit edilerek analizlerde o şekildeki bloklar kullanılmalıdır. 3 boyutlu analizlerde kullanılan blok şekilleri Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Şev-1 için 3 boyutlu analizlerde kullanılan blok geometrileri
Figure 9. Block geometries used in 3D analyses for Slope-1



Şekil 10. Şev-2 için 3 boyutlu analizlerde kullanılan blok geometrileri
Figure 10. Block geometries used in 3D analyses for Slope-2

Çalışmada, üretilen 3 boyutlu modeller üzerine kaynak alanlar alansal olarak yerleştirilmiş ve sonrasında bu alanlara daha önceden şevden düşmüş ve düşme riski olan blok geometrisi ve boyutu dikkate alınarak kaynak kayalar tanımlanmıştır. Tanımlama yapılırken blok geometrisi, blogun boyutları ve yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Yapılan arazi çalışmaları sonucunda düşmüş blokların kütleleri Tablo 2'de verilmiştir. Proje sahasında, kaya düşmelerinin gerçekleştiği bölgede arazi gözlemleri ve literatür verileri dikkate alınarak

normal geri verme katsayısı (R_n) 0.75, tanjant geri verme katsayısı (R_t) 0.75, sürtünme katsayısı (k) 0.4, ilk hız "0" kabul edilmiş ve serbest düşme hareketi modellenmiştir.

Tablo 2. Şev-1 ve Şev-2 için arazide ölçülen blokların boyutları

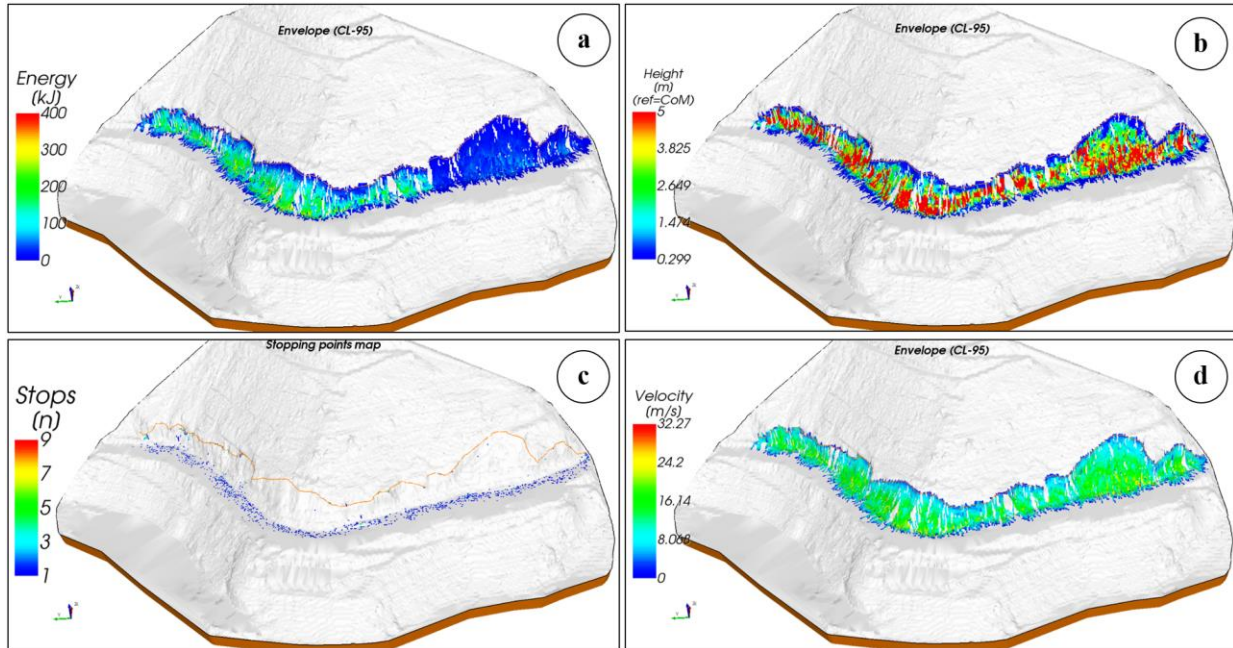
Table 2. Dimensions of blocks measured in the field for Slope-1 and Slope-2

ŞEV-1						ŞEV-2					
X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Hacim (m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütle (kg)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Hacim (m ³)	Yoğunluk (kg/m ³)	Kütle (kg)
93	36	18	0.06	2700	163	99	55	30	0.16	2600	425
86	56	45	0.21	2700	585	44	51	30	0.07	2600	175
48	20	20	0.02	2700	52	53	32	53	0.09	2600	234
43	21	21	0.02	2700	51	32	60	15	0.03	2600	75
35	31	22	0.03	2700	64	35	25	15	0.01	2600	34

Yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde blok enerjisi, sıçrama yüksekliği, hareket eden blokların durduğu noktalar ve blok hızı değerleri hesaplanmış ve bu değerlere ait 3 boyutlu görseller hazırlanmıştır (Şekil 11 ve 12).

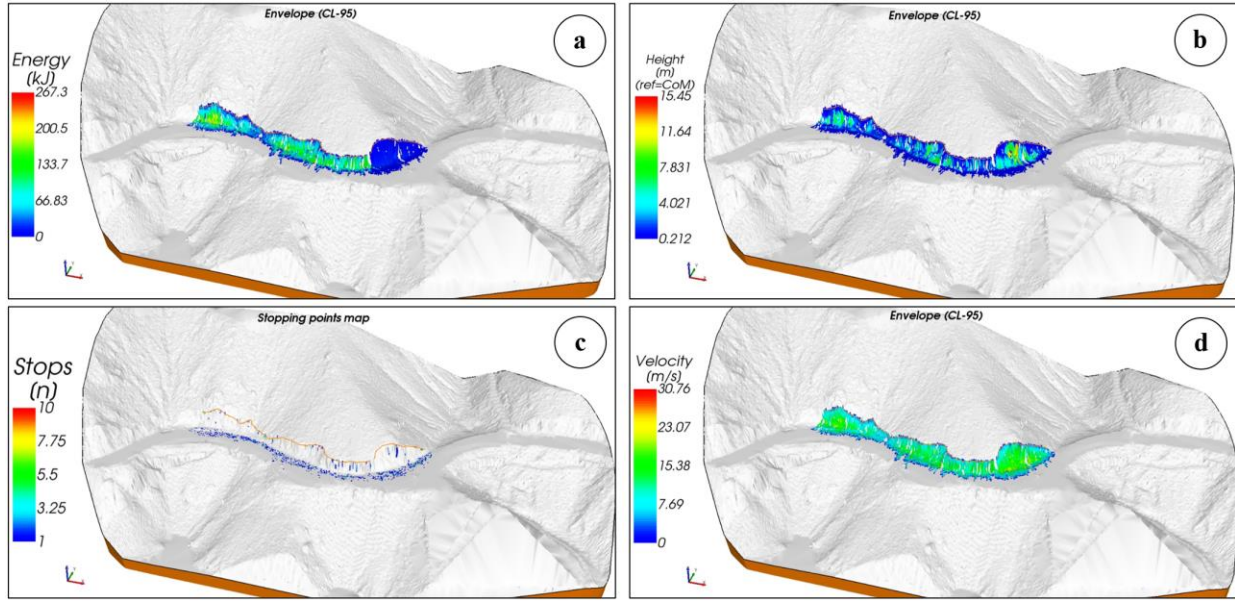
Şev-1 için yapılan analizlerde (Şekil 11) hareket eden tüm blokların karayoluna ulaştığı, blok hızının ortalama 15 m/s olduğu görülmüştür. Ayrıca şev yüksekliğine bağlı olarak blokların şevde 5 metre şev temas etmeden hareket ettiği de anlaşılmıştır. Enerji dağılım haritasında ise şevin sol kesiminde blok enerjilerinin 200 kJ'a ulaştığı, ancak sağ kesimde enerji değerinin 60-70 kJ ile sınırlı olduğu görülmüştür. Bu sonuç şevin her iki kesiminde farklı ıslah yöntemlerinin uygulanması gerektiğini net olarak göstermektedir.

Şev-2 için yapılan analizlerde (Şekil 12) hareket eden tüm blokların benzer şekilde karayoluna ulaştığı, blok hızının ortalama 15 m/s olduğu görülmüştür. Ayrıca şev yüksekliğine bağlı olarak blokların 15 metre şev temas etmeden hareket ettiği de anlaşılmıştır. Enerji dağılım haritasında ise şevin sol kesiminde blok enerjilerinin 130 kJ'a ulaştığı, ancak sağ kesimde enerji değerinin 50 kJ ile sınırlı olduğu görülmüştür. Bu sonuç şevin her iki kesiminde farklı ıslah yöntemlerinin uygulanması gerektiğini net olarak göstermektedir.



Şekil 11. Şev-1 üzerinden düşen kaya bloklarının enerji değerleri (a), sıçrama yükseklikleri (b), blokların ulaştığı son noktalar (c) ve blok hız değerleri (d)

Figure 11. Energy (a), bounce height (b), stop point (c) and velocity (d) of the blocks on the Slope-1



Şekil 12. Şev-2 üzerinden düşen kaya bloklarının enerji değerleri (a), sıçrama yükseklikleri (b), blokların ulaştığı son noktalar (c) ve blok hız değerleri (d)

Figure 12. Energy (a), bounce height (b), stop point (c) and velocity (d) of the blocks on the Slope-2

4.4. Uygun şev koruma yönteminin seçimi

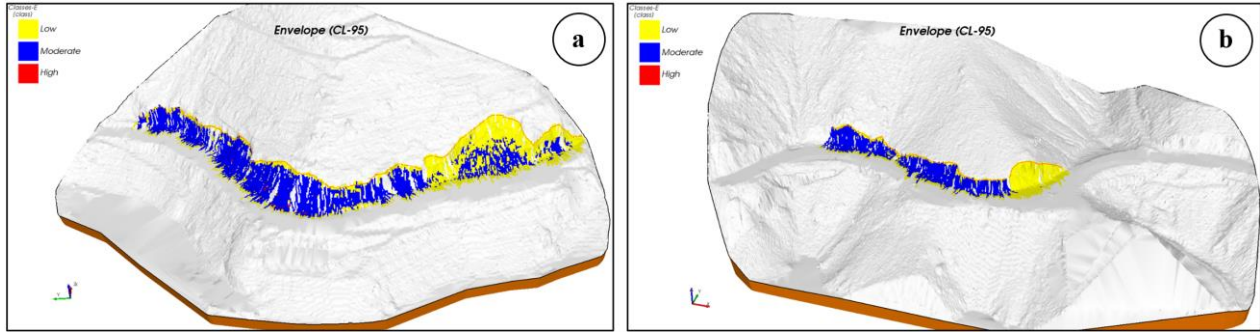
4.4. Selection of suitable slope protection method

Kaya şevlerinde meydana gelen veya gelecek kütle hareketinin tanımlanması ve modellenmesi uygulanacak uygun ıslah yönteminin seçimini etkileyen en önemli parametredir. Çünkü farklı kütle hareketleri için farklı ıslah yöntemleri tanımlanmıştır. Süreksizlik kontrollü yenilmelerin (Düzlemsel kayma, kama tipi kayma vb) önüne geçebilmek için başlıca 4 yöntem kullanılır. Bu yöntemlerde asıl amaç güvenlik sayısının artırılmasına yönelik uygulamaların seçimidir. Bunlar; doğal yükün kaldırılması ve basamaklandırma, uygun kazı planı ile şev yönelimi ve eğiminin oluşturulması, kaya saplama veya ankraj uygulamaları, dayanma yapılarının inşa edilmesi (gabyon, istinat duvarı vb) şeklinde sıralanabilir.

Kaya düşmelerine yönelik çalışmalarda amaç güvenlik sayısının artırılması dolayısıyla şev stabilitesinin sağlanması değildir. Amaç, kaya düşme vakalarının engellenmesi veya etkisinin azaltılmasına yönelik önlemlerin alınmasıdır. Bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup, bunlar aşağıda özetlenmiştir.

- Bu sistemler, kaya şevlerinde ayrışma veya süreksizliklere bağlı olarak küçük boyutlu blokların zamana bağlı olarak düşmesini engellemek veya düşmesine rağmen şev yüzeyi ile ağ arasında kalmasını sağlamak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Uygulamada riskli olan şev yüzeyi en üst kesimden en alt kesime kadar kaplanır.
- Kaya bloğu tutma hendekleri: Şev yüzeyinden veya üzerinden kopan kaya bloklarının çarpma anında enerjilerinin azalmasına ve dolayısıyla daha uzak mesafelere ulaşmasını önlemek amacıyla şev önüne inşa edilen yapılardır.
- Kaya tutma bariyerleri (gabyon, beton blok vb): Çelik ağ veya kaya tutma bariyerlerinin yeterli olamayacağı ve yüksek enerjili bloklardan kaynaklanacak risklerin azaltılması amacıyla düşük eğimli yamaçlarda şev önüne inşa edilen dayanma yapılarıdır.
- Geçiş tünelleri: Bu tüneller, kaya düşme riskinin yüksek olduğu ve diğer yöntemlerin uygulanması durumunda maliyetin azaltılması ve riskin minimuma indirilmesi amacıyla inşa edilen genel olarak bir tarafı açık olan yapılardır.

Proje konusu kaya şevlerinde blok enerjisi, hızı ve sıçrama yüksekliği değerleri kullanılarak hazırlanan risk modeli dikkate alındığında (Şekil 13), düşük blok enerjisine sahip alanlarda “güçlendirilmiş çelik ağ”, yüksek blok enerjisine sahip alanlarda “güçlendirilmiş çelik ağ” ve üzerinde “yüksek kapasiteli halka ağ” sarılması önerilmektedir. Kaya şevleri için yapılan 3 boyutlu analiz sonuçları ve önerilen ıslah yöntemleri Tablo 3’te özetlenmiştir.



Şekil 13. Çalışma konusu kaya şevlerinde blok enerjisi, hızı ve sıçrama yükseklikleri dikkate alınarak hazırlanan risk modeli (Classes-E haritası)

Figure 13. Risk model (Classes-E map) prepared by considering block energy, velocity and heights on the studied rock slopes

Tablo 3. 3 boyutlu analiz sonuçları ve önerilen ıslah yöntemleri

Table 3. The results of 3D analysis and proposed remediation methods

	Şev-1		Şev-2	
	Sol kesim	Sağ kesim	Sol kesim	Sağ kesim
Sıçrama yüksekliği (m)	5	5	15	15
Ortalama blok hızı (m/s)	15	15	15	15
Blok enerjisi (kJ)	200	70	130	50
Risk sınıflaması	Orta	Düşük-orta	Orta	Düşük
Yamaç temizliği	Uygulanmalı	Uygulanmalı	Uygulanmalı	Uygulanmalı
Önerilen şev koruma yöntemi	Yöntem-2	Yöntem-1	Yöntem-2	Yöntem-1

Yöntem-1: Güçlendirilmiş çelik ağ, Yöntem-2: Altta güçlendirilmiş çelik ağ üstte yüksek kapasiteli halka ağ

5. Tartışma ve sonuçlar

5. Discussion and conclusions

Bu çalışma kapsamında Torul-Kürtün karayolu arasında kalan karayolu şevleri değerlendirilmiş, risk görülen 2 adet kaya şevinde üç boyutlu analizlerle kaya düşme potansiyeli araştırılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek şev koruma yöntemleri önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde değerlendirilmiştir.

- (1) Çalışma kapsamında Yeşilyol Köyü'nün yaklaşık 3 km kuzeybatısında (Şev-1) ve Kirazlık Köyü sınırları içerisinde (Şev-2) bulunan iki ayrı şev çalışılmıştır. Şev-1'de Sarıosman Monzograniti ait kayalar yüzeylenme verirken, Şev-2'de Çağlayan Formasyonuna ait bazalt ve andezitler yüzeylenmektedir.
- (2) Çalışmada mevcut süreksizliklerin yönelimleri belirlemek için ölçümler alınmış, 131/65, 180/66, 255/70, 305/60 duruşlu 4 adet süreksizlik takımının hakim olduğu belirlenmiştir. Süreksizliklerin "orta-yakın ara uzaklıklı", "yüksek-çok yüksek devamlılıklı", "pürüzlü-dalgalı" ve genellikle ayrışma derecesinin "az-orta" olduğu belirlenmiştir.
- (3) Arazinin 3 boyutlu katı modelinin hazırlanması amacıyla fotogrametrik çalışmalar yapılmış, DJI Matrice 300 dron kullanılarak Lidar Kamera ile çift yönlü 3 dönüşlü terrain oblik uçuşlar yapılmıştır. Elde edilen verilerle ortofotolar ve nokta bulutu verileri oluşturulmuş, PIX 4D SURVEY yazılımı aracılığı ile nokta bulutları sınıflandırılarak yüzey modelleri hazırlanmış ve kaya şevinin konumsal bilgileri ve boyutları belirlenmiştir. Elde edilen tüm veriler 3 boyutlu kaya düşme analizleri için RocPro3D (RocPro3D, 2014) yazılımına aktarılmıştır.
- (4) Yapılan 3 boyutlu analizlerinde her iki şevde de hareket eden tüm blokların karayoluna ulaştığı, blok hızının ortalama 15 m/s olduğu görülmüştür. Şev-1'in sol kesiminde blok enerjilerinin 200 kJ'a ulaştığı, sağ kesimde enerji değerinin 60-70 kJ ile sınırlı olduğu Şev-2'nin sol kesiminde blok enerjilerinin 130 kJ'a ulaştığı, sağ kesimde enerji değerinin 50 kJ'de kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, her iki şevin farklı alanlarında farklı ıslah yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.
- (5) Çalışmada 3 boyutlu analizler sonucunda hazırlanan risk modeli dikkate alındığında, tüm şevde kaya temizliği yapıldıktan sonra, 100 kJ'dan düşük blok enerjisine sahip alanlarda "güçlendirilmiş çelik ağ", daha yüksek blok enerjisine sahip alanlarda "güçlendirilmiş çelik ağ" ve üzerinde "yüksek kapasiteli halka ağ" sarılması önerilmektedir.

Teşekkür / Katkı belirtme*Acknowledgement*

Yazarlar, insansız hava aracı kullanımı ve katı modelin kurulması sırasındaki katkıları nedeniyle Orman Yüksek Mühendisi Ali İPEK'e ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür eder.

Yazar katkısı*Author contribution*

Arazi çalışmalarında ve insansız hava aracının kullanımında Murat Karahan ve Oğuz Sünnetçi, kaya düşme analizlerin yorumlanmasında Murat Karahan ve Hakan Ersoy, makalenin yazımında Hakan Ersoy, Murat Karahan, Oğuz Sünnetçi ve Arzu Fırat Ersoy katkı sağlamıştır.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder

Kaynaklar*References*

- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gurocak, Z., & Bulut, F. (2015). Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi district (NE Turkey); *J. Afr. Earth Sci.* 106, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.010>
- Alemdağ S., Bostancı H.T., Gacaner E. (2022). GIS-based determination of potential instabilities and source rock areas on the Torul-Kürtün (Gümüşhane) motorway, rockfall, and protection structure analyses; *Bull Eng Geol Env.* 81(1), <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02498-7>
- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gurocak, Z., & Bulut, F. (2015). Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi district (NE Turkey); *J. Afr. Earth Sci.* 106, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.010>
- Erkan, O. (2010). *Kürtün Barajı (Kürtün-Gümüşhane) göl alanı sol yamacındaki heyelanlı alanın mühendislik jeolojisi açısından incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Ersoy, H., Kaya, A., Angın, Z., & Dağ, S. (2020) 2D and 3D numerical simulations of a reinforced landslide: A case study in NE Turkey. *J Earth Syst Sci.* 129(1):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1343-y>
- Gacaner, E. (2019). *Torul-Kürtün (Gümüşhane) karayolu kaya şev duraysızlıklarının CBS tabanlı olarak belirlenmesi ve iki boyutlu kaya düşme modellemesi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Kara, R.T. (2020). *Üç boyutlu kaya düşme analizleri iler olası tehlike haritası üretilmesi ve önlem yapıları tasarımı: Gümüşhane kent merkezi örneği* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Karahan, M., Ersoy, H., & Akgun, A.M. (2020). A 3D numerical simulation-based methodology for assessment of landslide-generated impulse waves: a case study of the Tersun Dam reservoir (NE Turkey). *Landslides* 17, 2777–2794. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01440-4>
- Kul Yahşi, B., & Ersoy, H. (2018). Site characterization and evaluation of the stability of the Yesilyurt Landslide (Trabzon, NE Turkey) using back analysis method. *J. Geophys. Eng.* 15(3) 927–937, <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa9c3>.

- Özdoğan, Ş. (2010). *Torul Barajı (Torul-Gümüşhane) göl alanı sağ ve sol sahillerinin duraylılığının mühendislik jeolojisi açısından incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Pehlivan, M. (2008). *Kürtün baraj gölünün sağ sahilindeki Özkürtün (Gümüşhane) beldesinin heyelan analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Peker, S. (1998). *Kürtün Barajı dolusavak güzergahındaki diyorit in jeomekanik özellikleri ve bu güzergahtaki kaya şevlerinin duyarlılığı* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Sünnetci, M.O., Ersoy, H., & Ersoy, A.F. (2021) Numerical and back analysis-based methodology for support design of cut slopes at the Turkish-Georgian Border (NE Turkey). *J. Mt. Sci.* 18, 1678–1695. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6650-x>
- Şirin, A. (1995). *Kürtün-Torul (Gümüşhane) arası karayolu kaya şevlerinin duyarlılık açısından incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].