

Araştırma Makalesi / Research Article

3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri ile Birleşik Kaya İslah Uygulamalarının Değerlendirilmesi: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Örneği

Evaluation of Combined Rock Remediation Applications with 3D Rockfall Analyses: Işıklar (Akçaabat, Trabzon) Case

Murat KARAHAN¹ , Muhammet Oğuz SÜNNETÇİ² , Hakan ERSOY² , Ali İPEK³ 

¹ İnşaat Teknolojisi Bölümü, Trabzon Meslek Yüksekokulu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61300 Trabzon

² Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080 Trabzon

³ İpek Ormancılık ve Mühendislik Hizmetleri, Ortahisar, 61040 Trabzon

Geliş (Received): 04.08.2024 / Düzeltme (Revised): 29.09.2024/ Kabul (Accepted): 04.12.024

ÖZ

Bu çalışmada Trabzon İli Akçaabat İlçesi sınırları içinde meydana gelen kaya duraysızlıkları değerlendirilmiştir. İlk aşamada, analizlere altlık oluşturması için İnsansız Hava Aracı (İHA) ile yapılan uçuşlardan çekilen fotoğraflar kullanılarak çalışma alanı ve çevresinin nokta bulutu verileri üretilmiştir. Sonrasında fotogrametrik yöntemler kullanılarak üretilen bu nokta bulutundan arazinin sayısal yüzey modeli oluşturulmuştur. Çalışma alanı, litolojik özellikler, morfoloji, yerleşim durumu, bitki örtüsü ve alınabilecek önleme ve/veya koruma yöntemleri dikkate alınarak 3 bölgeye ayrılmış, hat etüdü yöntemi ile süreksizlik özellikleri belirlenmiştir. 270/85 duruşlu kaya sevinde, 264/78 duruşlu süreksizlikler boyunca düzlemsel kayma-doğrudan devrilme, 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca kama tipi kayma riski olduğu kinematik analizlerle belirlenmiştir. Yapılan limit denge analizlerinde dinamik durum için en düşük güvenlik sayısı değeri 1,29 olarak hesaplanmış, 3 farklı bölgede de kayma ve devrilme riskinin olmadığı görülmüştür. Ancak, Bölge-1 ve Bölge-2’de arazi çalışmaları sırasında vadi içerisinde gözlenen kaya blokları, bölgede geçmiş dönemde kaya düşmesi olaylarının yaşandığına işaret etmektedir. Öte yandan kaynak zonda bulunan süreksizlikler ile sınırlanmış bloklar kaya düşmesi açısından risk oluşturmaktadır. Kaya kütlelerinin mostra verdiği Bölge-3’te süreksizlikler ile sınırlanmış olan kaya bloklarının ve üst zonlardan gelip bu bölgede duran blokların olası hareketi söz konusudur. Vadi içlerinde biriken bloklar için yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda Bölge-1’deki vadi ağzına 14 metre uzunluğunda, Bölge-2’deki vadi ağzına ise 25 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar yapılarak etkilerinin azaltılacağı belirlenmiştir. Bölge-3’te bulunan riskli blokların hareketini önlemek için ise üst yarıdaki alan için 180 m²’lik çelik ağ kullanılması durumunda, kütle hareketi riskini minimuma indirgeyeceği sonucuna varılmıştır. Böylece çalışma sahasındaki olası duraysızlık riskleri değerlendirilerek farklı ıslah çözümlerleri bir arada efektif bir şekilde kullanılmış olacaktır. Önerilen birleşik kaya ıslah projeleri sayesinde kaya düşme riskleri ortadan kalkacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu kaya düşme analizi, Birleşik kaya ıslahı, Çelik ağ, Kaya düşmesi, RocPro3D, Trabzon

ABSTRACT

In this study, rock instabilities occurring within the boundaries of Akçaabat district in Trabzon province were evaluated. In the first stage, point cloud data for the study area and surroundings were generated using photographs

taken by unmanned aerial vehicle (UAV) flights as a basis for the analysis. Then, a digital terrain model of the area was created from this point cloud using photogrammetric methods. The study area was divided into 3 regions considering lithological features, morphology, settlement status, vegetation cover and prevention and/or protection methods that can be implemented, and discontinuity characteristics were determined by the line survey method. In the kinematic analysis, there was a risk of planar sliding-direct overturning along discontinuities of the rock slope 270/85 and discontinuities of the rock slope 264/78, while wedge-type sliding was a risk along the intersection line of the discontinuities of rock slope 213/71 and 324/68. In the limit equilibrium analyses, the lowest safety factor value for the dynamic case was calculated to be 1.29, and there was no risk of sliding and overturning in 3 different zones. However, the rock blocks observed in the valley during field studies in Zone 1 and Zone 2 indicate that rockfall events have occurred in the region in the past. The blocks bounded by discontinuities in the source zone represent a rockfall hazard. In zone 3, where the rock mass is exposed, there is possible movement of rock blocks bounded by discontinuities and blocks coming from the upper zones and standing in this zone. As a result of the 3D rockfall analyses carried out for blocks accumulated in the valley interior; their effects could be reduced by the construction of a 14-metre long curtain wall at the mouth of the valley in Zone 1 and a 25-metre long and 3-metre high curtain wall at the mouth of the valley in Zone 2. To prevent the movement of the at-risk blocks in Zone 3, it was concluded that the risk of mass movement could be minimised by using a 180 m² steel mesh for the upper half of the area. Thus, by assessing the potential instability risks in the study area, different reclamation solutions will be used together effectively. Rockfall risks will be eliminated by the proposed combined rockfill projects.

Keywords: 3D Rockfall Analysis, Unified Rock Rehabilitation, Steel Mesh, Rockfall, RocPro3D, Trabzon

GİRİŞ

İnsan yaşamını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyerek toplumun sosyo-ekonomik yapısını ve kültürel faaliyetlerini aksatan, can ve mal kayıplarına neden olan, yerel imkân ve kabiliyetlerle engellenmesi ve etkilerinin azaltılması çok mümkün olmayan doğa olayları “doğa kaynaklı afet” olarak tanımlanmaktadır (URL-1) Dünya ölçeğinde meydana gelen doğa kaynaklı afetlerin insan yaşamına olan etkileri geçmişten günümüze kadar sürekli artmış, bu artış son 200 yılda 4 kata ulaşmıştır.

Geçmişten günümüze kadar, meteorolojik kökenli afetler içinde en fazla kuraklık ve taşkınlar, meteorolojik olmayan afetlerin içinde ise depremler can ve mal kaybına neden olmuş sadece 1994 ile 2022 yılları arasında küresel ölçekte meydana gelen 7000’den fazla doğa kaynaklı afette yaklaşık 1.7 milyon insan hayatını kaybetmiştir (URL-2). Türkiye, jeolojik, morfolojik ve iklimsel özellikleri dikkate alındığında bir afet ülkesi olarak bilinmektedir.

Ülkede taşkın, erozyon, çölleşme ve çığ gibi afetler meteorolojik kökenli afetlerin başında gelirken, deprem, heyelan, kaya düşmesi gibi afetler ise meteorolojik olmayan afetlerin en önemlileridir (Şaraldı, 2015). Son 50 yıldır meydana gelen doğa kaynaklı afet dağılımına bakıldığında heyelanlar ve kaya düşmeleri %45’lik oranla ilk sırada, depremler %18’lik oranla ikinci sırada, taşkınlar %14’lük oranla üçüncü sırada yer almaktadır. Sadece 2019 yılında ülke genelinde taşkın ve heyelanların diğer afetler içerisindeki oranı ise %70’lere ulaşmıştır. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi, oluşma sıklığı bakımından heyelanların, etki alanı bakımından ise taşkınların en sık görüldüğü ve buna bağlı olarak can ve mal kaybının en fazla olduğu bir bölgedir. Ülke istatistiklerinden farklı olarak Doğu Karadeniz Bölgesi’nde doğa kaynaklı afetler içinde taşkın, heyelan ve kaya düşmeleri %95’lik oranla ilk sırada yer almaktadır (Gökçe vd., 2008).

Trabzon ili son 50 yıl içerisinde olmuş veya olması muhtemel kaya düşmesi sebebiyle

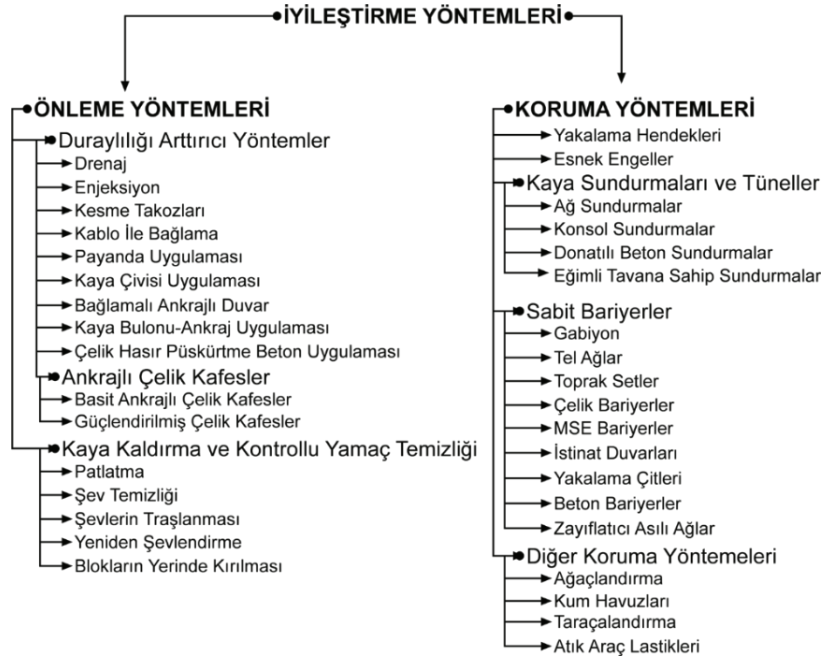
taşınmasına karar verilen konut sayısının en fazla olduğu ildir (URL-4). İilde kaya düşmesi olaylarının sık olarak yaşanmasında bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri, bitki örtüsü, iklim ve buna bağlı olarak kayaların ayrışması önemli rol oynamaktadır. İilde kaya düşme olaylarının ilkbahar sonları ve yaz başları ile sonbahar dönemlerinde meydana gelmesi bu olaylar üzerinde iklimin çok önemli etkileri olduğunu göstermektedir (Akgün, 2011; Dağ vd., 2011; Alemdağ vd., 2019; Ersoy vd., 2019; Ersoy vd., 2020; Karahan vd., 2020; Kaya ve Midilli, 2020). Özellikle ani ve şiddetli yağışlar sonucunda kaya kütlesi içindeki süreksizliklere nüfus eden su, donma ve çözülmenin etkisi ile süreksizlerin büyümesine ve/veya yeni süreksizliklerin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrışmayı arttıran bu süreç ise kaya düşme olaylarının bu denli sık yaşanmasının asıl sebebidir (Kadioğlu, 2005).

Kaya düşme olaylarında gerek can gerekse de mal kaybını önlemek için ilk aşamada riskli alanların tespit edilmesi sonrasında önleme ve koruma projeleri üretilmesi gerekmektedir. Proje aşamasından önce uygulanacak analizlerde öncelikli olarak kütle hareketine neden olacak süreksizliklerin özelliklerinin belirlenmesi, yenilme türünün tespit edilmesi ve hareket mekanizmasının doğru bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir (Altay, 2015; San, 2017; Çapar, 2018; Keskin, 2019; Koçyiğit, 2019; Buz, 2019; Kırbaş, 2019; Alizadeh, 2021; Arslantürk, 2022; Caymaz, 2023). Farklı tip kütle hareketlerinin oluşum mekanizmaları farklı olacağı için, önerilecek önlemlerin başarısı da yenilme türünün doğru olarak tespit edilmesine bağlıdır. Doğal yamaç veya kazı şevinde meydana gelebilecek kütle hareketi türünün

kaya düşmesi olacağı tespit edildikten sonra hareket etmesi muhtemel blok veya blokların izleyeceği güzergâh, farklı güzergâhlar boyunca hareket edecek blokların kinetik enerjisi, sıçrama yüksekliği, çarpma hızı ve önerilen ıslah yöntemlerinin uygun olup olmadığı 2 ve 3 boyutlu yaklaşımlarla analiz edilmelidir (Akın vd., 2019). Buna ek olarak, analizlerde kullanılmak üzere gerekli jeolojik verilerin temininde, uygulanacak yöntem seçilmesinde ve uygun ıslah yönteminin tasarlanmasında arazi ve laboratuvar çalışmaları oldukça önemli yer tutmaktadır. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri, kaya kütlesindeki süreksizlik özellikleri, kütle hareketi nedenleri, hareket türleri, düşen/düşmesi muhtemel blokların boyutları, hareket eden blokların sıçrama yükseklikleri ve izledikleri yollar tespit edilebilmektedir (Polat vd., 2020; Wang vd., 2020)

Kaya ıslah projelerinde aktif ve/veya pasif yöntemler uygulanmaktadır (Lambert ve Bourrier, 2013). Aktif yöntemde bloğun harekete geçmesini önlemek amaçlanırken pasif yöntemde ise harekete geçen bloğu kontrollü şekilde durdurmak veya tehlikesiz alana nakletmek amaçlanmaktadır (Grosic vd., 2009). Bu nedenle aktif yöntemler önleme yöntemi, pasif yöntemler koruma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Önleme ve koruma yöntemleri ayrı ayrı uygulandığı gibi bütünleşik bir şekilde de uygulanabilmektedir (Volkwein, 2011). Şekil 1’de kaya düşmesi önleme ve koruma yöntemleri detaylı olarak verilmiştir.

Bu çalışmada Türkiye’de kaya düşme olaylarının sıklıkla yaşandığı Trabzon’un Akçaabat ilçesinde yer alan Işıklar Mahallesinde meydana gelen kaya düşme olayları incelenmiştir.



Şekil 1. Kaya düşmelerinde iyileştirme (önleme ve koruma) yöntemleri.

Figure 1. Remediation (prevention and protection) methods for rock falls.

Çalışma kapsamında kaya düşme olaylarının etkilerini en aza indirmek için; (1) arazi gözlemleri ve ölçümleri (hat etüdü) yapılmış, (2) süreksizlik özellikleri belirlenmiş, (3) laboratuvar deneyleri ile kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş, (4) insansız hava aracından alınan görüntülerden fotogrametrik yöntem ile nokta bulutu oluşturulmuş ve haritalama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin bir bütün halinde değerlendirilmesi sonucunda; (1) kaynak zonları tespit edilmiş, (2) meydana gelmiş ve gelebilecek kaya duraysızlık türleri arazide belirlenmiş, (3) kinematik analiz ve limit denge analizleri uygulanmış, (4) 3 boyutlu kaya düşme analizleri yapılmış (5) yapılan tüm çalışmalar sonucunda bölge için en uygun önleme ve koruma yöntemleri tespit edilmiş ve projelendirilmiştir.

ÇALIŞMA ALANININ KONUMU VE JEOLJİSİ

Doğu Karadeniz Bölgesi'nde gelişen kaya düşmeleri en az heyelanlar kadar etkili olmaktadır. Özellikle Trabzon ilinde ilkbahar ve kış mevsiminde görülen kaya düşme olayları lokal olarak can ve mal güvenliği açısından büyük riskler oluşturmaktadır (Gelişli vd., 2011).

Bu çalışma kapsamında da Türkiye'de kaya düşme olaylarının en sık meydana geldiği Trabzon ili pilot bölge olarak seçilmiştir. Akçaabat ilçesi sınırları içerisinde bulunan çalışma alanı Trabzon il merkezine 33 km, Düzköy ilçe merkezine ise 5 km uzaklıkta bulunmaktadır. Çalışma alanında mevsimsel koşullara bağlı olarak yerel kaya düşmeleri, moloz akmaları meydana gelmiş ve halen meydana gelmektedir. Çalışma sahası dik bir topoğrafyaya sahip olup bu haliyle Doğu

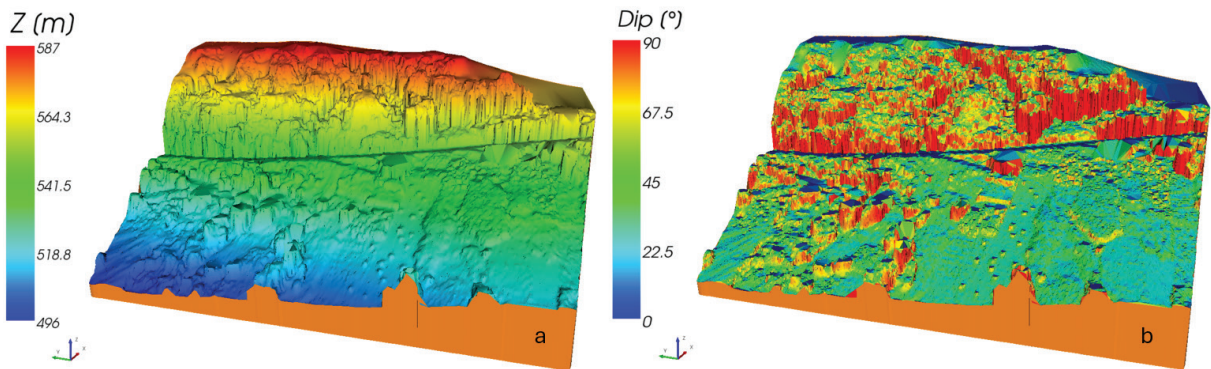
Karadeniz topoğrafyasının tipik özelliklerini taşımaktadır (Şekil 2).

Bölgede genel olarak volkanik birimler hâkimdir (Şekil 3). Kaya düşme olaylarının sık olarak yaşandığı alanda kırıntılı çökellerle başlayıp üst zonlara doğru volkanik karakterde olan volkanotortul istif yüzeylenmektedir. Birim, ilk olarak Güven (1993) tarafından Kabaköy Formasyonu olarak tanımlanmış olup kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn arakatlı andezit, bazalt ve piroklastitlerden oluşmaktadır. Birim çalışma alanında sahile kadar (yaklaşık 20 km) boyunca geniş yayılımlar göstermektedir. Genellikle koyu renkli olan volkaniklerin tabanında yer alan sarımsı renkli bol fosilli tortul kayalar bir kılavuz seviye niteliğindedir. Bu seviye sayesinde formasyonun yaşı Erken-Orta Eosen olarak belirlenmiştir (Güven, 1993). Ancak bu volkanitlerin yaşının daha genç olduğu (Orta Eosen-Neojen) radyometrik yaş tayinleriyle detaylı olarak ortaya koyulmuştur (Aydın, 2003; Arslan ve Aslan, 2006). Çalışma alanında kaya düşme olayının meydana geldiği şev yüzeylerinde yapılan gözlemler kaya kütlelerinin genel olarak bazalt, andezit ve piroklastitlerden oluştuğunu

göstermektedir. Çalışma alanı ve çevresinin, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Türkiye Deprem Tehlikesi Haritasındaki konumu dikkate alındığında, maksimum yer ivmesi değerinin (PGA) 0.201g olduğu görülmüştür (URL-3).

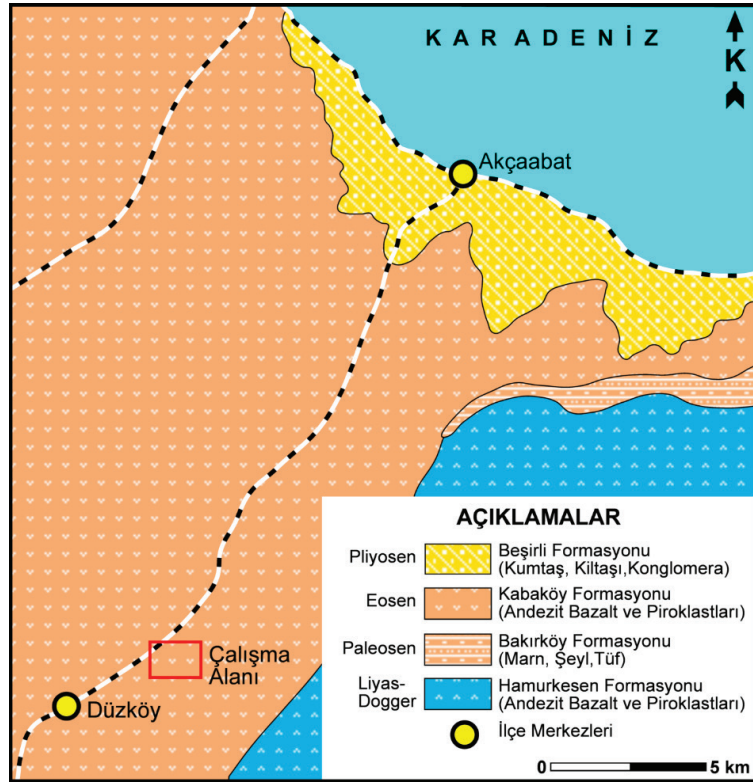
SAYISAL YÜZEY VE YÜKSEKLİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Bu çalışma kapsamında gerek dik yamaçların gerekse yoğun bitki örtüsünün varlığı nedeniyle analizlerde ve projelendirme aşamasında kullanılmak üzere gerekli olan haritaların topoğrafik çalışmalar yardımıyla üretilmesi oldukça güç olduğu için haritalandırma işlemlerinde fotogrametrik yöntemler tercih edilmiştir. Fotogrametrik yöntemde otonom uçuş yapabilen DJI Phantom 4 Pro insansız hava aracı kullanılmıştır. İnsansız hava aracı yardımıyla 100 metre yükseklikte %80 bindirme oranına sahip olan 52 adet oblik hava fotoğrafı çekilmiş, bu fotoğraflar Agisoft PhotoScan 2.1.0 (2023) yazılımı ile işlenerek çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü (2,65 cm/pix) ortofoto görüntüsü, sayısal yüzey modeli ve nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 4a ve b).



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresinin yükseklik (a) ve eğim (b) haritaları

Figure 2. Elevation (a) and slope (b) maps of the study area and its surroundings



Şekil 3. Çalışma sahası ve çevresinin jeoloji haritası (Güven, 1993).

Figure 3. Geological map of the study area and its surroundings (Güven, 1993).

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ ÇALIŞMALARI

Akçaabat ilçesi sınırları içerisinde bulunan Işıklar mevkiindeki kaya şev duraysızlıkları için önleme ve koruma yöntemlerinin tespiti amacıyla arazide kaya kütlelerinin içerdiği eklemlerin mühendislik özellikleri ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre belirlenmiştir. Ayrıca jeolojik (litoloji) ve morfolojik özellikler, yerleşim durumu, bitki örtüsü, alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemi dikkate alınmış ve riskli bölge jeoteknik birimlere ayrılmıştır. Bu birimler dikkate alınarak hat etüdü yöntemi ile süreksizlik özellikleri tayin edilmiş, araziden elde edilen örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak kayaların indeks ve dayanım özellikleri belirlenmiştir.

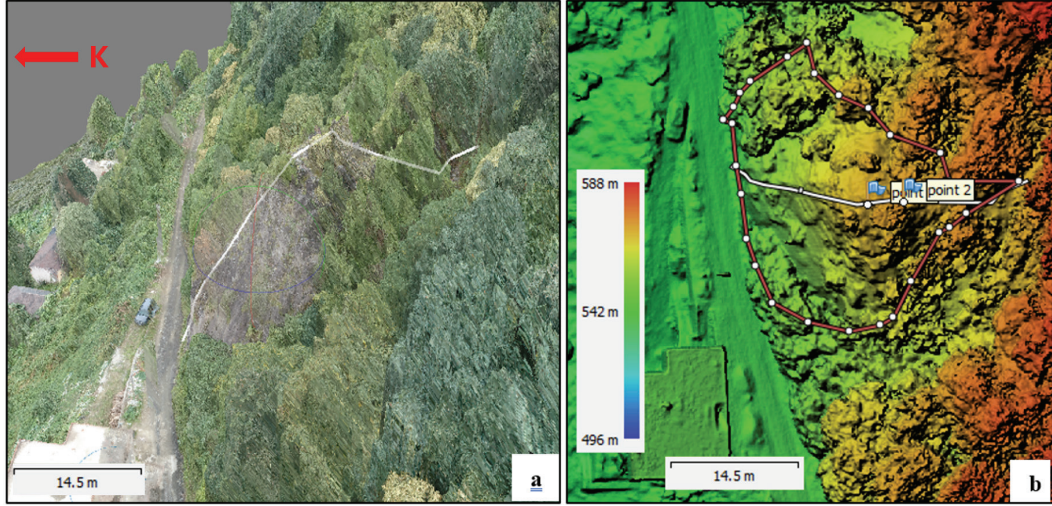
Yapılan çalışmalar ve elde edilen verilen sonucunda; yamaçta stabilite analizleri gerçekleştirilmiş, kaya düşme potansiyeli değerlendirilerek çeşitli önleme ve koruma yöntemleri önerilmiştir.

Jeoteknik Birimlerin/Bölgelerin Tanımlanması

Mühendislik jeolojisi çalışmalarında, 1/5000-1/10000 ölçekleri arasında tanımlanabilen, mineralojik bileşim ve yapısal anlamda homojen, ancak jeoteknik özellikler açısından uniform olmayan birimler “*litolojik tür*” olarak ifade edilir. Bu sınıflamada, birimin jeoteknik özellikleri için gerçek anlamda ve temsil edici ortalama değerlerin verilmesi mümkün olmayıp, mühendislik özellikleri belirli aralıkları temsil

eden değerler şeklinde verilebilir. 1/5000 veya daha büyük ölçeklerde tanımlanabilen ve fiziksel anlamda en yüksek homojenlik derecesine sahip

birimler ise “jeoteknik birim” olarak ifade edilir (IAEG, 1976; Dearman vd., 1987).



Şekil 4. (a) Kaya kütleinin bulunduğu alana ait ortofoto ve (b) yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli.

Figure 4. (a) Orthophoto and (b) high-resolution digital surface model of the area where the rock mass is located.



Şekil 5. Çalışma alanının Dearman vd. (1987) sınıflama sistemine göre 3 farklı jeoteknik bölgeye ayrılması.

Figure 5. Division of the study area into 3 different geotechnical zones according to the classification system of Dearman et al. (1987).

Bu çalışmada tüm bunlar dikkate alınarak ISRM (1976) tarafından önerilen ve Dearman vd. (1987) tarafından modifiye edilen sınıflama dikkate alınmış ve çalışma alanı Kuzey-Orta ve Güney bölge olmak üzere 3 farklı jeoteknik bölgeye ayrılmıştır (Şekil 5). Bu değerlendirme yapılırken litolojik değişim (1), morfoloji (2), yerleşim durumu (3), bitki örtüsü (4) ve alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemleri (5) dikkate alınmıştır.

Kuzey bölge (Bölge-1)

Bazaltik kaya kütlelerinin kuzeyinde bulunan bölge genel olarak orta derecede ayrılmış, kırıklı ve çatlaklı bir kaya kütlelerinden oluşmaktadır. Eğimi ortalama 50-60 derece arasında değişen kuru bir vadiden oluşan bölgede üst kotlara doğru eğim 80 dereceyi bulmaktadır. Ayrışma ve süreksizliklerin etkisi ile bu bölgede kopan farklı boyuttaki bloklar vadi boyunca yayılmış durumdadır.

Süreksizlikler ve ayrışmanın etkisi ile üst kotlardan kopan 20-30 cm boyutunda kaya parçaları alt kotlarda birikmiş iken, birkaç metre boyutundaki bloklar ise asılı halde durmaktadır. Bu bölgede üst kotlarda askıda duran blokların ve vadi içinde yığılmış olan farklı boyutlardaki kaya parçalarının yağışa ve/veya sismik aktiviteye bağlı olarak vadi boyunca hareket etmesi söz konusudur. Böyle bir hareket sonucu bölgedeki yapılar için tehlikeli bir durum oluşturmaktadır (Şekil 6a).

Güney Bölge (Bölge-2)

Bazaltik kaya kütlelerinin güney kesiminde bulunan vadinin oluşturduğu bölgede santimetre boyutundan metre boyutuna kadar farklı boyutlarda kaya parçaları ve blokları bulunmaktadır. Kaynak bölgesinden kopan bloklar vadi boyunca hareket ederek vadiyi

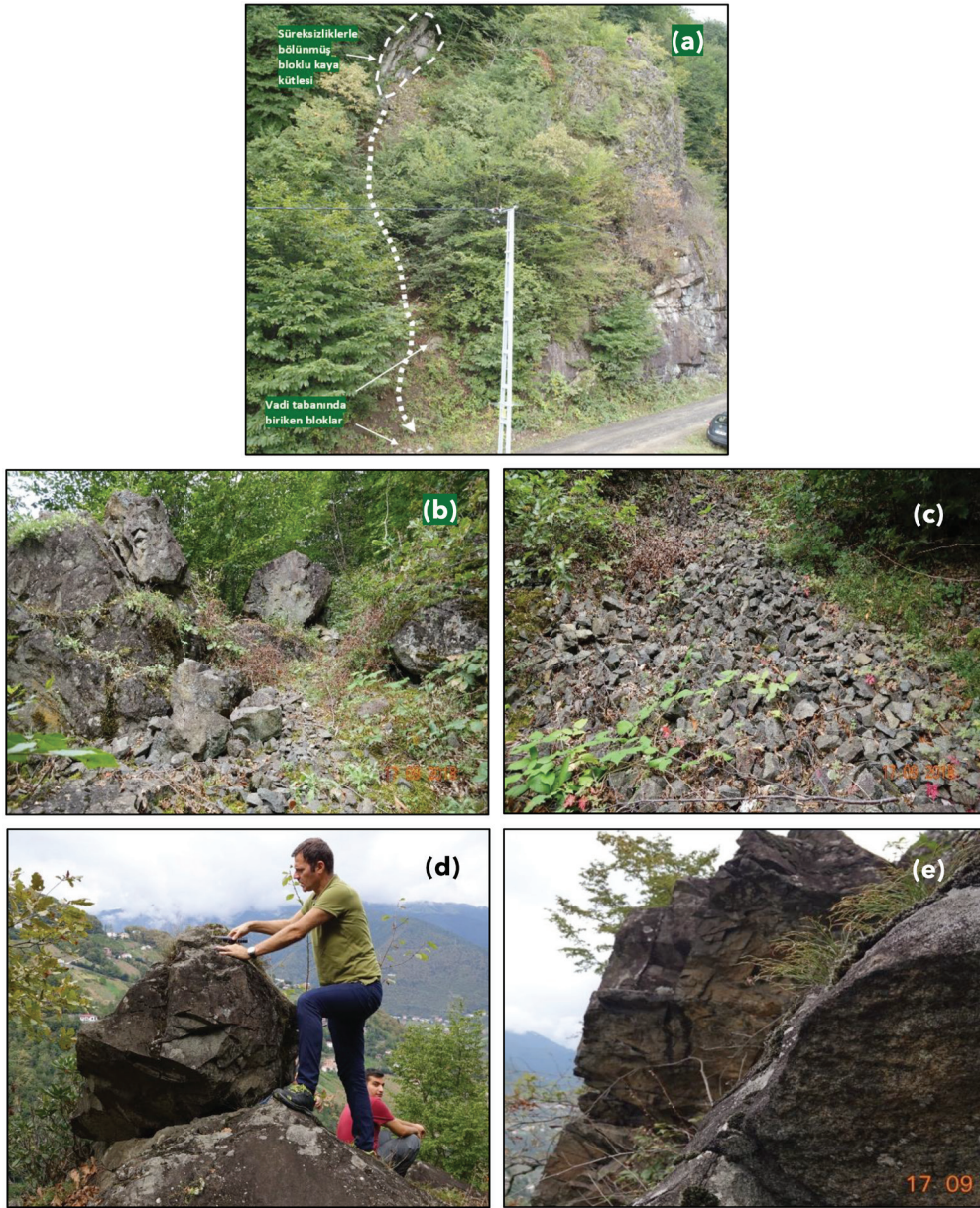
doldurmuştur. Vadiyi dolduran bloklar daha küçük boyutlu iken kaynak bölgede hareket etmemiş serbest halde birkaç metre boyutunda bloklar bulunmaktadır. Aşırı yağışlara bağlı olarak üst zonlardaki serbest blokların yuvarlanma, vadi içindeki kaya parçalarının ise moloz akıntısı şeklinde hareketi söz konusudur. Serbest blokların ve vadi içindeki kaya parçalarının olası hareketi yamaç altındaki evlerde büyük ölçekli hasarlara neden olabilir (Şekil 6b ve c).

Orta bölge (Bölge-3)

Dört ayrı süreksizlik takımı içeren kaya kütleleri bazalttan oluşmaktadır. Yüksekliği maksimum 30 metre olan kaya kütleleri, yatayda kuzey yönünde 30 m, doğu yönünde 40 metre takip edilebilmektedir. Özellikle ilk 15 metreye kadar masif bir yapı sunan kaya kütleleri 15 metreden sonra kırıklı bir yapı sunmaktadır. Üst bölgelerde bulunan bloklar süreksizlikler boyunca ayrılmış durumdadır. Bu bölgede 270/85 duruşlu kaya şevi boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme riskleri mevcut iken şevin tepesinde bulunan üst zonlardan yuvarlanıp durmuş serbest bloklarda ise düşme riski mevcuttur (Şekil 6d ve e). Kuzey ve Güney Bölgede bulunan vadi içlerindeki bitki örtüsü daha çok kaya düşmeleri üzerinde çok önemli bir etkisi olmayan orman gülünden oluşurken bölgenin üst zonlarında kalın gövdeli ağaçlar bulunmaktadır.

Kaya Kütleleri ve Kaya Malzemesinin Özellikleri

Çalışma kapsamında araziden alınan kaya bloklarından ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre NX çaplı karot örnekleri (boy/çap oranı 2.5) temin edilmiş, örnekler üzerinde yoğunluk, nokta yük dayanımı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır. Kaya malzemesinin indeks ve dayanım özelliklerine ait değerler ise Çizelge 1'de özetlenmiştir.



Şekil 6. (a) Bölge-1'deki çok kırıklı kaya kütlesi, (b) Bölge 2'de üst kesimlerdeki 1-2 m çapındaki bloklar, (c) alt kesimde birikmiş kaya parçaları ve (d, e) Bölge 3'ün üst kesimlerinde serbest halde bulunan bloklar.

Figure 6. (a) Very fractured rock mass in Zone-1, (b) 1-2 m diameter blocks in the upper parts of Zone-2, (c) accumulated rock fragments in the lower parts and (d, e) free blocks in the upper parts of Zone-3.

Karahan, Sünnetçi, Ersoy, İpek

Çizelge 1. Kaya malzemesinin indeks ve dayanım özellikleri.

Table 1. Index and strength properties of the rock material.

Örnek No	Yoğunluk (gr/cm ³)	BHA* (kN/m ³)	TESD** (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)
1	2.55	25.01	109	4.1
2	2.69	26.39	115	4.7
3	2.65	26.00	110	4.5
4	2.60	25.51	95	3.8
5	2.58	23.31	88	3.8

* birim hacim ağırlık, **tek eksenli sıkışma dayanımı

Süreksizliklerin, dolayısıyla kaya kütlelerinin özellikleriyle ilgili veri toplanmasında istatistiksel anlamda en tatmin edici sonuçların alındığı yöntem, hat etüdü yöntemidir (ISRM, 1978). Geniş bir alanda kaya kütlelerinin incelenmesine ve süreksizliklerden doğrudan ölçüm alınmasına olanak kılan bu yöntemin ilk olarak süreksizlik ara uzaklığı ve devamlılığına bağlı olarak uygun uzunlukta mostra yüzeyleri seçilmiş, ölçümler 270/85 duruşlu kaya kütleleri üzerinde açılan tek hat üzerinde yapılmış, ölçümlerde süreksizlik aralıkları ve süreksizliklerin eğim/eğim yönleri tespit edilmiştir. Çalışmada toplam 120 adet süreksizlik ölçümü yapılmış, ana eklem setlerinin yönelimini belirlemek için DIPS 8.023 (Rocscience, 2023) programı kullanılmıştır (Şekil 7). Süreksizlik türleri ve duruşları ise Çizelge 2’de özetlenmiştir. Kuzey ve Güney bölgede kaya kütleleri yüzeylenme vermediği için bu iki bölgede kinematik analiz yapılmamıştır. Sadece orta bölgede yüzeyleme veren kaya kütlelerinde kinematik analiz yapılmıştır. Kuzey ve güney bölgelerde üst kottardan yuvarlanıp gelen ve yamaçtan kopup vadi içinde biriken bloklar risk teşkil etmektedir.

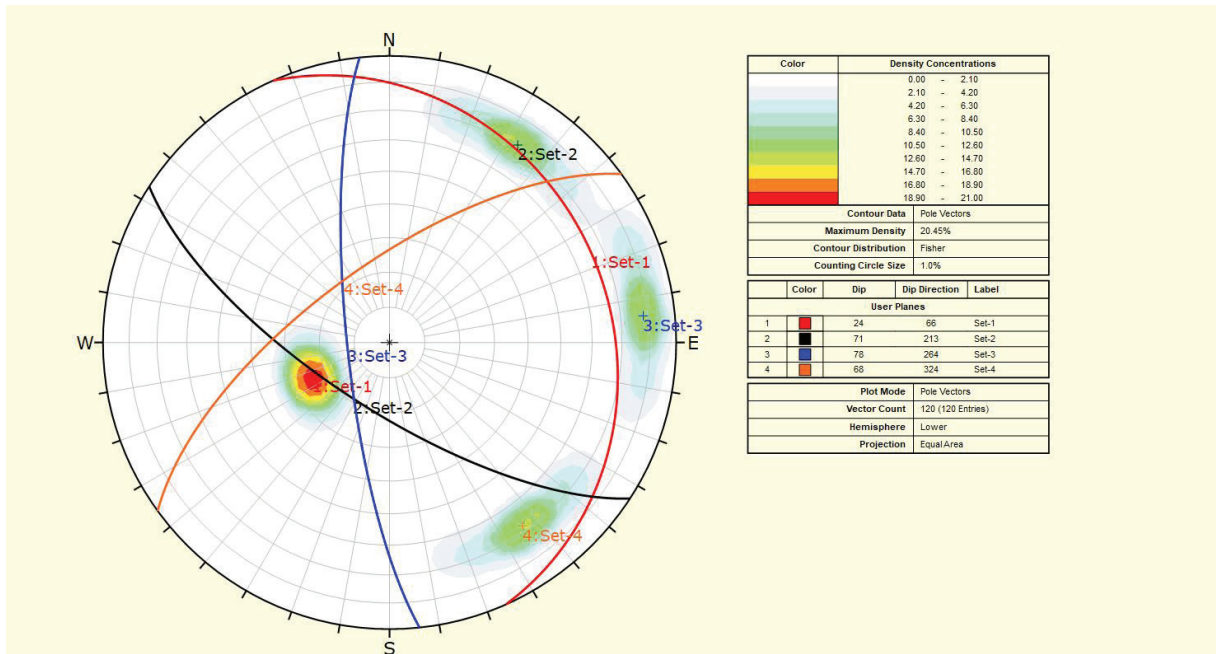
Şev Stabilite Analizleri

Kaya şevlerinin ekonomik ve güvenli bir şekilde projelendirilebilmesi için şevde meydana gelmesi muhtemel hareket türlerinin ve harekete neden olacak faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Olası hareket türleri ve faktörler dikkate alınarak kaya şevi tasarlanır. Tasarlanan kaya şevinde olası riskler için gerekli koruma ve/veya önleme yöntemlerinin belirlenmesi de gerekmektedir. Bunlar dikkate alınarak kaya şevi tasarımlarında; kinematik analiz, limit denge ve nümerik analiz yöntemleri gerçekleştirilmiştir.

Kinematik analizler

Kinematik analiz yöntemi, süreksizliklerin kontrolünde bir duraylılık probleminin denetlendiği bir yöntemdir. Kaya kütlelerinde duraylı ve duraysız olabilecek şevlerin ayırt edilmesi amacıyla, ayrıntılı analizlere başlanmadan önce yararlanılan pratik bir yöntemdir.

Bu çalışma kapsamında yaklaşık 270/85 duruşlu kaya şevi boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma, bükülme devrilmesi ve doğrudan devrilme türü hareketleri için kinematik analizler yapılmıştır.



Şekil 7. Volkanik kaya kütesine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) ve ana süreksizlik takımlarının konumları.

Figure 7. Contour diagram for the volcanic rock mass (lower hemisphere) and orientation of main discontinuity sets.

Çizelge 2. 270/85 duruşlu kaya kütesinde ölçülen süreksizlik takımlarının özellikleri.

Table 2. Characteristics of discontinuity sets measured in the 270/85 oriented rock mass.

Takım No	Süreksizlik Türü	Eğim Yönü Açısı (derece)	Eğim Açısı (derece)
1	Ekleme	66	24
2	Ekleme	213	71
3	Ekleme	264	78
4	Ekleme	324	68

Analizlerde aşağıda belirtilen iki aşama izlenmiştir; (1) Stereografik izdüşüm tekniğiyle şev büyük daresi ile süreksizliklerin büyük daireleri ve kutup noktaları (yönelim) stereonete işlenmiş, (2) yönelimler ve içsel sürtünme açısı saptanarak duraysızlık türü belirlenmiştir.

270/85 duruşlu kaya şevinde yapılan hat etüdü sonucunda tespit edilen 4 adet süreksizlik seti için kinematik analiz yapılmıştır. Şev

boyunca düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme analizleri yapılmıştır. Kinematik analizlerde sadece, süreksizliklerin yönelimi, şev yönelimi, süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açısı dikkate alınır. Bunların dışında kalan; kohezyon, dış yükler, yeraltısuyu koşulları, şev geometrisi, kayan kütlelerin ağırlığı ve dinamik yükler gibi faktörler ise gözardı edilir. Bu nedenle, kinematik analiz yöntemi daha çok bir ön değerlendirme yöntemi olarak kabul edilir.

Süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesinde kullanılan eğrisel Barton-Bandis ölçütü için gerekli olan rezidüel sürtünme açısı Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1). Artık sürtünme açısının hesaplanmasında araziden alınan bloklar üzerinde yapılan tilt deneyinden elde edilen temel sürtünme açısı, ayrışma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri ve ayrışmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değerleri kullanılmıştır.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(\tau/R) \quad (1)$$

ϕ_r = Rezidüel Sürtünme açısı

ϕ_b = Temel Sürtünme açısı

r = ayrışma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri

R = ayrışmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değerleri

$$\phi_r = (32-20)+20(35/47) = 27 \text{ derece}$$

Kinematik analiz ve limit denge analizlerinde kullanılan kohezyon ve içsel sürtünme açısı Barton-Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 2).

$$\tau = \sigma_n \tan[\phi_r + JRC \log_{10}(JCS / \sigma_n)] \quad (2)$$

τ = Makaslama dayanımı (MPa)

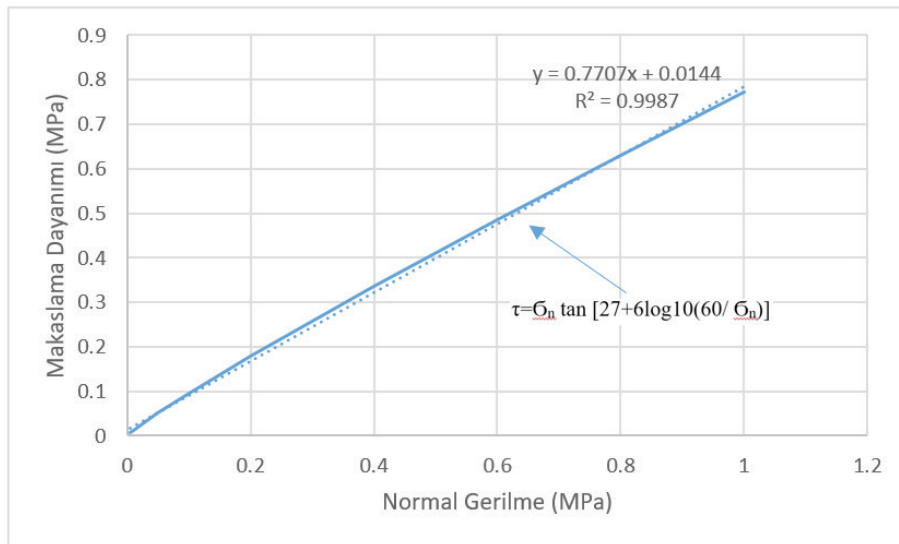
σ_n = Normal gerilme (MPa)

ϕ_r = Rezidüel sürtünme açısı (27)

JRC = Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı (6)

JCS = Süreksizlik yüzeyinin dayanımı (60 MPa)

Barton ve Bandis (1990) yenilme ölçütü kullanılarak normal gerilmelere karşılık makaslama dayanımları hesaplanmıştır (Şekil 8). Hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan grafikten kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplanmıştır.



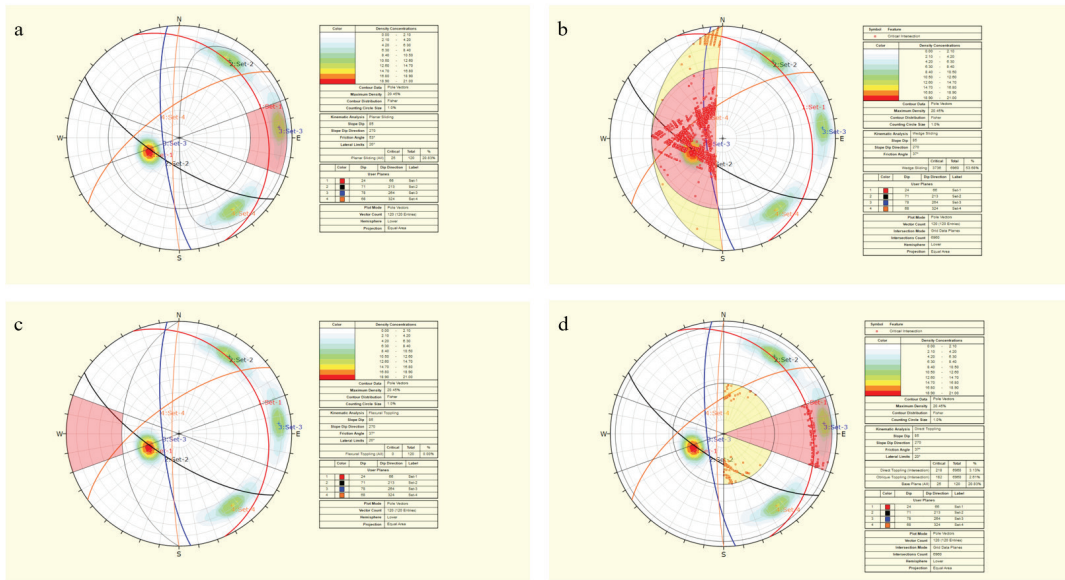
Şekil 8. Bazalt için görgül yenilme ölçütüne göre hazırlanmış süreksizlik yenilme zarfı.

Figure 8. Discontinuity failure envelope prepared according to empirical failure criteria for basalt.

Yapılan hesaplamalar sonucunda kohezyon 14.4 Kpa ve içsel sürtünme açısı ise 37 derece olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler kinematik ve limit denge analizlerinde kullanılmıştır.

Kinematik inceleme ile 264/78 duruşlu süreksizliğin kontrolünde düzlemsel kayma olasılığının (Şekil 9a), 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin kontrolünde kama tipi kayma olasılığının (Şekil 9b) olduğu belirlenmiştir. Düzlemsel ve kama tipi kayma riskinin

bulunduğu şevde süreksizlik konumları dikkate alınarak bükülme ve direk devrilme analizi de gerçekleştirilmiştir (Şekil 9c). Şekil 9c'de görülen ve devrilme riski taşıyan taralı alana hiçbir süreksizliğin kutup noktası düşmediği için bu şevde bükülme devrilmesi riskinin olmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 9d incelendiğinde doğrudan devrilme riskinin de olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3'te 270/85 duruşlu kaya şevi için yapılan kinematik analiz sonuçları özetlenmiştir.



Şekil 9. 270/85 duruşlu kaya şevinde düzlemsel kayma (a), kama tipi kayma (b), bükülme devrilmesi (c) ve doğrudan devrilme kinematik analizi (d).

Figure 9. Planar failure (a), wedge failure (b), flexural toppling (c), and direct toppling (d) kinematic analyses of the 270/85 rock slope.

Çizelge 4. 270/85 duruşlu kaya kütlelerinde yapılan kinematik analiz sonuçları.

Table 4. Results of kinematic analyses on the 270/85 oriented rock mass.

Takım No	Süreksizlik Türü	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma	Bükülme Devrilmesi	Doğrudan Devrilme
1	Eklem	66/24°	-	-	-	-
3	Eklem	264/78°	Riskli	-	-	Riskli
2	Eklem	213/71°	-	Riskli	-	-
4	Eklem	324/68°	-	-	-	-

Limit denge analizleri

Kinematik analizleri sonucunda kaya kütlelerinde düzlemsel kayma ve kama tipi kayma olasılığının bulunduğu alanlarda limit denge analizleri yapılarak farklı koşullar duraylılık değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalardan elde edilen sonuç (güvenlik katsayısı, F), sadece incelenen yenilme yüzeyi için geçerlidir. Hesaplanan en küçük F, incelenen duraysızlık türü için o şevin güvenlik katsayısı olarak kabul edilir. Bu yöntemler: (1) kayan kütlelerin ağırlığını, (2) süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımını (c , ϕ), (3) gözenek suyu basıncını, (4) şevin geometrisini, (5) yer ivmesini (sismik koşulları), (6) var ise tansiyon çatlağının konumunu ve (7) dış yükleri dikkate alır.

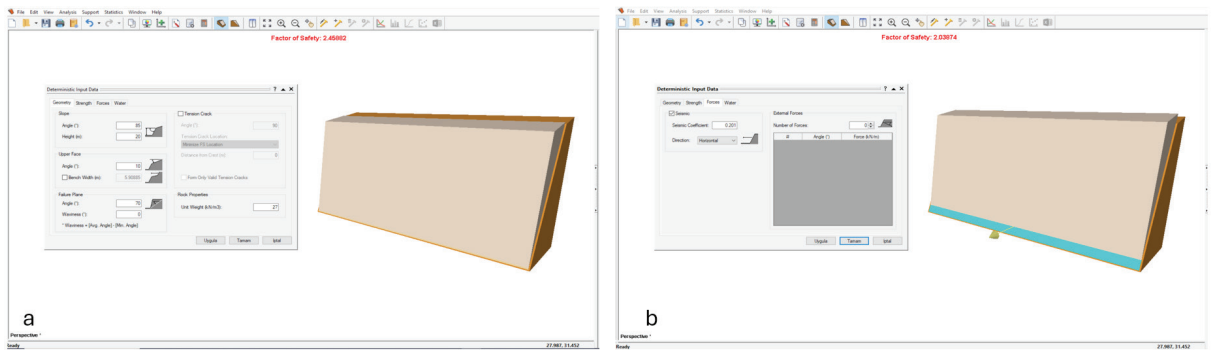
Çalışma kapsamında 264/78 duruşlu süreksizlik düzlemleri boyunca düzlemsel kayma

için ve 213/71 ile 324/68 duruşlu süreksizliklerin ara kesit doğrusu boyunca (271/56) kama tipi kayma için güvenlik sayısı değerleri SWedge 7.017 ve RocPlane 4.010 (Rocscience, 2023) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar depremlili ve depremsiz durumlar için yapılmıştır (Şekil 10a ve b ve 11a ve b). Yağışlı sezonda dikkate alınarak analizlerde boşluk suyu basıncı dikkate alınmıştır. Depremlili durum için maksimum yatay yer ivmesi bileşeni 0.201 g alınmıştır (URL-2). Yapılan hesaplamalar sonucunda kohezyon değeri Limit denge analizlerinde kohezyon 14.4 KPa ve içsel sürtünme açısı ise 37 derece olarak kabul alınmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir. Orta Bölge (Bölge-3) için yapılan limit denge analizlerinde düzlemsel kayma ve kama tipi kayma için riskli durum olmadığı bu bölge için sadece devrilme riskinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Kaya şevindeki ters eğim bunun temel nedenidir.

Çizelge 5. Bölge-2'deki kaya şevi için yapılan limit denge analizi sonuçları.

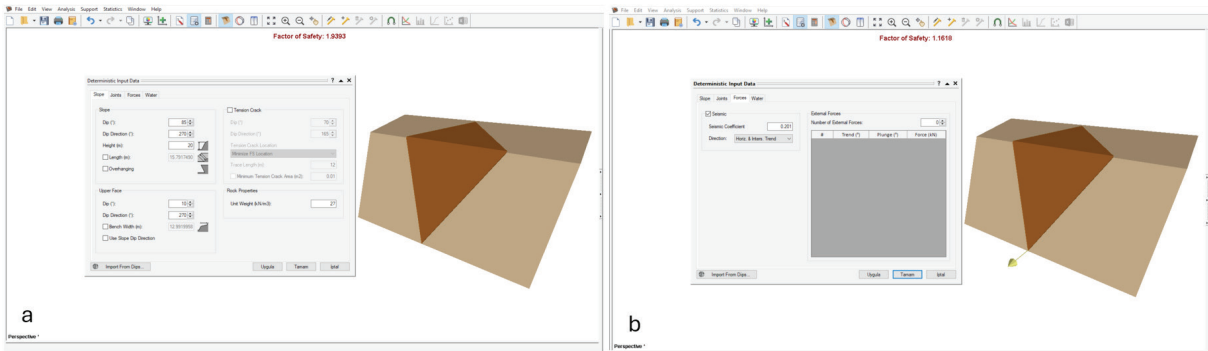
Table 5. Limit equilibrium analysis for the rock slope in Zone-2.

Deprem Durumu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma
Depremsiz	2.45	1.93
Depremlili ve Yağışlı Durum	2.08	1.16



Şekil 10. RocPlane 4.010 (Rocscience Inc, 2023) programında düzlemsel kayma için sismik olmayan (a), sismik ve yağışlı durum için limit denge analizleri (b).

Figure 10. Limit equilibrium analyses for planar failure in RocPlane 4.010 (Rocscience Inc, 2023) software for non-seismic (a), and seismic and rainy conditions (b).



Şekil 11. SWedge 7.017 (Rocscience Inc, 2023) programında kama tipi kayma için sismik olmayan (a), sismik ve yağışlı durum için limit denge analizleri (b).

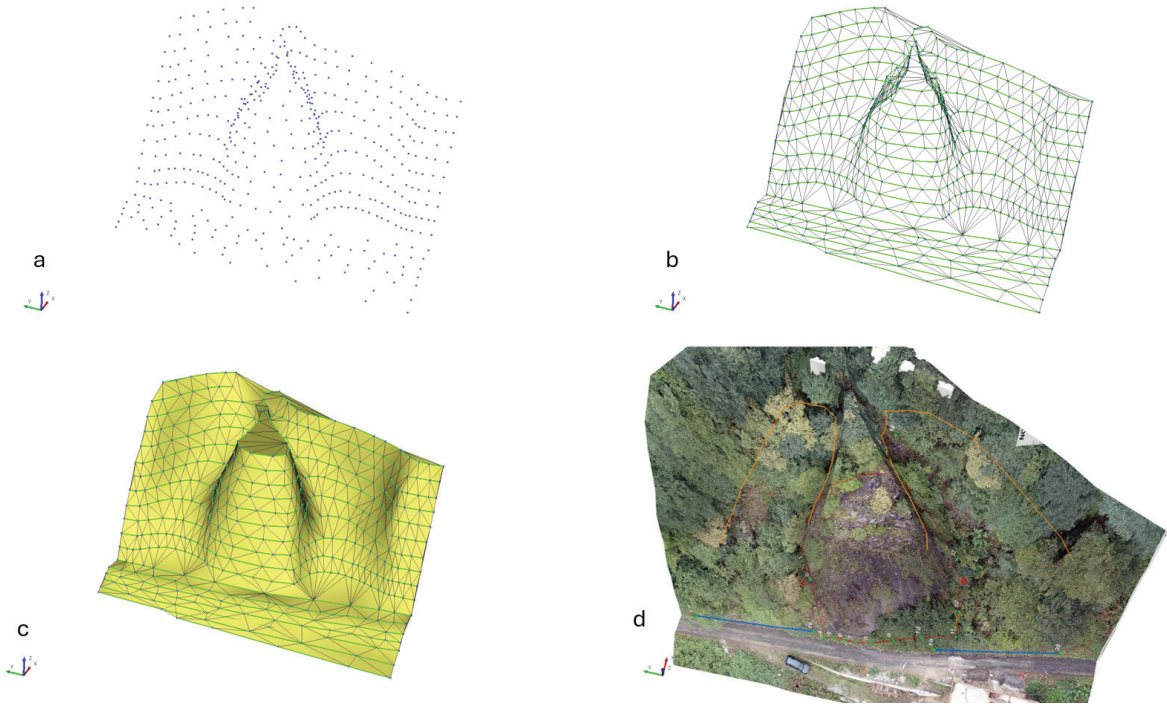
Figure 11. Limit equilibrium analyses for wedge type failure in SWedge 7.017 (Rocscience Inc, 2023) software for non-seismic (a), and seismic and rainy conditions (b).

ÜÇ BOYUTLU KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

Çalışma alanında yamaçlardan kopan ve üst kotlardan yerçekimi etkisi ile yuvarlanıp gelen bloklar Bölge-1 ve Bölge-2'deki vadilerde birikmiş durumdadır. Yamaçlardan kopan, üst kotlardan yuvarlanan ve vadide biriken blokların olası hareketleri yol ve yolun altında bulunan evleri tehdit etmektedir. Çalışma alanının topografik yapısı dikkate alındığında blokların olası hareketinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için koruma yöntemi olarak perde beton kullanılması uygun görülmüş ve analizler buna göre yapılmıştır. Önerilen perde duvarın uzunluğu ve yüksekliği 3 boyutlu kaya düşme analizi ile tespit edilmiştir. 3 boyutlu analizler RocPro3D 5.7.8 (RocPro3D, 2023) programı ile yapılmıştır. Analizlerde insansız hava aracı ile yapılan ölçümlerden elde edilen 5 cm çözünürlüğe sahip nokta bulutu kullanılarak oluşturulan katı model üzerinde 3 boyutlu kaya düşme analizi yapılmıştır. İki vadi içinde bulunan ve üst sonlardan kopup gelen bloklar dikkate alınarak analizlerde 10 ile 50 kg arasında bloklar kullanılmıştır.

Yapılan arazi çalışmaları sonrasında kaya parçalarının orman örtüsünün hemen bittiği dik yamaçlardan koptuğu ve vadi içine doğru yuvarlanıp biriktiği tespit edilmiştir. Yapılan bu tespit üzerine kaynak bölgeler vadilerin üst kotlarına ve vadi yamaçlarına tanımlanmıştır (Şekil 12 d).

3 boyutlu kaya düşme analizlerinde Kuzey Bölge (Bölge-1) ve Güney Bölge'de (Bölge-2) bulunan vadilerin üst kotlarına kaynaklar yerleştirilmiştir. Analizlerde 10 ve 50 kg ağırlığında toplam 500 adet blok yuvarlanmıştır. Yuvarlanan blokların izledikleri yollar ve sıçrama yükseklikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler ile önerilen perde duvarın boyutları tespit edilmiştir. Bölge-1'deki vadiden yuvarlanan 250 adet bloğun izlediği yollara bakıldığında blokların vadi ağzında 14 metre genişliğinde bir alanı etkilediği ve blokların 2.6 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır (Şekil 13). Bölge-2'deki vadiden yuvarlanan 250 adet bloğun izlediği yollara bakıldığında ise blokların vadi ağzında 25 metre genişliğinde bir alanı etkilediği ve blokların 1.4 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır (Şekil 14).



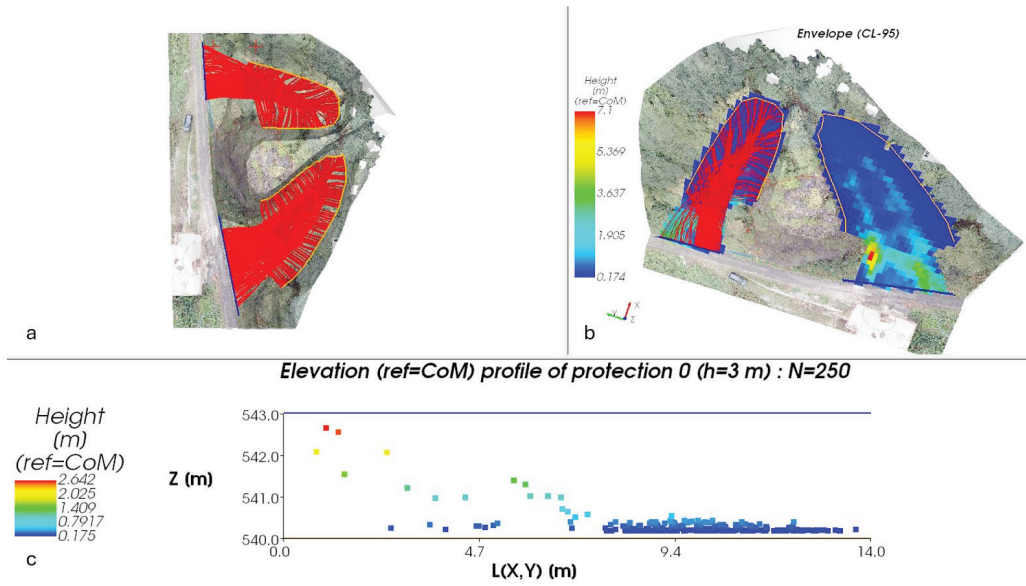
Şekil 12. Çalışma alanına ait nokta bulutu (a), nokta bulutundan oluşturulan üçgen modeller (b), 3 boyutlu katı model (c) ve ortofotonun katı model üzerine işlenmesi-kaynakların katı model üzerine yerleştirilmesi (d).

Figure 12. Point cloud for the study area (a), triangle models created from the point cloud (b), 3D solid model (c) and processing of orthophoto on the solid model and placing the source zones on the solid model (d).

Bu çalışmada Orta Bölgede (Bölge-3) ters kaya şevi eğimi nedeniyle beklenen doğrudan devrilmeyi önlemek için çelik ağ ile sarılmasının daha uygun olacağı düşünüldüğünden bu bölge için 3 boyutlu kaya düşme analizi yapılmamıştır. Bu bölgede yol dar olduğu için perde duvar ve çelik bariyer uygulaması yapmak mümkün değildir. Kuzey Bölge (Bölge-1) ve Güney Bölge (Bölge-2) içinde bulunan vadi içlerindeki önceden düşmüş bloklar dikkate alındığında

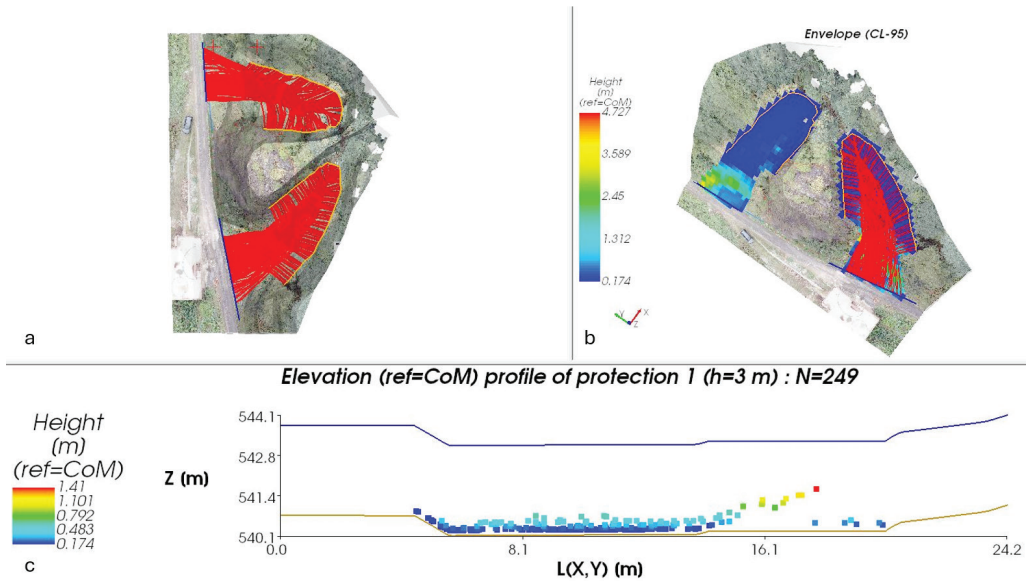
gelen bloğun enerjisinden çok sıçrama yüksekliği önemlidir.

Küçük boyuttaki blokların duvarı yıkmasından çok duvarın üstünden aşma riski olduğundan 3 boyutlu analizlerde sıçrama yüksekliğinin yanında vadi içinde yuvarlanan blokların kinetik enerjilerine bakılmıştır (Şekil 15).



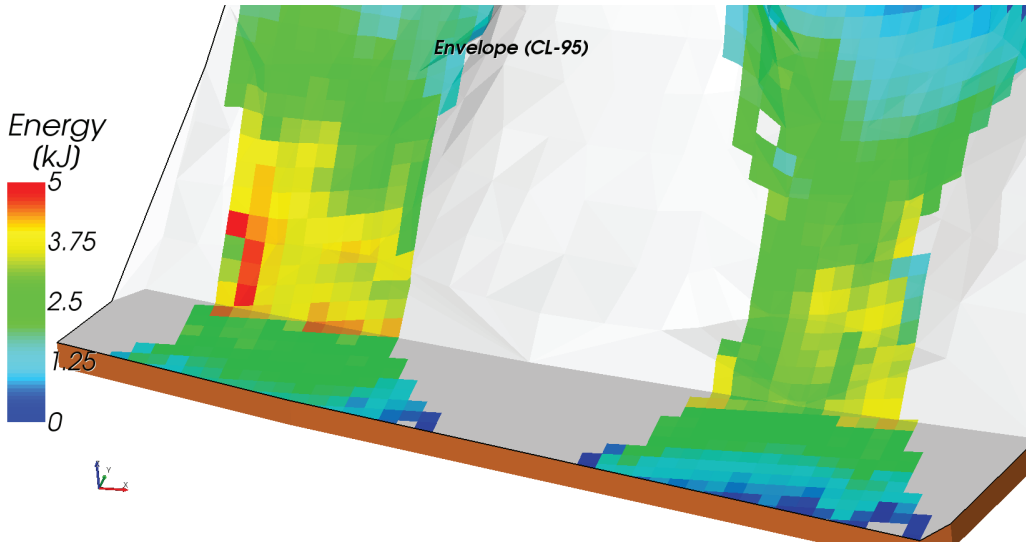
Şekil 13. Bölge-1'deki blokların izledikleri yollar (a), blokların sıçrama yüksekliği haritası (b) ve duvara çarpan blokların izleri (c).

Figure 13. Paths of blocks in Zone-1 (a), jump height map of the blocks (b) and traces of the blocks hitting the wall (c).



Şekil 14. Bölge-2'deki blokların izledikleri yollar (a), blokların sıçrama yüksekliği haritası (b) ve duvara çarpan blokların izleri (c).

Figure 14. Paths of blocks in Zone-2 (a), jump height map of the blocks (b) and traces of the blocks hitting the wall (c).



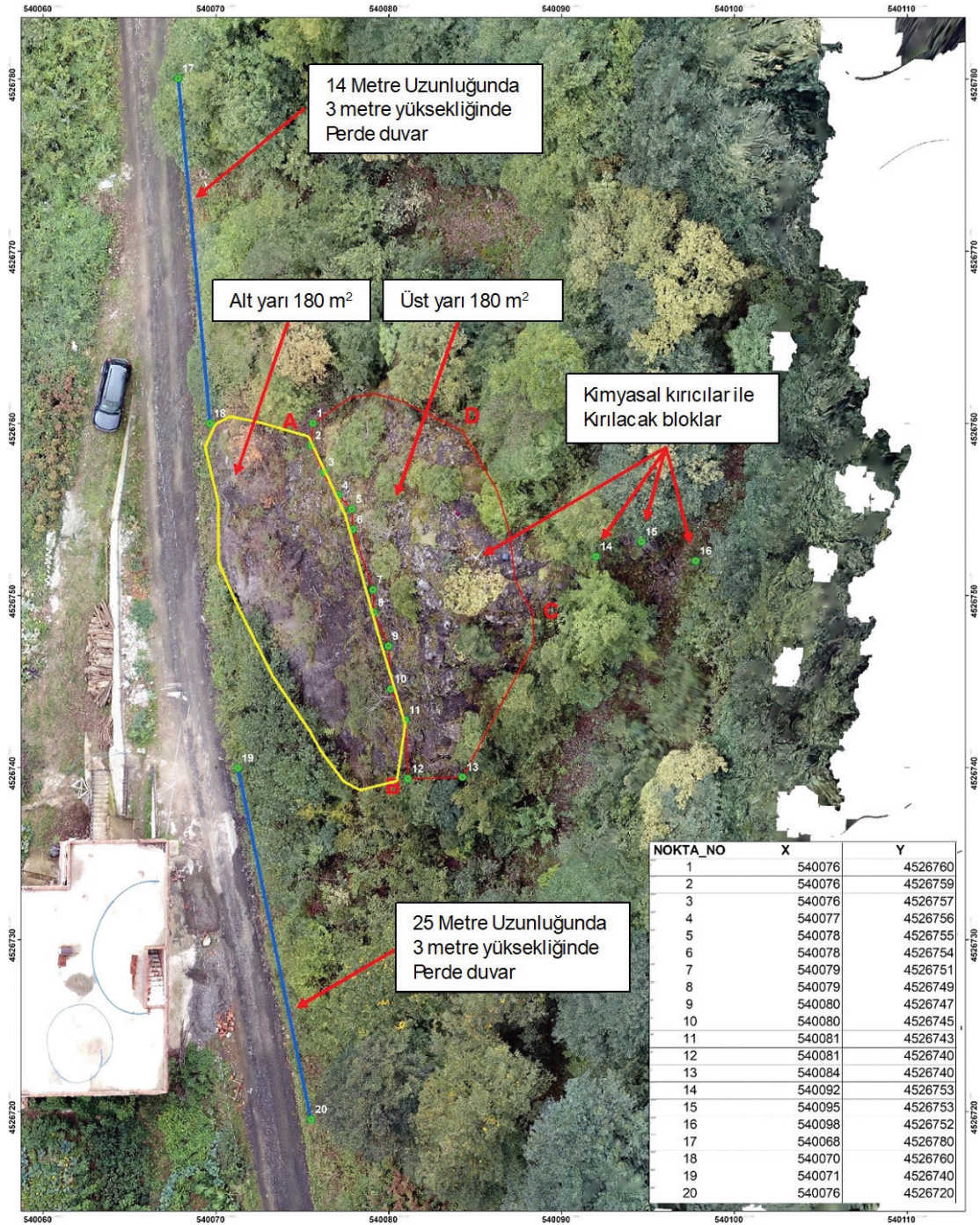
Şekil 15. Bölge-1 ve Bölge-2'deki vadilerden yuvarlanan blokların kinetik enerjileri.

Figure 15. Kinetic energies of blocks rolling down the slopes in Zone-1 and Zone-2.

BİRLEŞİK KAYA İSLAH ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan kinematik ve limit denge analizleri sonucunda çalışma konusu alanda düzlemsel kayma, kama tip kayma ve esnek devrilme riskinin olmadığı fakat Bölge-3'te (Orta Bölge) bulunan kaya şevinde süreksizlikler ile bölünmüş olan bloklarda doğrudan devrilme riskinin olduğu tespit edilmiştir. Bölge-1-2'de bulunan yamaçlardan blok düşmeleri (10-50 kg ağırlığında), vadi içlerinde biriken bloklarda moloz akması ve Bölge-3'ün üst kotlarında süreksizlikler tarafından bölünmüş serbest bir halde bulunan bloklarda ise düşme riski olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar uygulanacak kaya ıslah çalışmalarının belirlenmesi açısından çok önemlidir. Arazide yapılan detaylı çalışmalar sonucunda her bir bölge için ayrı risk oluşturan durumlar ve riski azaltmaya yönelik uygulamalar tespit edilmiştir.

Bölge-1'de vadi içinde yığılmış farklı boyuttaki kayaç parçaları ve kaynak bölgesinde bulunan blokların hareketi risk oluşturmaktadır. Bölgenin sık bitki örtüsü ile kaplı olması bu bölgede çelik ağ uygulamasının yapılmasına engel teşkil ettiğinden bu uygulama dikkate alınamamıştır. Kaynak bölgedeki blokların ve vadi içinde yığılmış malzemenin olası hareketinin etkileri 3 boyutlu kaya düşme analizi ile araştırılmıştır. Yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda hareket etmesi muhtemel blokların olası etkilerini en aza indirmek için yol kotunda vadi tabanı boyunca 14 metre uzunluğunda 3 metre yüksekliğinde (temel hariç) perde duvar uygulaması önerilmiştir. Ayrıca önerilen perde duvarın performansı 3 boyutlu kaya düşme analizinde test edilmiştir. Yapılan duvarın gelen blokların tuttuğu tespit edilmiştir. Daha önceden düşmüş, birikmiş ve düşmesi muhtemel blok boyutları dikkate alındığında duvar arkası enerji sönmüleyici bir sistem önerilmemiştir.



Şekil 16. Kaya düşmesi riskini azaltmaya yönelik önerilen perde duvarlar, çelik ağız ve kırılacak blokların konumları.
Figure 16. Proposed shear walls to reduce rockfall risk, locations of steel mesh and breakable blocks.

Bölge-2’de ise kaya kütlelerinin üst kesimlerinde bulunan bloklar ve vadi içinde yığılmış farklı boyuttaki kayaç parçalarının hareketi risk teşkil etmektedir. Bu bölgede süresizlikler tarafından bölünmüş serbest haldeki blokların yerinde sabitlenmesi ve/veya blokların olası hareketlerini durduracak çelik bariyerlerin vadi içinde uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle süresizlikler tarafından bölünmüş serbest haldeki blokların kimyasal madde kullanılarak daha küçük parçalara bölünmesi önerilmiştir. Gerek büyük blokların parçalanması sonucu oluşan kayaç parçalarının gerekse vadi içindeki farklı boyuttaki kayaç parçalarının olası hareketlerinden kaynaklanacak olası etkiler 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda olası blok hareketlerinin riskini minimuma indirmek için yol kotunda vadi tabanı boyunca 25 metre uzunluğunda 3 metre yüksekliğinde (temel hariç) perde duvar uygulaması önerilmiştir. Önerilen perde duvarın performansı 3 boyutlu kaya düşme analizinde test edilmiştir. Yapılan duvarın gelen blokların tuttuğu tespit edilmiştir.

Kaya kütlelerinin mostra verdiği Orta Bölgedeki (Bölge-3) alanda şev yüzeyinde süresizlikler tarafından bölünmüş bloklar ve şev tepesinde ise üst zonlardan yuvarlanıp gelmiş duran serbest bloklar mevcuttur. Kaya şevinde süresizlikler dikkate alınarak yapılan kinematik ve limit denge analizleri sonucunda bu bölgede sadece doğrudan devrilme riskinin olduğu tespit edilmiştir. Şev tepesinde yer alan serbest haldeki blokların kimyasal madde kullanılarak daha küçük parçalara bölünmesi, şev yüzeyinde süresizlikler ile bölünmüş askıda bulunan doğrudan devrilme riski olan blokların çelik ağ kullanılarak yerinde sabitlenmesi uygun görülmüştür. Çelik ağ ile kaplanması gereken kaya kütlesi Şekil 14’te verilmiştir. Yapılan hesaplamada kaplanması gereken toplam yüzey 360 m² olarak hesaplanmıştır.

Askıda blokların bulunduğu üst yarıda blok boyutları dikkate alındığında kaya şevinin çelik ağ ve halka panel ağla sarılmasından sonra yatayda ve düşeyde 100 cm ara ile çelik halatla sarılması, 2 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi, daha masif olan alt yarıda yatayda ve düşeyde 200 cm ara ile çelik halatla sarılması, 1 metre uzunluğunda ve 4 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi önerilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Trabzon İli Akçaabat İlçesi sınırları içinde meydana gelen kaya duraysızlıkları çalışılmış ve bu kapsamda 3 boyutlu kaya düşme analizleri yapılmıştır. Yapılan arazi çalışmaları sonucunda; çalışma alanı ve çevresinde Kabaköy formasyonu bazalt, andezit ve piroklastitlerinin yüzeyleme verdiği tespit edilmiştir. Volkanik birimlerden oluşan çalışma alanı, litolojik özellikler, morfoloji, yerleşim durumu, bitki örtüsü ve alınabilecek önlem ve/veya koruma yöntemleri dikkate alınarak Bölge-1 (Kuzey Bölge), Bölge-2 (Güney Bölge) ve Bölge-3 (Orta Bölge) olmak üzere 3 farklı zona ayrılmıştır. Bu üç bölgeden biri olan Bölge-3’te ki süresizlik kontrollü kütle hareketlerinin araştırması için yapılan hat etüdü çalışması ile süresizlik özellikleri tayin edilmiş ve kontur diyagramları hazırlanmıştır. Hazırlanan kontur diyagramı ile 270/85 duruşlu kaya şevinde kinematik analiz yapılmıştır. Kinematik analizlerde 264/78 duruşlu süresizlik düzlemleri boyunca düzlemsel kayma-direkt düşme ve 213/71 ile 324/68 duruşlu süresizliklerin ara kesit doğrusu boyunca (271/56) kama tipi kayma riski olduğu belirlenmiştir. Sonrasında kinematik analizler sonucunda tespit edilen düzlemsel ve kama tipi kayma hareketi için limit denge analizleri yapılmıştır. Yapılan limit denge analizlerinde düzlemsel kayma için depremsiz durumda 1,65 ve depremlili durum için 1,48

olarak hesaplanmıştır. Kama tipi kayma hareket için ise depremsiz durumda 1,62 ve depremlili durum için 1,29 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda çalışma konusu alanda düzlemsel kayma, kama tipi kayma, devrilme riskinin olmadığı hesaplanmıştır. Sadece Bölge-3'te ki üst yarıda bulunan şevin negatif eğimli kısmında bulunan 264/78 duruşlu süreksizlik boyunca direkt düşme riski söz konusu olduğu tespit edilmiştir.

Bölge-1 ve Bölge-2'yi içine alan yamaç ve vadi üst kotlarında bulunan riskli serbest-birikmiş blokların olası hareketleri Rocpro3D programı ile 3 boyutlu olarak modellenmiştir. 3 boyutlu modelleme ile bu iki bölgede bulunan 10-50 kg ağırlığında 500 adet blok yuvarlanarak blokların vadi boyunca izledikleri yollar ve sıçrama yükseklikleri hesaplanmıştır. Analizler sonucunda Bölge-1'de blokların 14 metre genişliğinde bir alana yayıldığı ve blokların 2.6 metre yüksekliğe sıçradığı, Bölge-2'de ise blokların 25 metre genişliğinde bir alana yayıldığı ve blokların 1.4 metre yüksekliğe sıçradığı hesaplanmıştır. Yapılan tüm analizler sonucunda Bölge-1 ve Bölge-2'de bulunan riskli blokların olası hareketlerinin olumsuz etkilerini ve bir moloz akmasını önlemek için Bölge-1'de bulunan vadinin ağızına 14 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar, Bölge-2'de bulunan vadinin ağızına 25 metre uzunluğunda ve 3 metre yüksekliğinde perde duvar yapılması önerilmiştir.

Bölge-3'ün üst kesimlerinde blokların ve ters eğimden kaynaklı düşmeleri önlemek için 360 m² alanın halat destekli çelik ağ ile sarılması önerilmiştir. Bölge-3'te bulunan büyük tasviye edilemeyen blokların kimyasal kırıcı ile kırılması, genel bir şev temizliğinin yapılması ve en sonda askıda blokların bulunduğu üst yarıda yatayda ve düşeyde 100 cm ara ile çelik halatla

sarılması, 2 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi, daha masif olan alt yarıda yatayda ve düşeyde 200 cm ara ile çelik halatla sarılması, 4 metrede bir ankraj ile sabitlenmesi önerilmiştir. Ankraj boylarının en az 1 metre olması önerilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akgün, A. (2011). Assessment of possible damaged areas due to landslide-induced waves at a constructed reservoir using empirical approaches: Kurtun (North Turkey) Dam reservoir area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1341-1350. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1341-2011>
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A.Ö., Akın M.K., Topal, T. (2019). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 43, 211-232. <https://doi.org/10.24232/jmd.655005>
- Alemdağ, S., Zeybek, H.I., Külekçi, G. (2019). Stability evaluation of the Gümüşhane Akçakale Cave by Numerical Analysis Method. *Journal of Mountain Science* 16 (9), 2150–2158. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5529-1>
- Alizadeh, E. (2021). Altındere Vadisi (Maçka-Trabzon) boyunca gözlenen kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyelinin çevresel etkilerinin 2 ve 3 boyutlu benzetim modellerle incelenmesi. [Doktora Tezi] Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altay, G. (2015). Kaya Düşmelerine Karşı Kullanılan Toprak Dolgu Setlerin Nümerik İncelenmesi. [Yüksek Lisans Tezi] Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arslan, M., Aslan, Z. (2006). Mineralogy, Petrography and Whole-Rock Geochemistry of the Tertiary Granitic Intrusions in Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 27 (2), 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.03.002>
- Arslantürk, F. (2022). Yedigöl köyü (İspir/Erzurum) ve çevresi kaya düşme tehlikesinin 2-3 boyutlu modellerle analizi [Yüksek Lisans Tezi].

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- Aydın, F., Karslı, O., Sadıklar, M.B. (2003). Mineralogy and Chemistry of Biotites from Eastern Pontide Granitoid Rocks, NE-Turkey: Some Petrological Implications for Granitoid Magmas. *Geochemistry*, 63, 163–182. <https://doi.org/10.1078/0009-2819-00027>
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10, 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- 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.
- Buz, R. (2019). Şahinefendi (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Caymaz, P. (2023). Karahıdırlı (Mersin) çevresindeki kaya düşmelerinin üç boyutlu analizi ve koruma yöntemlerinin belirlenmesi [Doktora Tezi]. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çapar, N. (2018). Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi [Doktora Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dağ, S., Bulut, F., Alemdağ, S., & Kaya, A. (2011). A general assesment for methods and parameters used in production of landslide susceptibility maps. *Gümüşhane University J Sci Technol Inst*, 1(2), 151-176.
- Dearman, W., Turk, N., Irfan, Y., & Rowshanei, H. (1987). Detection of rock material variation by sonic velocity zoning. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 35(1). <https://doi.org/10.1007/BF02590472>
- Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetçi, M. O., & Yahşi, B. K. (2019). Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology*, 249, 112-128. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.025>
- Ersoy, H., Karahan, M., & Öztürk, H. (2020). Baraj rezervuarlarında heyelanlardan kaynaklanacak itki dalga özelliklerinin ampirik ilişkilerle değerlendirilmesi: Borçka Barajı örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(2). <https://doi.org/10.21324/dacd.621377>
- Gelişli, K., Şeren, A., Babacan, A. E., Çataklı, A., Ersoy, H., & Kandemir, R. (2011). The Sumela Monastery slope in Maçka, Trabzon, Northeast Turkey: rock mass properties and stability assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 577-583. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0343-6>
- Gökçe, O., Özden, Ş. and Demir, A. (2008). “Türkiye’de Afetlerin Mekânsal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgileri Envanteri.” T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı.
- Grosic, M., Arbanas, Z., Udovic, D. (2009). Designing And Constructing Rockfall Barriers – Experiences İn Republic of Croatia. *ISRM Regional Symposium-EUROCK 29-31 October 2009, Croatia*, 113.
- Güven, İ. H. (1993). Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu. MTA Yayınları.
- IAEG (1976). *Engineering Geological Maps: A Guide to Their Preparation*. International Association of Engineering Geology. UNESCO Press. 79 p. Paris.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1976). *Engineering geological maps*. The UNESCO Press, 15, 78
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1978). *Comission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Suggested Methods for The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-68.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1981). Rock Characterization, Testing and Monitoring. International Society of Rock Mechanics Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (2007). In: Ulusay R, Hudson JA (eds) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. Kazan Offset Pres, 628 p. Ankara.
- Kadioğlu, M., (2006). Heyelan ve sel risk yönetimi. 1. Heyelan Sempozyumu. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası (s.38-50).
- Karahan, M., Ersoy, H., & Akgun, A. (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>
- Kaya, A., & Midilli, Ü. M. (2020). Slope stability evaluation and monitoring of a landslide: a case study from NE Turkey. *Journal of Mountain Science*, 17(11), 2624-2635. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6306-x>
- Keskin, B. (2019). Zonguldak-Kilimli Yolunda Kaya Düşme Potansiyelinin Araştırılması [Yüksek Lisans Tezi]. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kırbaş F. (2019). Kızıllar Mahallesinin (Tepebaşı, Eskişehir) Çevresindeki Kaya Düşmesi Duraysızlıklarının Araştırılması ve Çözüm Önerileri [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Koçyiğit, T. (2019). Göre (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lambert, S., & Bourrier, F. (2013). Design of rockfall protection embankments: a review. *Engineering geology*, 154, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.012>
- Önsoy, H., Murat, İ.K., Kankal, M., Yüksek, Ö., & Filiz, M. H. (2008). Doğu Karadeniz havzasında oluşan taşkınların nedenleri çözüm önerileri. Taşkın, Heyelan ve Dere Yataklarının Korunması Konferansı (s. 17-28).
- Polat, A. (2020). CBS Tabanlı 3b Kaya Düşmesi Analizi Ve Veri Hazırlama Süreçleri: Kavak Köyü (Sivas-Türkiye) Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1205-1222. <https://doi.org/10.17482/uumfd.769109>
- San, N.E. (2017). Ankara Kalesi Çevresinde Kaya Düşmesinin İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- Şaraldı, M.H. (2015). Tatların (Nevşehir) Yeraltı Şehrini ve Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi. [Yüksek Lisans Tezi] Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ... & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617-2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>
- Wang, X., Frattini, P., Stead, D., Sun, J., Liu, H., Valagussa, A., & Li, L. (2020). Dynamic rockfall risk analysis. *Engineering Geology*, 272, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105622>
- URL-1 TATD, (2023, 6 Haziran). Türkiye Acil Tıp Derneği. 2020'de Türkiye ve Dünyada En Sık Görülen Doğal Afetler. <https://tatd.org.tr/afet/afet-yazi-dizisi/2020de-turkiye-ve-dunyada-en-sik-gorulen-dogal-afetler>
- URL-2. EM-DAT, (2023, 6 Haziran). The International Disaster Database. <https://www.emdat.be/>

Karahan, Sünnetçi, Ersoy, İpek

URL-3. AFAD, (2023, 8 Haziran). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>

URL-4. AFAD, (2023, 8 Haziran). Trabzon İl Risk Azaltma Planı – İRAP. <https://trabzon.afad.gov.tr/il-planlari>