

Kaya Düşmeleri Risklerine Karşı Esnek Kaya Bariyerlerinde Enerji Kapasitesi Tayini ve Uygun Yer Seçim Kriterleri

Eroltan Durmuş^{1*}, Özkan Coruk², Ahmet Karakaş²

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 41100, Kocaeli.

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 41100, Kocaeli.

Özet

Kaya düşmesi, yamaç yüzeylerinde veya teknik girişimler ile açılmış olan şev yüzeylerinde süreksizlik düzlemleriyle ya da ortamın ayrışma durumuna göre oluşan zayıf dayanımlı zonlarla sınırlandırılmış kaya bloklarının yer çekimi etkisiyle yamaç veya şev eğim yönü boyunca hareket kazanması olarak tanımlanır. Günümüz teknolojisindeki gelişmeler kaya düşmelerinin önlenmesinde önemli proje ve imalatların ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır. Alınan önlemler neticesinde daha güvenli yerleşim alanları, daha güvenli karayolu ve demiryolu geçişleri oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada da son yıllarda kaya düşme riski olan sahalarda koruma önlemi olarak imal edilen yüksek enerji sönümlemeli esnek kaya bariyerlerinin enerji ve yükseklik tayinleri ile bariyer tasarımı için seçilecek uygun hat kriterleri hesaplamaların sonucuna göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlerin belirlenmesi aşamasında hesaplanan enerji, hız, sıçrama yükseklik değerleri ve yörüngeleri, bilgisayar yazılımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda blok sıçrama yükseklikleri ve yüzey temas noktalarında önemli farklar bulunmadığı, ancak hesaplamalarda elde edilen kinetik enerji değerlerinin (2515kJ) bilgisayar yazılımının verdiği kinetik enerji sonucundan(1600kJ) fazla olduğu görülmüştür. Aradaki fark, bilgisayar yazılımında kaya bloğunun yüzey temaslarındaki yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarından kaynaklanmaktadır. Çalışmada, kaynak alandan eş zamanlı ya da kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerine karşı güvenli alanda kalınması amacıyla yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayıları ihmal edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Kaya Düşmesi, Kinematik Analiz, Kaya Düşmesi Etki Elanı, Yüksek Enerji Sönümlemeli Kaya Bariyeri

Determination of Energy Capacity and Suitable Location Selection Criteria in Flexible Rock Barriers Against Rockfall Risks

Abstract

Rockfall is defined as the movement of rock blocks bounded by discontinuity planes or weak zones formed according to the weathering condition of the environment on the slope surfaces or on the slope surfaces cut by technical works along the slope or slope direction under the influence of gravity. Developments in today's technology contribute to the emergence of important projects and productions in the prevention of rock falls. As a result of the measures taken, safer residential areas, safer highway and railway crossings can be established. In this study, the energy and height determinations of high energy damping flexible rock barriers, which have been manufactured as a protection measure in areas with rockfall risk in recent years, and the appropriate line criteria to be selected for the barrier were evaluated according to the results of manual calculations. During the determination of these criteria, calculated energy, speed, bounce height values and trajectories were compared with the computer software results. As a result of the comparisons, it was seen that there were no significant differences in the block bounce heights and surface contact points, but the kinetic energy values obtained in the calculations (2515 kJ) were higher than the kinetic energy result given by the computer software (1600 kJ). The difference is due to the surface friction and restitution coefficients in the surface contacts of the rock block in the computer software. In the study, surface friction and restitution coefficients were neglected in order to remain in the safe area against simultaneous or short-timed multiple block falls from the source area.

Keywords

Rock Fall, Kinematic Analysis, Rock Fall Impact Area, High Energy Absorption Rock Barrier

1. Giriş

Günümüz teknolojisi, potansiyel kaya düşmelerinin meydana gelmesi halinde can ve mal kayıplarına sebep olabilecek alanlarda koruma önlemi olarak çok sayıda mühendislik uygulamasına imkân vermektedir. Önlem alınıp alınamayacağı durumları için sahanın belirli bir araştırma sürecinden geçmesi gerekmektedir. Araştırma sürecinin büyük bir bölümünü mühendislik jeolojisi amaçlı saha gözlemleri ve sahadan alınan veriler oluşturmaktadır.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 303 3143 Faks: +90 (262) 303 10 03

E-posta: eroltandurmus08@gmail.com (Durmuş E.), coruk@kocaeli.edu.tr (Coruk Ö.)
akarakas@kocaeli.edu.tr (Karakaş A.)

Gönderim Tarihi / Received : 07/10/2024

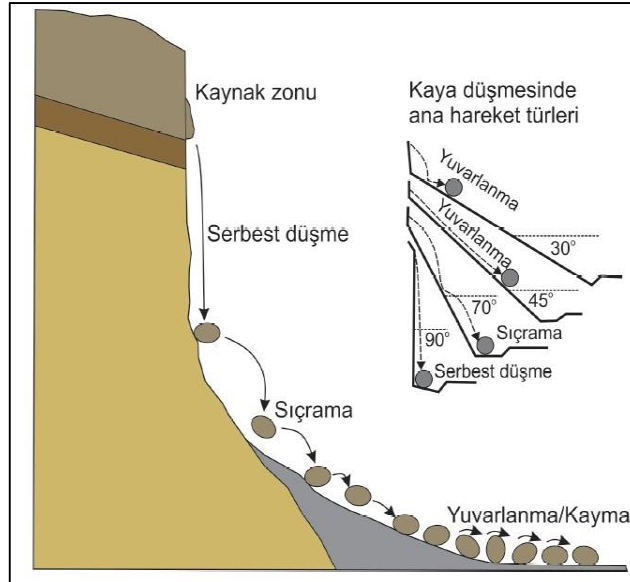
Kabul Tarihi / Accepted : 11/12/2024

Sahada yapılacak veri derleme işleminin başında, düşmesi muhtemel kaya bloklarının bulunduğu “kaya düşmesi kaynak alan/alanların” sınırlarının belirlenmesi gelmektedir. Kaynak alan içerisinde düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespiti (kaya bloklarını sınırlayan süreksizliklerin mühendislik özellikleri, düşmesi muhtemel kaya bloklarının hacimleri, muhtemel kütleleri ve konumları), daha önceki tarihlerde düşmüş kaya bloklarının konumları, hacim ve kütleleri, çalışma alanındaki kaya düşmesi olaylarının zamana bağlı sıklığı, korunması istenilen sahanın kaynak alana olan yatay ve düşey mesafeleri ile kaynak alana göre konumu, kaynak alan ve korunması istenilen saha arasındaki yamaç/şev yüzey topografyasının sayısal verileri, kaya düşmesi senaryolarının ve analizlerin hazırlanmasında önemli bir veri tabanı oluşturur. Böylelikle kaya düşmesi etki alan sınırlarının tespitiyle alınması gereken önlemlerin neler olabileceği konusunda önemli bir aşama kaydedilmiş olacaktır. Elde edilecek veriler kullanılarak farklı yöntemler yardımıyla pek çok kaya düşmesi modellemesi yapılabilmektedir. Bilgisayar teknolojisi ve yazılımlar yardımıyla kaya düşmesi modellemeleri oluşturulabildiği gibi, ampirik eşitlikler ve 2 boyutlu topografik kesitler kullanılarak da modellemeler oluşturulabilmektedir.

Yapılan modellemeler sonucunda, korunması istenilen tesise (altyapılar, binalar, karayolu veya demiryolu güzergâhları vb.) olan etkisi /oluşturacağı tehlikenin saptanması durumunda, uygun yapısal önlemler seçilebilmektedir. Seçilecek yapısal koruma önlemi için en önemli faktör, düşmesi muhtemel kaya bloklarının enerji potansiyelidir. Yapısal önlemin uygun şekilde tasarımı için çalışma alanının jeolojik ve topografik özellikleri ile düşmesi muhtemel kaya bloklarının darbe yüklerinin önlem yapısı tarafından karşılanabilirliği (sönümlenebilirliği) bilinmelidir. Bu kapsamda, yukarıda da değinildiği üzere pek çok yapısal önlem alınabilmektedir; toprak seddeler, kaya tutma hendekleri, rijit istinat yapıları, ağaçlandırma, saptırma yapıları ve esnek kaya bariyerleri ilk akla gelenlerdir.

1.1. Kaya Düşmelerinde Hareket

Kaya düşmelerini, süreksizlikler veya zayıflık zonları ile sınırlandırılmış kaya bloklarının doğal veya yapay nedenlere bağlı olarak belirli bir eğime sahip yamaç ya da şev yüzeyinden koparak/ayrılarak hareket etmesi olarak tanımlayabiliriz. Şekil 1’de görüldüğü üzere bulunduğu noktadan kopan/ayrılan kaya bloğunun hareketi, topografik eğim miktarına göre yuvarlanma, sıçrama veya serbest düşme şeklinde gerçekleşebilmektedir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020). Ritchie (1963)’e göre topografik eğimin 76° ’nin üzerine çıktı durumlarda hareket serbest düşme olarak gerçekleşmektedir. Ancak farklı saha koşullarında 70° civarındaki açıya sahip yüzeylerde hareketin zıplamalardan kademeli olarak düşmeye geçtiği görülür (Dorren, 2003). Wang ve Lee (2012)’ye göre topografik eğim ne kadar düzensiz olursa, kaya düşmesinin hareket davranışı da yuvarlanmadan sıçramaya varan değişkenlikler gösterecektir. Kaya bloğunun şekli ise düşen kaya bloğunun hareket yolunu etkileyen bir faktördür. Bu faktör ise eklem pürüzlülük katsayısına bağlıdır. Yamaç eğiminin düşmesi, enerji ve hız değerlerinin azalmasına neden olabileceğinden, düşük enerjili hareketler sırasında bloklarda kayma şeklinde hareketlerin görülmesi de olasıdır.



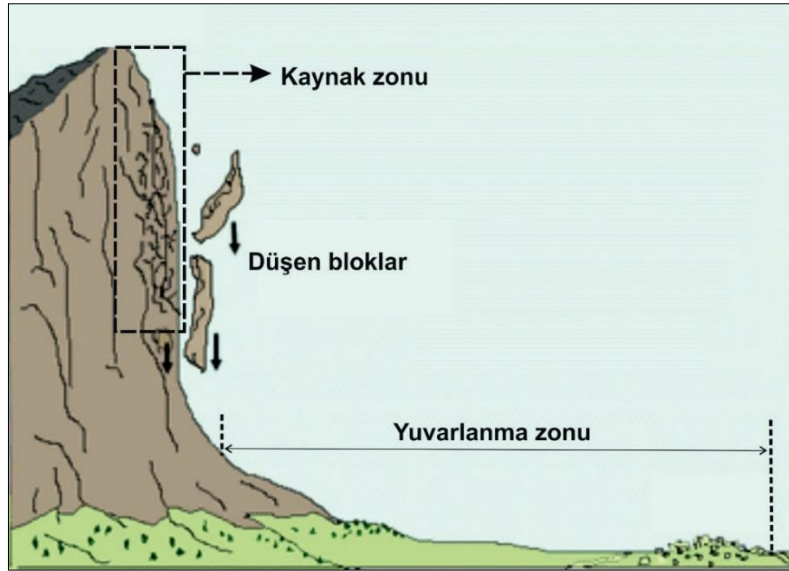
Şekil 1: Yamaç veya şev topografik eğimine göre kaya bloklarının genel hareket ve davranışları (Ritchie,1963; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

Kaya düşmelerinde düşmesi muhtemel blok boyu ve şekli kadar, aynı anda tek bir bloğun mu yoksa çoklu blok düşmelerinin mi olacağına dair analizlerin de yapılması gerekir. Blok kütleleri ve morfoloji, kaya bloğu ya da bloklarının oluşturacağı kinetik enerjileri, sıçrama yükseklikleri, hızları ve düşen blokların izleyebileceği en muhtemel yol konusunda önemli veriler vermektedir.

Kaynak alandan düşmesi muhtemel olan kaya bloklarının bulundukları noktadan kopması/ayrılması durumunda yamaç yüzeyinde hareketleri sonucunda enerjilerinin tamamen sönmüldüğü, yani hareketin durduğu nokta ya da noktalar, aynı zamanda maksimum yuvarlanma mesafeleridir. Yamaç topografyasındaki düzensizlikler ile yamaç yüzeyini oluşturan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, yamaç yüzeyi üzerindeki doğal engeller (bitki örtüsü gibi), kaya bloğunun mekanik özellikleri, kütlesi ve blok şekli bu mesafeyle etkileyen ana faktörler olarak sıralanabilir.

1.2. Kaynak Zonu ve Yuvarlanma Zonu

Kaya bloklarının çeşitli faktörler etkisiyle bulundukları kaya ortamından ayrılarak düşme hareketine bağladığı ilk bölüm “kaynak zonu” olarak isimlendirilir. Genelde dik/dike yakın topografik açıya sahip, çatlaklı/kırıklı yapısal özellik gösterirler. Kaynak zonundan ayrılan kaya bloklarının düşme hareketleri boyunca sıçrama ve yuvarlanma şeklinde hareketlerine devam ettikleri zon ise “yuvarlanma zonu” olarak bilinir (Şekil 2). Yuvarlanma zonu [Evans ve Hungr \(1993\)](#)’a göre iki ayrı bölüme ayrılır. Bunlar, geçiş bölgesi ve durma bölgesidir. Geçiş bölgesi, genelde düşük enerjili küçük çaplı kaya bloklarının yer aldığı bölüm olup, durma bölgesi ise daha büyük çaplı yüksek enerjili kaya bloklarının ulaşabildiği alanlar olarak tanımlanmıştır. Ancak günümüzde kaya düşmesi etki alan sınırları içerisinde her zaman geçiş zonlarına rastlanmamaktadır. Bunun sebebi, yamaç topografik özellikleri ile düşen blokların enerjileridir. Kaya düşme davranışlarını kontrol eden başlıca iki parametre; yamaç veya şev açısı ile yamacı veya şevi oluşturan malzemedir. Şekil 3’te [Wyllie \(2015\)](#) tarafından dört ayrı zonda kaya düşme davranışları ile depolanma kriterleri tanımlanmaktadır.



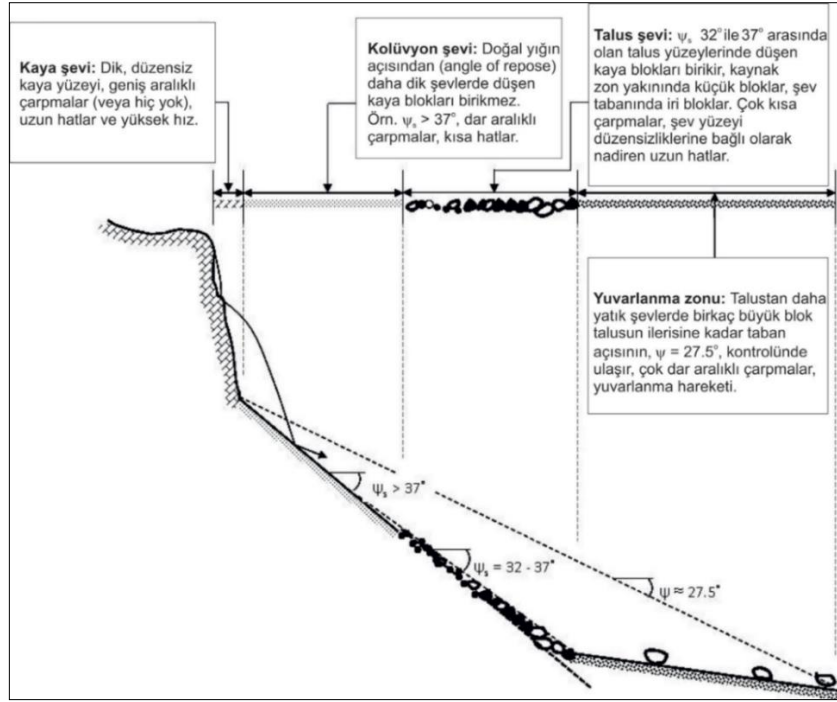
Şekil 2: Kaya düşmelerinde kaynak zon ve yuvarlanma zonları ([Evans & Hungr, 1993](#); [Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020](#))

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, bilgisayar yazılımı dışında kaya düşmesi analizinin hangi parametreler ve eşitliklerle nasıl yapılacağı bir saha örneği ile açıklanmaya çalışılmıştır. Saha çalışmaları kapsamında kaynak zon yamaç yüzeyinde kinematik analiz, kaya bariyeri güzergâhının seçimi için de sahada Schmidt çekici deneyleri yapılmıştır. Kinematik analizlerle Dips 8.0 bilgisayar yazılımı kullanılarak kaynak zonda süreksizlik denetimli duraysızlık türleri saptanmıştır. Kaya bariyerleri için uygun hat seçiminde ise topografik verilerle birlikte Schmidt çekici deneylerinden elde edilen dayanım değerleri kullanılmıştır. Yapılan kaya düşmesi analizi sonuçları, aynı parametreler kullanılarak Rocfall8.0 bilgisayar yazılımı ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Kaya Düşmelerinde Saha Çalışmaları

Kaya düşmeleri için sahada yapılacak incelemelere dair elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği, düşme analizlerinin ve alınabilecek önlemlerin doğru yorumlanabilmesini sağlayacaktır. Saha verileri toplanırken öncelikle geçmiş dönemlerde düşmüş kaya bloklarının varlığı, kaynak alan-yuvarlanma-durma zonlarının morfolojik ve jeolojik özellikleri, daha önce düşmüş kaya bloklarının şekil ve boyutları ile kaynak alanda düşmesi muhtemel kaya bloklarının şekil ve boyutları, daha önce düşmüş kaya bloklarının hareket türü (düşme, sıçrama, yuvarlanma) gibi konular dikkate alınmaktadır ([Caltrans, 2020](#)).



Şekil 3: Kaya düşmelerinde şev açlarına bağlı kaya düşme davranışları ve depolama özellikleri (Wyllie, 2015; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

Saha çalışmalarında yukarıdaki sorulardan alınabilen cevaplar, büro çalışmaları süresince yapılacak analizler için önemli bir veri niteliğindedir. Özellikle yerleşik alanların etkilendiği kaya düşmesine konu saha çalışmalarında kaynak alan ve kaya bloklarının eriştiği en uzak noktalara ait kayıtlar ilk aşamadaki en önemli veridir. Daha önce kaya düşmesi olayı yaşanmamış, ancak kaynak zon içerisinde düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespiti halinde kaynak alan alt kotlarındaki yamaç morfolojisine ait sayısal verilerin alınması gerekmektedir. Yamaç topografyasının sayısal verileri kullanılarak düşmesi muhtemel kaya bloklarının düşme analizleri yapılabilecektir. Yamaç topografik eğiminde ve eğim yönündeki farklılıklar göz önünde bulundurulmalı, eğim yönündeki farklılıklara göre ayrı ayrı topografik kesitler üzerinde düşme senaryolarının analizleri yapılmalıdır.

2.2.Kaya Düşme Analizleri

Koruma tipi veya stabilizasyon tipi önlemler alınmadan önce kaya düşmesi analizleri yapılması gerekir. Analizlerde kaya düşmelerinin hareket yönelimleri ve enerji miktarlarının tayin edilebilmesi için blok hızlarını, darbe enerjilerini ve sıçrama yüksekliklerini dikkate alan yöntemler kullanılmaktadır. Koruma tipi önlemlerin geliştirilmesi için gerekli olan en önemli parametre, Eşitlik 1’de formüle edilen kinetik enerjidir.

$$\text{Toplam Kinetik Enerji: } \frac{1}{2}m\vartheta^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

m: Blok kütlesi

ϑ : Translasyonel Hız

ω : Rotasyonel Hız

I: Atalet Momenti olarak tanımlanmıştır.

$$\omega = \frac{\vartheta}{r} \quad (2)$$

$$I = \frac{2}{5}mr^2 \quad (3)$$

$$\text{Potansiyel Enerji: } m.g.h \quad (4)$$

m: Blok kütlesi

g: Yer Seçimi İvmesi

h: Düşmesi muhtemel bloğun kaynak alan ile durma noktası arasındaki kot farkı

Bir serbest düşme hareketinden sonra, hareketine yuvarlanma veya sıçrama şeklinde devam eden kaya bloğunun enerjisi potansiyel enerjiden kinetik enerjiye dönüşür. Kaynak zonundan koparak serbest düşme yapan bir bloğun yamaç yüzeyine ilk temasındaki hızı:

$$V = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

Burada V bloğun hızı, g yerçekimi ivmesi ve h bloğun maksimum düşme yüksekliğidir. Fakat her kaya düşmesi olayı, yukarıda belirtildiği üzere bir “serbest düşme” ile başlamayabilir. Dik/dike yakın eğim dışında, 40-70° arasında değişen eğim miktarlarına sahip yamaç ya da şev yüzeyinde gerçekleşebilecek hareketler kamalanma, düzlemsel kayma ve devrilme şeklinde gerçekleşebileceği gibi, serbest haldeki yarı yuvarlaklaşmış şekilli bloklar da yuvarlanarak düşme hareketine başlayabilir.

Kaya bloğunun (yarı yuvarlaklaşmış, küre şekilli) eğimli bir yüzey üzerindeki hareketine yuvarlanma şeklinde başlaması durumunda, aralarında h kadar yükseklik farkı bulunan ikinci noktaya ulaştığı andaki hız değeri, Eşitlik 6 kullanılarak tanımlanır.

$$V = \sqrt{\left(\frac{10}{7}\right) \cdot g \cdot h} \quad (6)$$

Yuvarlanma şeklinde gerçekleşen blok hareketi, topoğrafik eğimin 45° üzerine çıktığı bölgelerde, sıçrama türünde hareketine devam edecektir. Bu durumda eğimli bir düzlem üzerinde bloğun ilk temasına kadar olan hareketi, bir eğik atış prensibini yansıtır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bileşke hızın düşey bileşeninin yukarı değil aşağı yönlü olduğudur. Topoğrafik eğimin 45°’nin üzerine çıktığı ilk noktadan kaya bloğunun eğik atış hareketine başladığı ilk hız bileşeninin V_0 olacağı düşünüldüğünde; hareketin başladığı ilk noktadaki yatay hız bileşeni (V_{0x}), bir sonraki temas noktasına kadar olan yörünge boyunca sabit kalacaktır. Değişen parametre, artış gösteren hız ise düşeydeki hız bileşeni (V_{0y}) olacaktır.

$$h = \left(\frac{1}{2}\right)gt^2 + V_{0y} \cdot t \quad (7)$$

$$X = V_{0x} \cdot t \quad \text{veya} \quad t = \frac{x}{V_{0x}} \quad (8)$$

$$\tan\alpha = \frac{V_{0y}}{V_{0x}} \quad \text{ve} \quad V_{0x} = V_0 \cos\alpha \quad (9)$$

İlk temas noktasındaki çarpma hızının düşey bileşeni;

$$V_y^2 = V_{0y}^2 + 2gh$$

$$V_y = \sqrt{V_{0y}^2 + 2gh} \quad (10)$$

İlk temas noktasındaki çarpma hızı:

$$V_x = V_{0x}, \quad V = \sqrt{V_y^2 + V_x^2} \quad (11)$$

İki temas noktası arasındaki yatay ve düşey mesafeler bulunurken; iki nokta arasındaki topografik eğim oranı,

$$h = -x \cdot \tan\beta \quad (\text{Wyllie, 2014}) \quad (12)$$

$$h = \frac{1}{2}g \left(\frac{x}{V_0 \cos\alpha}\right)^2 + x \cdot \tan\alpha \quad (13)$$

İki sıçrama noktası arasındaki maksimum yükseklik için;

$$a = \left(\frac{g}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{V_0 \cos\alpha}\right)^2 \quad (\text{Wyllie, 2014}) \quad (14)$$

$$b = \tan\alpha \quad (15)$$

$$k = \tan\beta \quad (2 \text{ nokta arasında, topogradya eğimindeki değişim}) \quad (16)$$

Eşitlik 12 ve 13' ün birbirine eşitliğinden hareketle elde edilecek eşitliğin ilgili kısımları Eşitlik 14, 15 ve 16 olarak ele alındığında sıçramanın en büyük değerini verecek 15 nolu Eşitlik elde edilir.

$$hmax = a \cdot x^2 + x(b - k) \quad (\text{Wyllie, 2014}) \quad (17)$$

15 nolu eşitliğin x 'e göre türevi ile x değeri elde edilir.

$$x = -\frac{(b-k)}{2a} \quad (18)$$

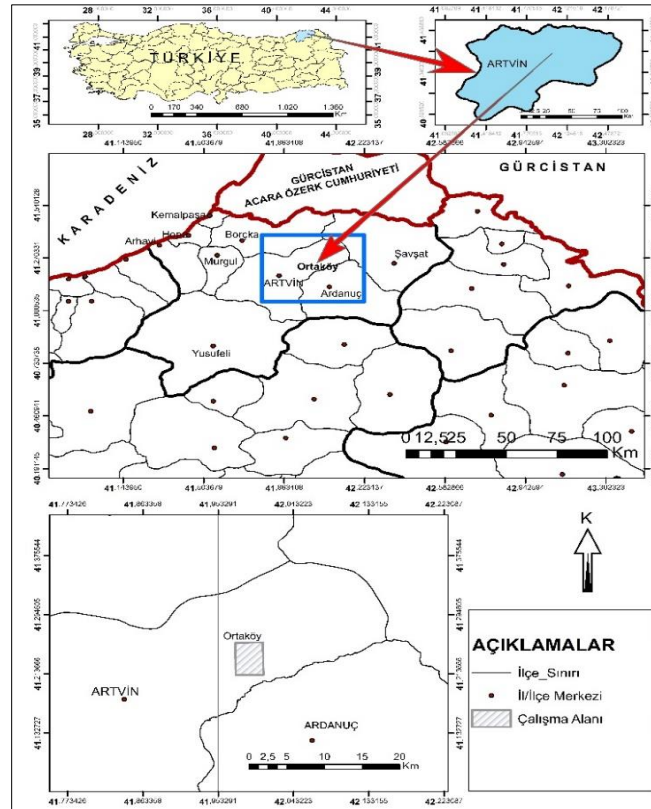
Temas noktasına gelen kaya bloğunun geliş açısı;

$$\alpha_1 = \text{atan}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \quad (19)$$

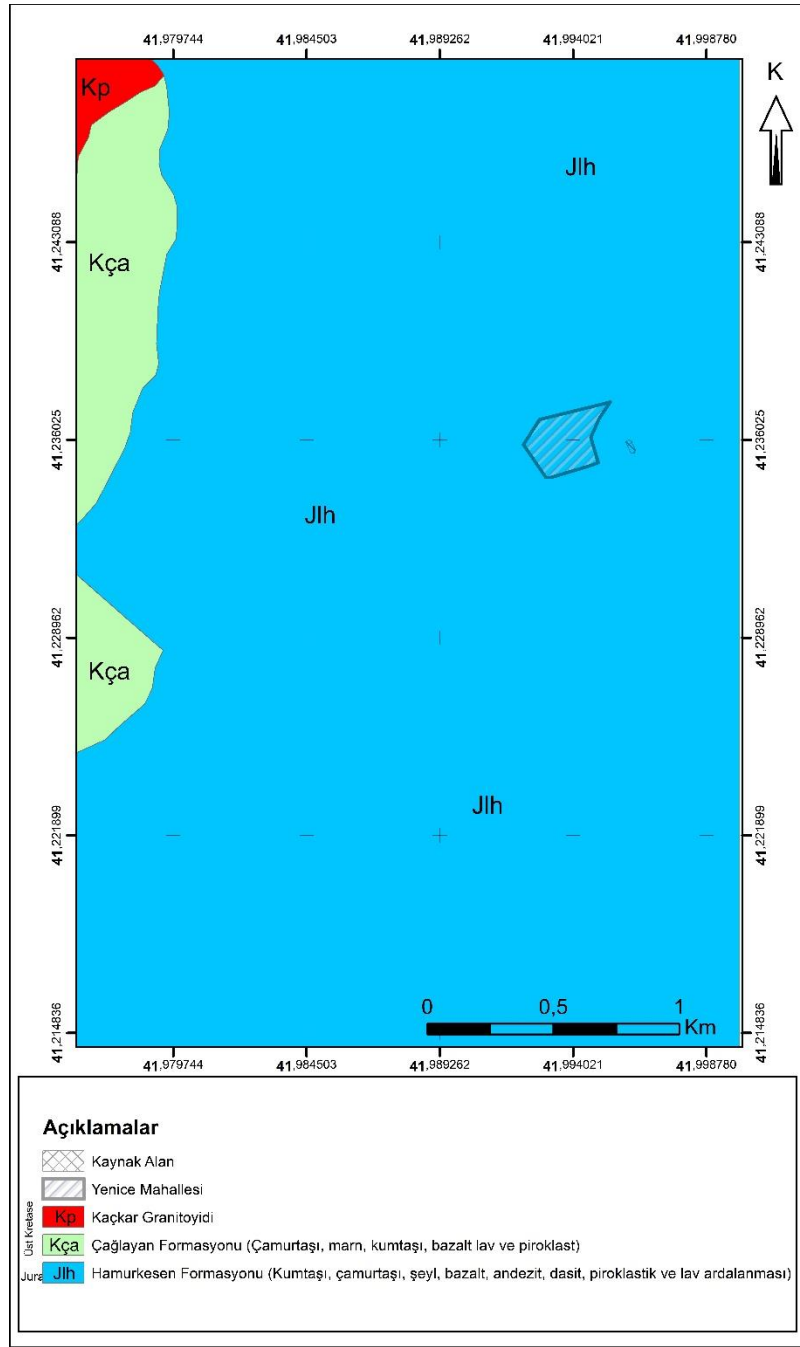
Kaya düşme analizleri, düşme esnasındaki yuvarlanma hatları ile yuvarlanma hatları boyunca bloğun sıçrama yükseklikleri, bloğun kazanacağı veya kaybedebileceği hızı ve enerjisi, kaya düşmesi tehlikesi altındaki alanların belirlenmesine yönelik maksimum yuvarlanma mesafelerinin saptanmasını amaçlamaktadır. Günümüzdeki bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak önce 2 boyutlu düşme analizleri ve modellerler geliştirilmiştir. Son yıllarda insansız hava araçlarının kullanım alanlarının da genişlemesiyle bu çalışmalar için 3 boyutlu kaya düşme analizleri ve modellemeye imkân tanıyan bilgisayar yazılımları üretilmiştir.

3. İki Boyutlu Kaya Düşmesi Modellemesinde Ortaköy (Artvin) Yenice Mahallesi Örneği

Örnek inceleme alanı Artvin İli Merkez ilçesine bağlı olup, Artvin İl Merkezinin yaklaşık 15 km kuzeydoğusunda yer alır (Şekil 4). Yenice mahallesi, Ortaköy köyünün merkez yerleşkesinin yaklaşık 1 km güneyinde, köy ulaşım yolunun alt kotunda, konveks bir yamacın eteğinde bulunur. Ortaköy köyünde, Jura ve Üst Kretase yaşlı birimler yüzeylenmektedir (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1998). Yenice mahallesi ve yakın çevresinde Jura yaşlı Hamurkesen Formasyonuna ait volkano sedimenter kayalar yer alır. Formasyon kumtaşı, çamurtaşı, şeyl, bazalt, andezit, dasit, piroklastik ve lav ardalanmasından oluşur. Bu birimlerin batısında, Üst Kretase yaşlı Çağlayan formasyonuna ait volkano sedimenter kayalar ile Kaçkar Granitoyidi gözlenir (Şekil 5).



Şekil 4: Ortaköy-Artvin inceleme alanının yer bulduru haritası



Şekil 5: Ortaköy ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Maden Tetik Arama Genel Müdürlüğü, 2012)

Yamaç topografik eğimi 37-45° arasında değişmekte olup konveks bir yamaç oluşuna bağlı olarak güneybatı, batı ve güneydoğuya doğru eğimlidir. Yenice mahallesinin yaklaşık 125 m kuzeydoğusunda, yaklaşık 810 ile 840 m kotlarında, yamaç eğim miktarının aniden arttığı (40-70° arasında), andezit ve bazaltlardan oluşan, orta-sık çatlaklı yapıya sahip bir zonun varlığı söz konusudur. Sahada bu bölüm incelendiğinde, birbirlerini kesen çok sayıda süreksizliğin olduğu, süreksizlik düzlemlerinin genelde pürüzlü (ondüasyonlu-düzensiz (IV), ondüasyonlu-düz (V), basamaklı-düz (II), basamaklı-düzensiz (I) (Barton, 1976), birkaç mm'den 15 cm'ye varan süreksizlik açıklıklarının olduğu kaya düşmesi kaynak zonu nitelikleri taşıyan bir zon olduğu kanaatine varılmıştır.

Söz konusu kaynak alandan 2011 yılı şubat ayında meydana gelen kaya düşmesi olayında yerleşim yerine ulaşmış kaya bloklarının toplamda 3-3.5 m³'lük hacme sahip olduğu görülmüştür. Kaya düşmesi olayı sonucunda Yenice mahallesinde bir ev ve bir ahır/samanlık binalarında tahribata sebep olmuştur (Şekil 6). Ahırda bulunan 2 küçükbaş hayvanın telef olmasına neden olmuştur. Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü arşivi incelendiğinde, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğüne sahada yapılan inceleme sonucu düzenlenen 04.01.1991 tarihli jeolojik etüt raporunda da Yenice mahallesinde muhtemel kaya düşmesi olayından 27 konut ve 1 caminin etkilenebileceği belirtilmiş, kaya ıslah işlemlerinin yapılmasının konutların bir başka yere nakledilmesinden daha ekonomik olacağı

kanaatiyle, sahada ıslah çalışmalarının yapılması yönünde ayrıca bir değerlendirme yapılması önerilmiştir. Rapora istinaden 02.07.1997 tarihli ıslah planlama ve proje raporunda, ıslah önerisi olarak düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespit edilerek patlayıcı maddeler yardımıyla düşürme/kırma/ufalama ve geçici kaya tutucu bariyerler ile kaya tutucu hendekler önerilmiştir.



Şekil 6: 2011 yılı şubat ayında Ortaköy Yenice mahallesinde düşmüş olan kaya bloğu parçalarının bazıları konut ve ahır çatısından sonra yaptığı sıçramanın ardından ağaç dallarına takılı kalmıştır (a ve b). Kaya bloklarının konut avlusuna ve ahıra ulaşmış olanlarının her birinin 1.5-2.0 m³ civarında hacme sahip olduğu görülmektedir (c ve d).

Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünce 2011 yılı şubat ayında yapılan saha incelemelerinde, yamaç topografik eğiminin kaynak alandan sonra Yenice mahallesi alt kotlarına kadar 37°'yi düşmeden devam etmesi nedeniyle mevcut topografik duruma göre uygun genişlik ve derinlikte bir kaya tutucu hendek imalatının yapılmasının mümkün olamayacağı anlaşılmıştır. Uygun genişlik ve derinlikte kazılamayacak hendekler, düşebilecek bloklar için tutucu/enerji düşürücü bir etken olmaktan daha çok, sıçrama yüksekliklerini hatta hızlarını ve buna bağlı olarak da kinetik enerjilerinde artışlara neden olabilecek bir etken olabilecekleri unutulmamalıdır. Kaynak alan altındaki yamaç şeklinin konveks (dışbükey) şekilli olması nedeniyle, kaynak alanda yapılacak patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemleri sonrasında kaya bloğu parçalarının yamacın hangi yönüne doğru ne kadarlık hız/enerji ve hareketi boyunca ne kadarlık sıçrama/sıçramalar yaparak hareketine devam edebileceğine dair net bir veri tabanı oluşturabilmek mümkün değildir. Bu nedenle geçici bariyerlerin tam olarak hangi hat veya hatlarda oluşturulması gerektiği, minimum yükseklikleri ve minimum enerji kapasitelerinin ne olabileceği konuları da sonuçsuz kalacaktır.

Bir kaya bloğunun doğal nedenlere bağlı olarak bulunduğu noktadan ayrılarak harekete geçişiyle izleyeceği yol, kazanacağı hız, enerji ve de sıçrama yükseklikleri gibi parametreler, patlatma/kırma işlemlerine bağlı yerinden kopan kaya bloğunun hareketlenmesiyle oluşan hız, enerji, sıçrama yüksekliği ve düşme hatlarıyla büyük farklılıklar içereceği kuşkusuzdur. Ayrıca bu yöntem, oluşacak yapay titreşimlere bağlı olarak kaynak zonun farklı noktalarından farklı boyutlarda kaya bloklarının da kaynak alandan ayrılmasına ve çoklu kaya düşmesi olaylarına neden olabileceği de unutulmamalıdır. Dolayısıyla patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemleri sırasında geçici kaya bariyeri oluşturulmasının da Yenice mahallesindeki konutlar için risk oluşturacağı kanaatiyle, kaya ıslahına yönelik farklı yöntemler üzerinde çalışılmıştır.



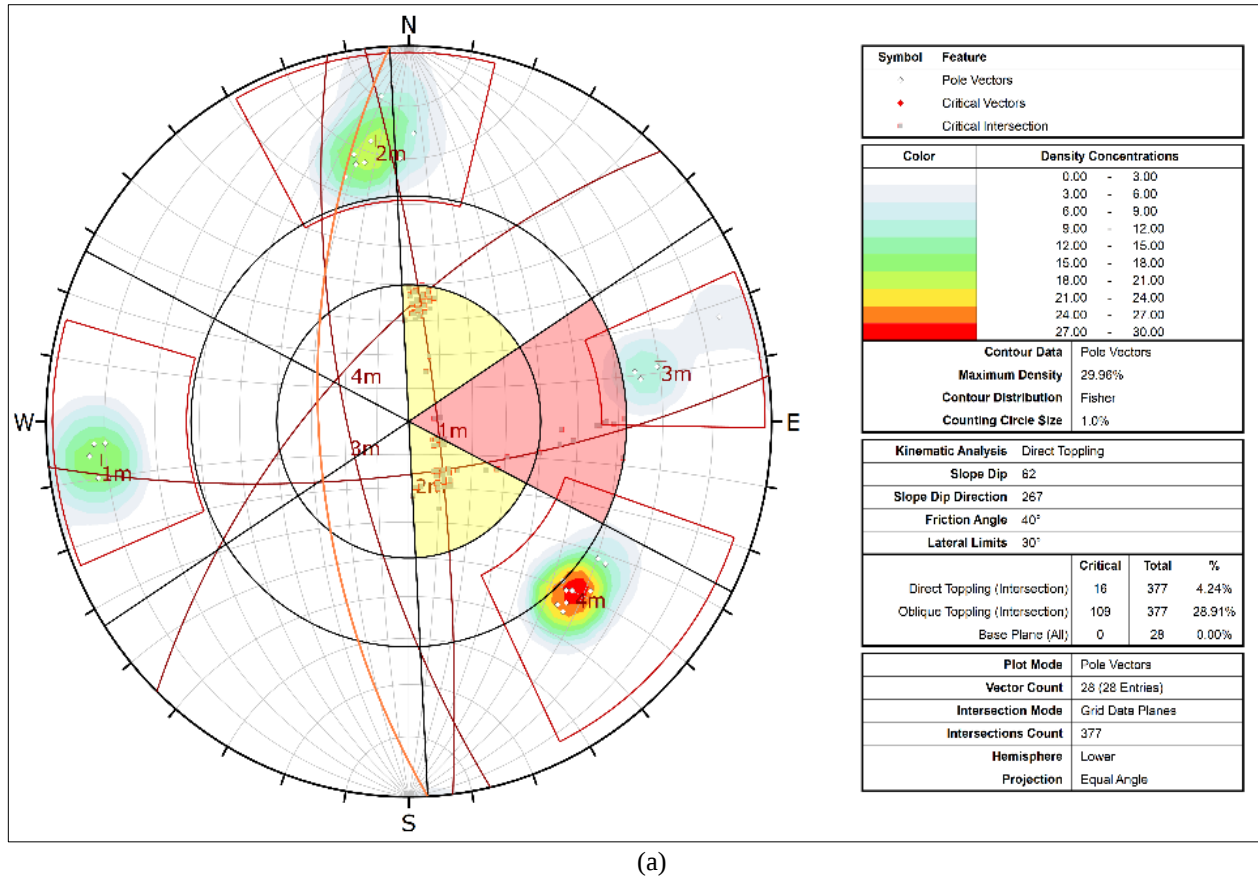
Şekil 7: 2011 yılı şubat ayında düşen kaya bloğunun kaynak alan yamaç yüzeyinden koptuğu noktanın görünümü

3.1. Kaynak Zonda Stabilizasyon

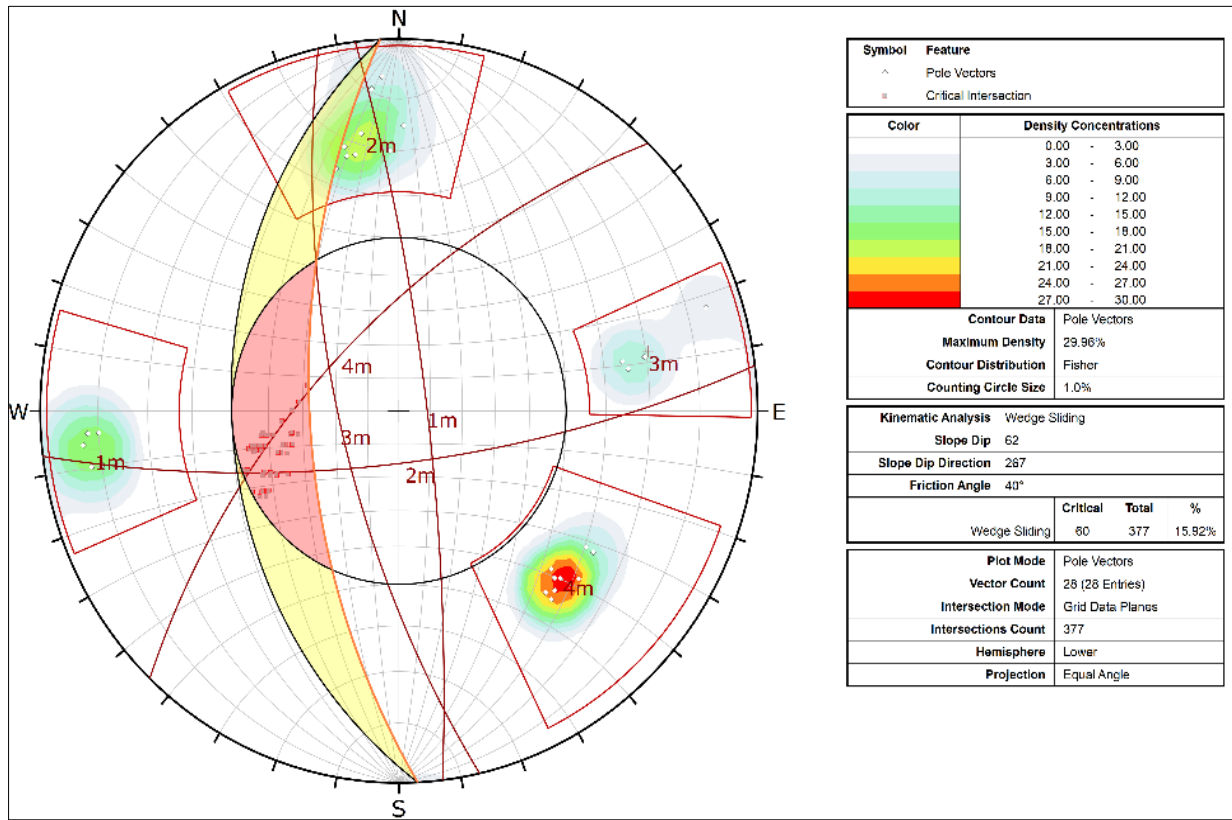
Kaynak zonda, süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya blokları incelendiğinde, düşmesi muhtemel kaya bloklarının 0.5 ile 2.5 m³ arasında değişen hacimlere sahip oldukları tespit edilmiştir. Kaynak alanda üç farklı tip süreksizlik tespit edilmiştir.

A Tip Süreksizlikler: Kaynak zonun batı ve güneybatıya bakan yamaçlarında ve yamaç tepe seviyesi arka bölümlerinde gözlenmiştir; eğim yönleri kaynak zon yamaç eğim yönüne paralel, açıklıkları kaynak zon üst seviyelerinde 1.5-2.0 cm, kaynak zon alt seviyelerinde açıklık tespit edilmemiştir. Yamaç tepe seviyesinden 1.5-2.0 m arkasında gözlenmiştir. Düzlem pürüzlülük durumu; basamaklı-düz (II). Ancak bu süreksizliklerin eğim miktarları kaynak zon yamaç eğimine eşit veya kaynak zon yamaç eğiminden daha fazladır. **B Tip Süreksizlikler:** Eğim yönleri kaynak zon yamaç eğim yönüne zıt yönde, kısmen dik/dike yakın açıdır. Açıklıkları birkaç mm'den 3 cm'ye varmaktadır. Pürüzlülük durumu: ondülasyonlu, düz (V). **C Tip Süreksizlikler:** Kaynak zon içerisinde, kaynak zon yamacını farklı doğrultu ve eğim açılarıyla kesen süreksizliklerdir. Pürüzlülük durumu: ondülasyonlu-düzensiz (IV), basamaklı-düzensiz (I). Açıklıkları birkaç mm'den 5 cm'ye varmaktadır. Bu süreksizlikler hem birbirlerini hem de kaynak alanda yamaç doğrultusuna paralel gelişmiş diğer süreksizliklerin neredeyse tamamını kesmektedir. Bu tip süreksizliklerin sayıca çokluğu, kısa mesafelerde çeşitli doğrultu ve eğim yönlerine sahip oluşları nedeniyle süreksizliklerin sınırladığı bloklar form bakımından şekilsiz, yarı prizmatik, yarı yuvarlaklaşmış görünüm kazanmıştır.

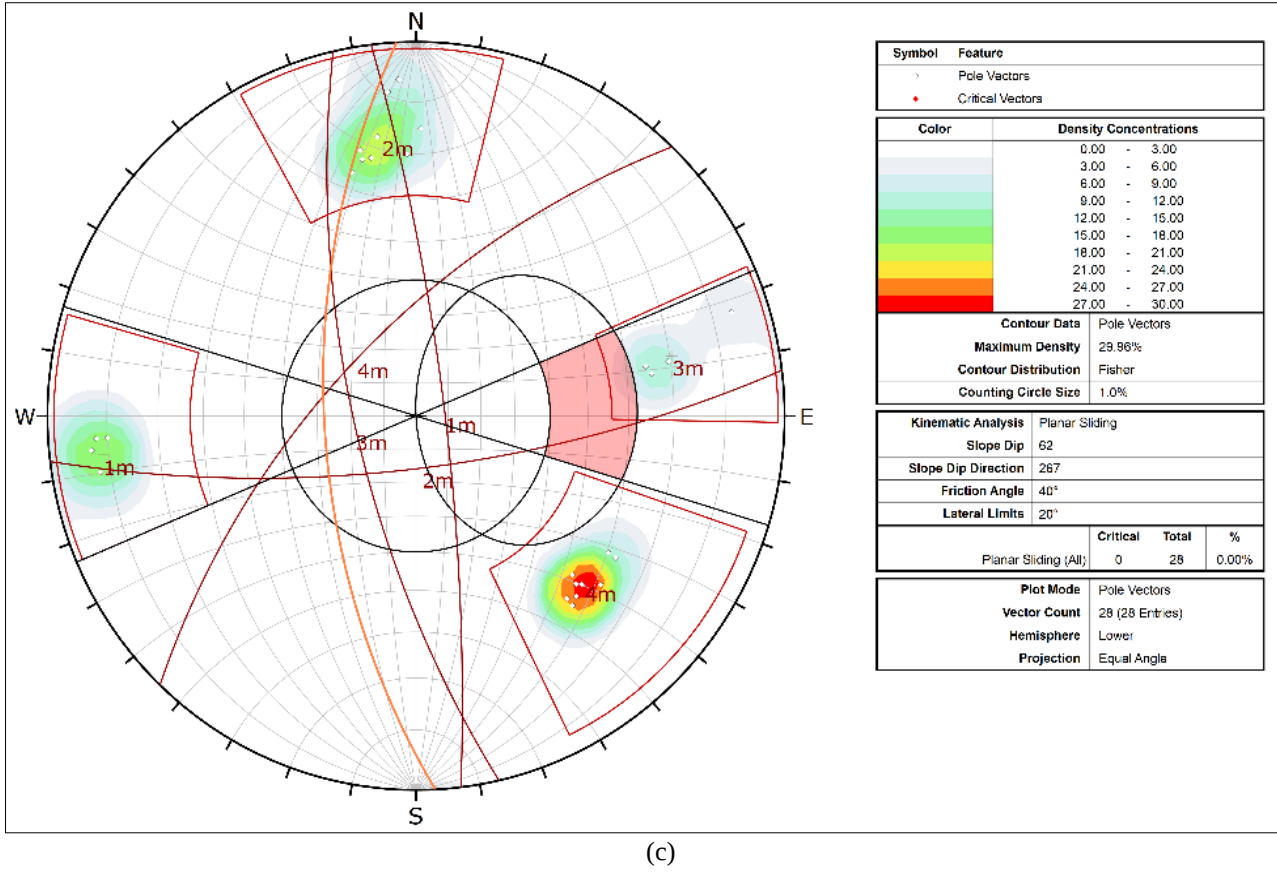
Kaynak alandaki süreksizliklerin eğim yönü ve eğim miktarları, içsel sürtünme açısı (40°), yamaç eğim yönü ve eğim miktarlarına ait veriler dikkate alındığında, yamaç yüzeyi boyunca yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre düşmesi muhtemel kaya blokları için kaynak alandaki yamaçtan kamalanma ve devrilme türü yenilmelerin görülmesi daha muhtemeldir (Şekil 7 ve Şekil 8). Burada düzlemsel kayma türü yenilmeler için kinematik analizlerde limit açı 20° olarak seçilmiştir (Hoek & Bray, 1977). Devrilme türü yenilmeler için limit açı değeri 30° olarak alınmıştır (Ulusay, 2001). Ayrıca düzensiz süreksizliklerle sınırlandırılmış yarı yuvarlak şekilli blokların çokluğu, bu tip blokların kaynak alandan koparak harekete geçme olasılığını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir.



(a)



(b)



Şekil 8: Ortaköy Köyü kaya düşmesi kaynak alandaki süreksizlik denetimli oluşabilecek duraysızlık türlerinin DİPS8.0 Kinematik Analizi sonuçları (a: Devrilme Türü Yenilme, b: Kamalanma Türü Yenilme, c: Düzlemsel Kayma Türü Yenilme) (Rocscience Inc., 2024).

Düşebilecek kaya bloğu kütleleri değerlendirildiğinde; 2.5 m³ hacimli bir kaya bloğu ağırlığının yaklaşık 6 ton olduğu kabulüne göre kaynak zonu yüzeyinde pasif ankrajlar ve tel ağlar ile stabilizasyon durumu: Günümüz teknolojisiyle üretilen tel ağlar mevcut kaya bloklarını taşıyabilecek kapasitedirler ancak, bu tip sistemler için sahada uygulanan pasif ankraj boyları 1.5 metreyi geçememektedir. Kaynak zon içerisinde A tipi süreksizliklerin kaynak zonu yamaç tepe seviyesinin 2 m arkasında da izleniyor oluşu nedeniyle 1.5 m uzunluğundaki pasif ankrajlar (yüzey ankrajları ve tepe ankrajları) yamaç yüzeyindeki stabilizasyon için yetersiz kalabilecektir. Daha derin pasif ankraj delgilerinin yapılması daha farklı bir makine ekipmanı gerektireceği gibi, açıklıkları 5 santimetreyi bulan süreksizlik sistemi (C Tipi süreksizlikler) içerisinde pasif ankraj enjeksiyonu yapılması da teknik açıdan farklı sorun ve güçlükler yaşatabilecektir. Böyle bir ortama süreksizlik düzlemlerini geçemeyecek uzunlukta yüzey ankrajlı çelik tel ağ ile stabilizasyon uygulamak, yamaç yüzeyine ilave yük anlamına da gelmekte, kaynak zonundaki kaya ortamının makaslama gerilmesini arttıracak bir uygulama olabileceği kanaatiyle, kaynak zon yamaç yüzeyinde çelik tel ağ imalatlı bir stabilizasyon uygulaması riskli bulunmuştur.

Kaynak zonu, yamaç yüzeyinde düşmesi muhtemel blokların stabilizasyonu için bir çelik tel ağ yerine, düşmesi muhtemel blokların yamaç yüzeyine dik, uygun çapta pasif ankrajlar ve blok ağırlığını taşıyabilecek kapasitede uygun çaplı çelik halatlar kullanılmalıdır. Bu önlemler kaynak zonundan yamaç tepe hattına 2.5 metreden yakın olmayacak şekilde ankraj yapılmalıdır. Böylece kaynak zonundaki blokların yalnızca bir bölümünün stabilizasyonu sağlanmış olur. Ancak bu işlem tek başına yeterli olmayacaktır. Her düşmesi muhtemel bloğun stabilizasyonu benzer şekilde sağlanamayacaktır; yarı serbest haldeki bloklar üzerinde yapılacak işlemler sırasında blokların düşme riskleri göz önünde bulundurulduğunda, yukarıda tanımlanan uygulama yalnızca kapalı süreksizliklerle sınırlandırılmış, gelecekte duraysızlık olasılığı olan bloklar için geçerlidir.

3.2. Kaynak Zon Alt Kotlarında Koruma Önlemi (Yüksek Enerji Sönümlemeli Kalıcı Kaya Bariyeri) Önerimi

Ortaköy köyü Yenice mahallesindeki kaya düşmesi risk ve tehlikelerine karşı stabilizasyon önlemlerinin ve tutucu hendekler, patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemlerinin yetersiz ve eksik bir uygulama olabileceği düşüncesiyle kalıcı kaya bariyerine yönelik analizler yapılması gerekliliği doğmuştur.

Bu örnek çalışmada Yenice mahallesindeki kaynak zon alt kotunda yapılabilecek yüksek enerji sönümlemeli esnek, kalıcı bir kaya bariyerinin hangi kotta konuşlandırılabilceği, düşünülen kot boyunca düşen kaya bloğunun hızı, enerjisi ve sıçrama yüksekliklerinin ne olacağı analizleri bir bilgisayar yazılımı ile değil, ampirik eşitlikler yardımıyla yapılmıştır.

Çalışma alanında yüksek enerji sönümlemeli kalıcı bir kaya bariyerinin nerede konumlandırılabilceği konusunda iki farklı yaklaşım söz konusudur:

1. Kaya bariyerine ait ana dikmelerin temel betonu ve temel ankrajları ile taşıyıcı ve fren sisteminin bulunduğu halat sisteminin ankraj uygulanacağı “sağlam” kaya ortamı boyunca bariyer hattının belirlenmesi; ardından belirlenen kottaki maksimum hız, maksimum enerji ve maksimum sıçrama yüksekliklerine göre kapasitesi belirlenecek bariyerin belirlenen hat boyunca monte edilmesi.

2. Düşme analizleri sonucunda, hız ve enerji verilerinin ile sıçrama yüksekliklerinin en az olduğu kotta, belirlenen değerlere göre kapasitesi olan bir bariyer montajının yapılması.

Burada, yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri imalatı için öncelikle sahada eğim yönüne dik konumlandırılabilcek hat veya hatlar boyunca çatlaksız/az çatlaklı, sağlam, ayrışma bakımından mümkün olduğunca taze yüzeylere sahip muhtemel hat güzergâhları çalışılmıştır. Bu güzergâhlar boyunca düşme analizleri sonucunda elde edilen hız, enerji ve sıçrama yükseklikleri belirlenmiştir. Bu hatlar belirlenirken sahada uyulması önemli hususlar vardır. Belirlenen hat boyunca bariyer dikmeleri arasında kot farkları olmamalı, her iki bariyer dikmesi arası hattın mümkün olduğunca eğim yönüne dik ($\pm 10^\circ$) olması durumu da bariyerlerin enerji sönümleme sırasında fren sistemlerinin optimum çalışmasını sağlayacaktır.

Yapılan saha çalışmalarında yukarıdaki şartların sağlanabileceği hatlar üzerinde kaya ortamı dayanım parametrelerine göre: 820 m kotu ile 720 m kotlarına kadar yamaç yüzeyindeki örtü kalınlığının 0-75 cm arasında değişmekte olduğu, örtü kalınlığının en fazla olduğu bölümün kaynak zon alt kotundaki birikme zonunda (820-800 m kotları arası) olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle sahada montajı yapılacak bir bariyerin birikme zonunda içerisindeki montajı uygun bulunmamıştır. Yamaç boyunca yüzeyde gözlemlenebilen kaya mostralarının orta derecede çatlaklı, az ayrışmış özelliklerde olup Schmidt çekici yardımıyla sahada yapılan testlerden dolayı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenmiştir. Yapılan Schmidt çekici testleri sonucundaki değerlendirmelerde yamaç yüzeyindeki kaya mostralarının tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin 55-110 MPa arasındadır. Bu haliyle kaynak zon alt kotundaki yamaç yüzeyi boyunca 720 m kotlarına kadar kaya ortamı yüzeyinde tek eksenli sıkışma dayanımının *Deere ve Miller (1966)*’a göre düşük-orta dayanımlı, International Society for Rock Mechanics’e (*Ulusay & Hudson, 2007*) göre orta dayanımlı olduğu anlaşılmaktadır.

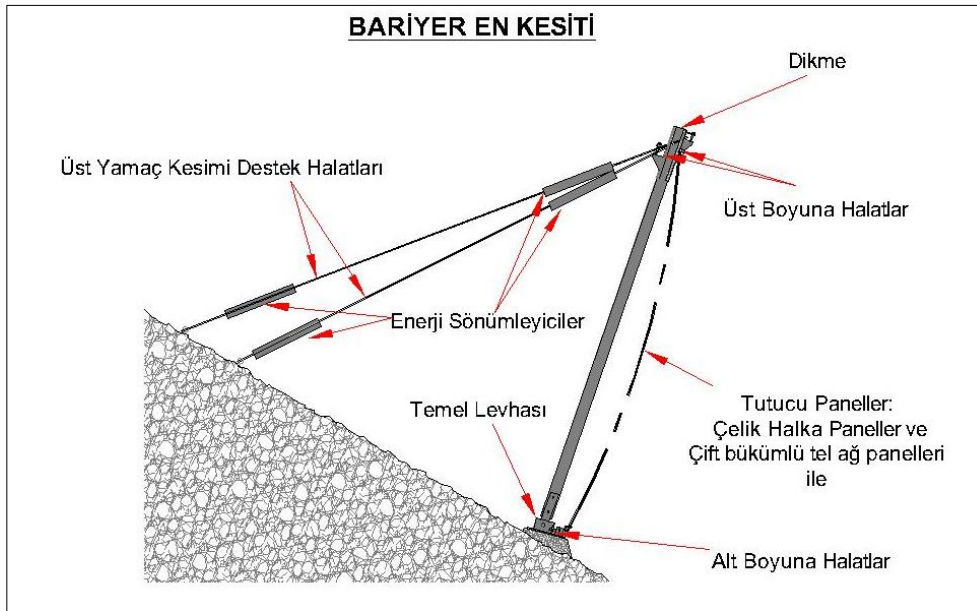
Kaynak zonun bittiği taban kotunda (820-800 m) bariyer planlaması yapılmamasının bir başka nedeni de kaynak zon yamaç yüzeyi topuğundaki süreksizliklerin mühendislik özellikleridir. Kaya bariyerini üst yamaca sabitleyecek ankraj noktaları güvenli bulunmamıştır. Örtü kalınlığının en az olduğu (0-30 cm), kaya mostralarının görülebildiği, 797-790 m kotlarıdır. 797-790 m kotları arasında, yamaç topografyası da yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri montajı için uygun (iki dikme arasındaki kot farkı 15 cm’nin de altında) bulunmuştur. Ayrıca kaya mostralarının yüzeydeki dayanım değerleri bakımından düşük dayanım değerlerini de içeriyor oluşu nedeniyle kaya bariyeri ankraj boyları 2 m olarak seçilmiştir. Yapılacak düşme analizleri sonucunda 797-790 m kotları için elde edilecek toplam kinetik enerji değerlerine göre montajı yapılması önerilecek esnek kaya bariyeri kapasitesine göre de ankraj çapları belirlenecektir.

3.3. Önerilen Esnek Kaya Bariyeri Hattı İçin Kaya Düşme Analizleri

Esnek kaya bariyerleri, kaya düşmesi hattı üzerine yerleştirilen ve böylelikle düşen blokların önünü keserek durdurmayı sağlayan enerji sönümleyici sistemlerdir (Şekil 9). Esnek kaya bariyerleri çelik dikme direkler, halat panel ağlar, ankrajlar, halatlar, fren sistemleri (enerji sönümleyiciler) ve temel levhasından oluşur (Şekil 10). Esnek kaya bariyeri uygulamalarında 1000 kJ üzerindeki kaya bariyeri imalatlarının *ETAG 027 (2013)* yönergesi dahilinde olmalıdır.



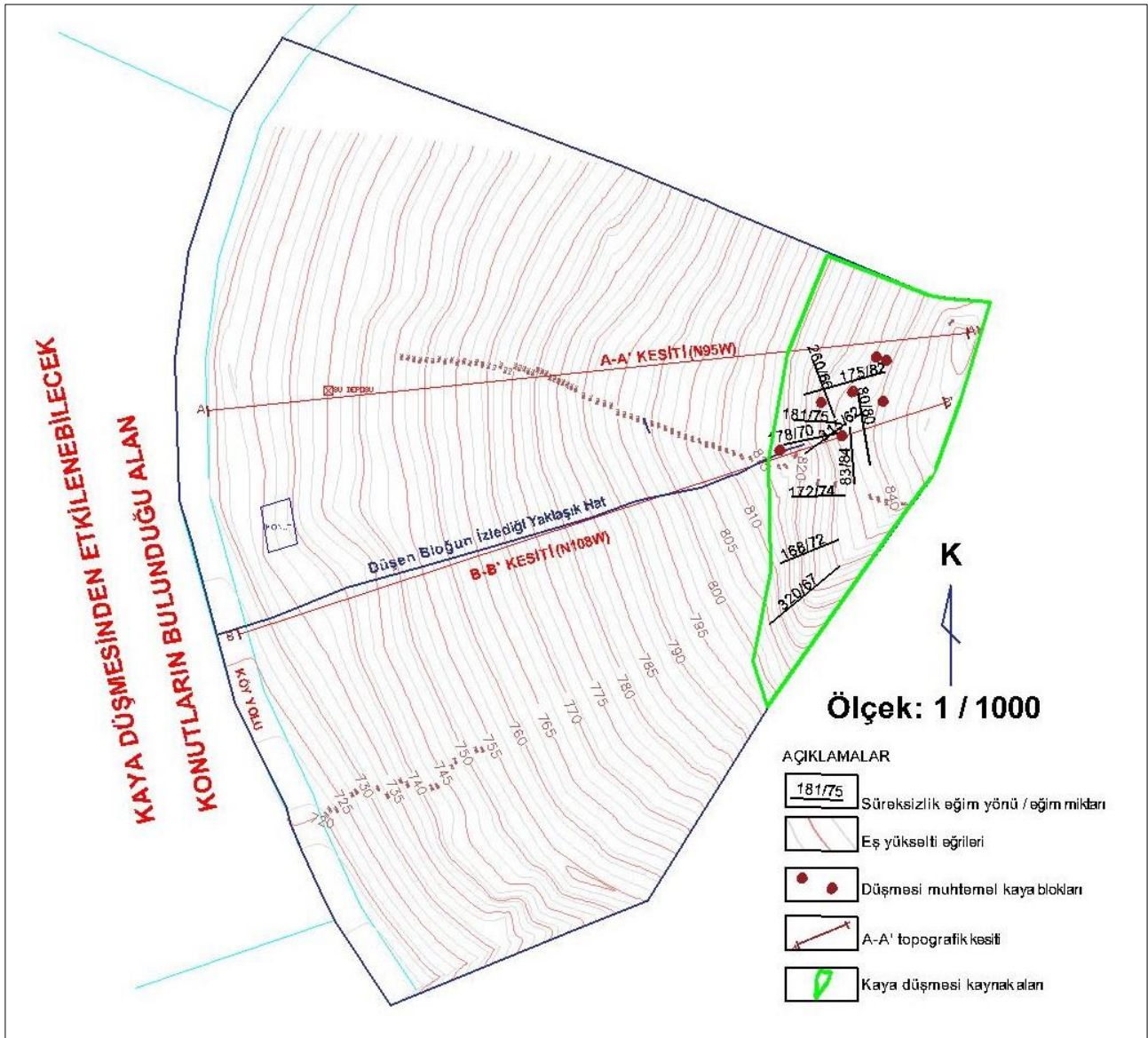
Şekil 9: Artvin İli merkez ilçesi, Ortaköy, Yenice mahallesinde imalatı yapılmış olan 3.000 kJ enerji sönmülemeli kaya bariyerinin kaynak zon üzerinden görünümü.



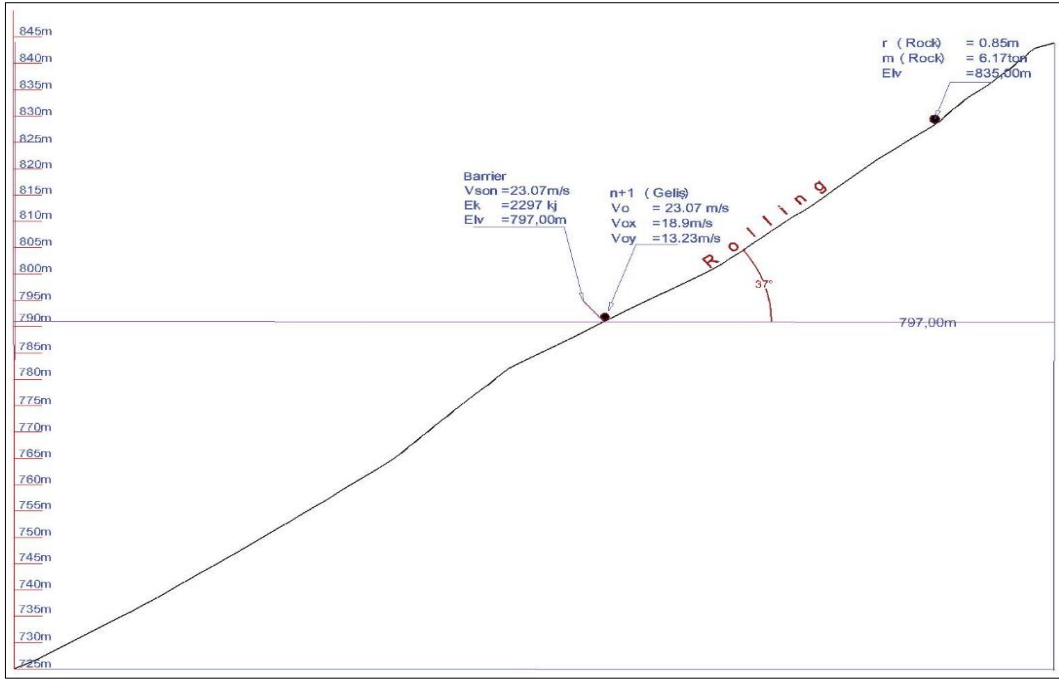
Şekil 10: Esnek Kaya Bariyeri Kesiti

Kaynak zon ile yerleşim alanı arasındaki yamacın tamamının 1/1.000 ölçekli topoğrafya haritası hazırlanmıştır. Saha çalışmalarıyla, kaynak zonunda ve kaynak zonu alt kotlarında ölçülen süreksizliklerin eğim yönü/eğim miktarı değerleri ile kaynak zonu içerisinde düşmesi muhtemel kaya blokları bu harita üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 11). Yenice mahallesinde 2011 yılı şubat ayında düşmüş olan kaya bloğunun kaynak alandan ayrıldığı nokta ile izlemiş olduğu yol ve düşmesi muhtemel diğer kaya bloklarının izleyebileceği muhtemel yolların topografik kesitleri çıkarılmıştır (Şekil 11). Böylelikle kaynak zon, yerleşik alan arasında, kaya bloğunun düşebileceği muhtemel doğrultularda farklı topografik profillerde 2 boyutlu kaya düşmesi analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, kaynak zonundaki düşmesi muhtemel kaya bloğunun bulunduğu alanın 45° 'nin altında ve 45° 'nin üzerinde olmak üzere iki ayrı kesit üzerinde yapılan düşme analizi örnek olarak sunulmuştur (Şekil 12). Kaynak zon içerisinde topografik eğim miktarının 45° 'nin üzerine çıktığı B-B' topografik kesit (Şekil 13 ve Şekil 14), aynı zamanda daha önce düşmüş olan bir kaya bloğunun yaklaşık olarak izlemiş olduğu yolu da temsil etmektedir. Düşme analizinde kaynak zonundaki kaya bloğunun küre şeklinde olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, kaynak zonu yamaç yüzey eğim miktarının 45° ve üzerinde olduğu noktaya küre şekilli cismin eğik düzlem üzerindeki hareketine yönelik prensiplerden ve ampirik Eşitliklerden faydalanılmıştır. Bu durumda; topografik eğimin 45° 'ye kadar olduğu yamaçlarda küre şekilli bir cismin "yuvarlanma" şeklinde hareketine başlayacağından (Ritchie, 1963), hareketin başladığı nokta ile yamaç eğim miktarının 45° 'nin üzerine çıkmış olduğu noktaya kadar olan düşeydeki kot farkına (h) bağlı V hızı Eşitlik 4'teki gibi hesaplanacaktır.

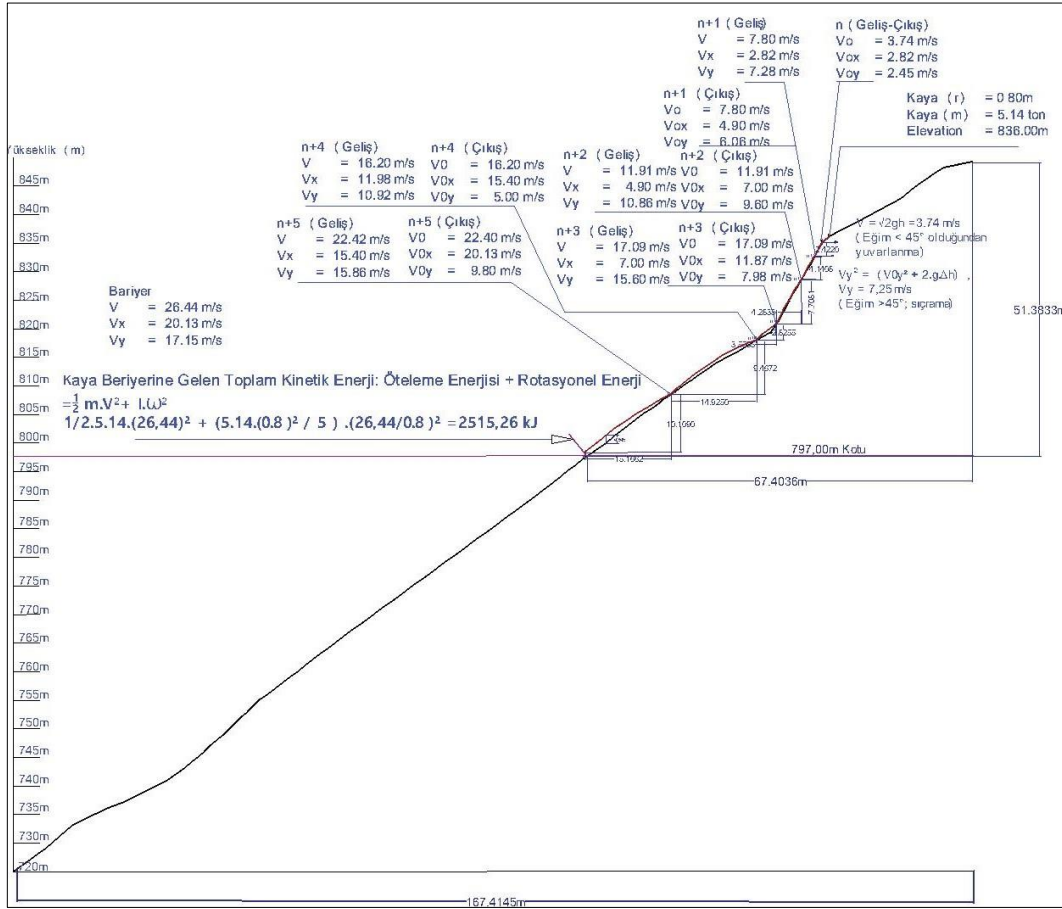
Burada cismin kazandığı hızın bileşke vektörünün yatay hız bileşeniyle yaptığı açı, yüzeyin topografik eğim açısına eşit olacaktır. Cisim (küre şekilli bir kaya bloğu), topografik eğimin 45° ve üzerine çıktığı noktada artık hareketine yuvarlanma şeklinde değil, sıçramalar yaparak devam edecektir. 45° 'nin üzerindeki yamaç yüzeyine temas edilen her bir nokta arasında kaya bloğunun sıçrama yaparak aldığı yol, yörünge (trajectory) olarak tanımlanmaktadır. Hareket boyunca ortaya çıkan öteleme hızları için Newton mekaniği esas alınmaktadır (Wyllie, 2015). Burada topografik eğimin 45° 'nin üzerine çıktığı noktaya kadar blok hareketine yuvarlanma şeklinde devam ederken, topografik eğim açısının 45° 'nin üzerine çıktığı noktadan sonra ilk hareketine eğik atış hareketi prensiplerine göre devam edecektir. Kaya bloğunun yüzeye çarpma anı, esnek çarpışma olarak değerlendirilmiş, çarpma sonrası bloğun izleyeceği yeni yörünge; kaya bloğunun düzleme geldiği açıyla hareketine devam edeceği kabulü yapılmıştır. Yenice mahallesinde düşen kaya bloğunun sahadaki düşme izleri takip edildiğinde, kaya bloğunun hareket hattı, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiş olan topografik kesitler (B-B' kesiti) doğrultusuna oldukça yakındır. Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'teki kesitlerde de görüleceği üzere, 836 m kotunda kütlesi 5.14 ton olan kaya bloğunun düşme analizinde V_0 ilk hızıyla yuvarlanma şeklinde hareketine başlayıp topografik açının 45° 'nin üzerine çıktığı ilk nokta (n) olarak isimlendirilmiştir. Daha sonraki her bir temas noktası (n+1), (n+2), (n+3), (n+4).....şeklinde devam etmektedir.



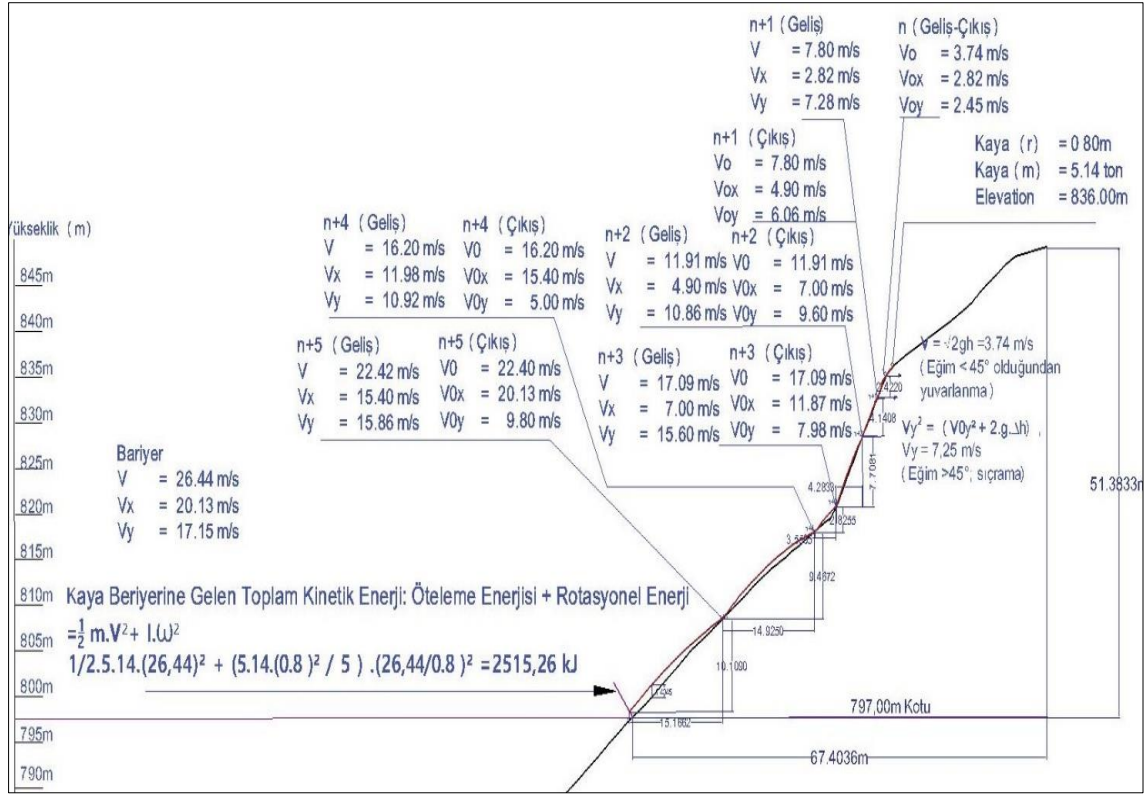
Şekil 11: Ortaköy Köyü Yenice mahallesi-kaynak alan arasındaki yamaçın topoğrafya haritası ve bu harita üzerinde düşen bloğun izlediği yol ile analiz yapılan topoğrafik kesit doğrultuları



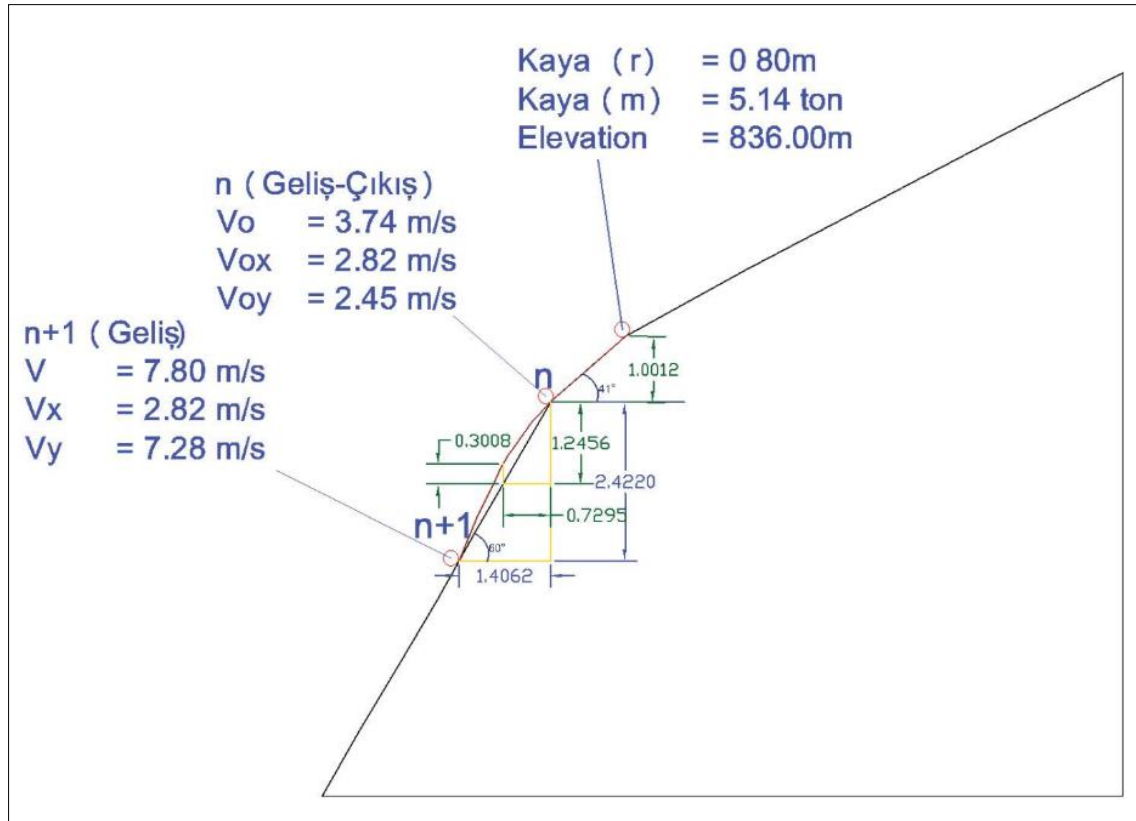
Şekil 12: A-A' topografik kesit üzerinde kaya düşmesi analizinin görünümü



Şekil 13: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinin görünümü



Şekil 14: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinin ayrıntı görünümü



Şekil 15: Kaya bloğunun 836-832,60 m kotları arasındaki hareketi

Blok, ilk noktadan (n) noktasına gelene kadar hareketine yuvarlanma şeklinde devam edeceğinden (n) noktasına (topografik eğim (β) = 41° , $h = 1$ m, $g = 9.81$ m/s²) vardığındaki hızı Eşitlik 6'dan,

$$V = 3.74 \text{ m/s}$$

$$V_x = V \cdot \cos 41 = 2.82 \text{ m/s}$$

$$V_y = V \cdot \sin 41 = 2.45 \text{ m/s olacaktır.}$$

Yukarıdaki hız değerleri aynı zamanda (n) noktasından (n+1) noktasına sıçrama yaparak ilerleyecek kaya bloğu için V_0 , V_{0x} ve V_{0y} değerleridir. Yukarıdaki hız değerleriyle hareketine başlamış bir kaya bloğunun ilk temas noktası olan (n+1) noktasının (n) noktasıyla olan kot farkı (h), Eşitlik 12 ve 13'den;

$$h = -x \cdot \tan 60 = -1.73x$$

$$h = \left(\frac{g}{2}\right) \left(\frac{x}{V_0} \cdot \cos \alpha\right)^2 + x \cdot \tan \alpha = 0.2025x^2 + 0.869x$$

$$\Rightarrow h = \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{V_0 \cos \alpha}\right)^2 + x \cdot \tan \alpha \text{ eşitliği ile elde edilecek sonuç } \Rightarrow h = 0.6071x^2 + 0.869x \text{ olacaktır.}$$

$$1.73x = 0.6071x^2 + 0.869x,$$

$$x = 1.4 \text{ m, } h = 2.4 \text{ m olarak bulunur.}$$

Bu noktadaki çarpma hızı için önce düşey bileşen olan V_y Eşitlik 10'dan

$$V_y = \sqrt{V_{0y}^2 + 2g\Delta h},$$

$$V_y = \sqrt{(2.45)^2 + 2 * (9.81) * 2.4} = 7.28 \text{ m/s}$$

$$V_x = V_{0x} = 2.82 \text{ m/s olduğundan,}$$

(n+1) noktasındaki çarpma hızı Eşitlik 11'den,

$$V = \sqrt{V_y^2 + V_x^2} = \sqrt{7.28^2 + 2.82^2} = 7.80 \text{ m/s olacaktır.}$$

(n) ve (n+1) noktaları arasındaki sıçrama esnasında bloğun kazanabileceği maksimum yükseklik Eşitlik 14, 15, 16, 17 ve 18'den; $h_{max} = 0.30 \text{ m}$,

Maksimum yüksekliğe ulaştığı noktanın başlangıç noktasına (n) olan yatay mesafesi;

$$X = 0.72 \text{ m olarak bulunur.}$$

Bu noktaya karşılık gelen h değeri Eşitlik 12'den, $h = 1.24 \text{ m}$ olarak bulunur (Şekil 16).

Bloğun temas noktasına (n+1) geliş açısı, Eşitlik 19'dan;

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) = \arctan\left(\frac{7.28}{2.82}\right) = 68.8^\circ$$

Kesit boyunca yukarıdaki Eşitlikler kullanılarak kaya bloğunun yüzey temas noktaları ve yörüngeleri kesit üzerinde işaretlenerek çizilir. Bu çalışmada maksimum hız ve enerjilerin bulunabilmesi amacıyla esnek çarpışma modeli uygulanmıştır. Bloğun yüzeye geliş açısı ile çarpma sonrası yüzeyden ayrılış açısı birbirine eşit olacaktır. Sıçrama esnasındaki bileşke hız, çarpma anındaki bileşke hıza eşittir. Yapılan analiz sonucunda, 839 m kotu ile 797 m kotları arasında kaya bloğunun 5 ayrı noktada yüzey ile temas ettiği görülmektedir. (n) ve 797 m kotları arasında kaya bloğunun izlediği yörüngede, (n) noktası "0" başlangıç noktası kabul edilirse;

2 nolu topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinde, 797 m kotuna kadar kaya bloğunun ulaşabildiği maksimum yükseklik değeri (n+5) ile bariyer arasında, 802 m kotlarında 1.45 m olarak tespit edilmiştir.

Bariyerin konulmak istendiği 797 m kotunda ise sıçrama yüksekliği Rocfall8.0 yazılımına göre yaklaşık 65 cm, manuel hesaplara göre yaklaşık 96 cm olduğu tespit edilmiştir. Blok, daha alt kotlarda enerjisini (hızını) artırarak hareketine devam edeceğinden daha yüksek sıçrama değerlerini yakalayacaktır. Bariyerin önerildiği 797 m kotundaki toplam kinetik enerji, Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'ten 2515.26 kJ olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 4 ile, 836 m kotunda 5.14 ton ağırlığındaki bir kaya bloğunun 797 m kotuna göre potansiyel enerjisinin de en az 1966.5 kJ olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 1'de, 2 nolu topografik kesit üzerinde kaya bloğunun hareketine başladığı ilk noktadan itibaren (n) izlediği yörünge ve hızları ile 797 m kotundaki bariyere gelen toplam kinetik enerji değerleri verilmiştir.

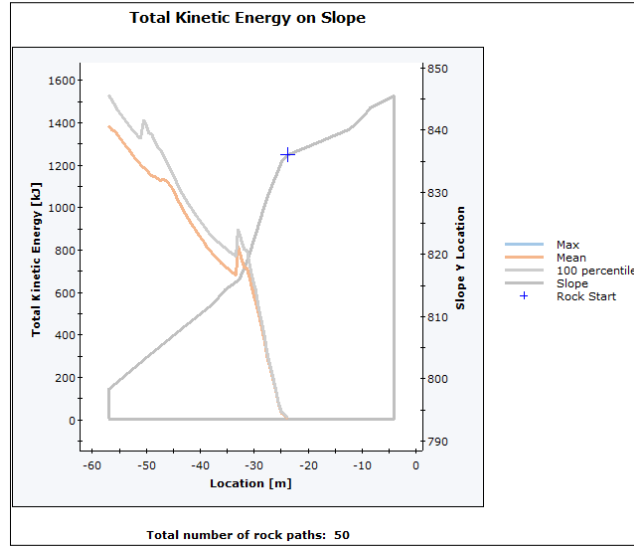
İnceleme alanındaki kaynak zon alt kotunda yer alan yamaç yüzeyi boyunca düşmesi muhtemel kaya bloklarına engel olabilecek yapısal bir unsurun olmayışı, blok hızlarının hareket süresi boyunca artacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla yamaç yüzeyinde 797 m altında daha fazla enerji ve de daha fazla sıçrama yükseklikleriyle karşılaşılacaktır (Şekil 16). Yapılan bu kaya düşmesi analizinin, kaya düşmesi analizleri konusunda sıklıkla kullanılan Rocscience Rocfall8.0 yazılımı ile karşılaştırıldığında (Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19) 2 numaralı kesitte hesaplanan düşme analizinde 797 m kotunda toplam kinetik enerjinin 1600 kJ civarında, sıçrama yüksekliğinin ise yaklaşık 65 cm olduğu görülür. Aradaki enerji farkının sebebi, burada yazılımın yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarını da dikkate almasından kaynaklanmaktadır. Güvenli tarafta kalma adına yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarının hesaplarımızda ihmal edilmesinin nedeni, eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerinin gerçekleşebilme olasılığıdır.



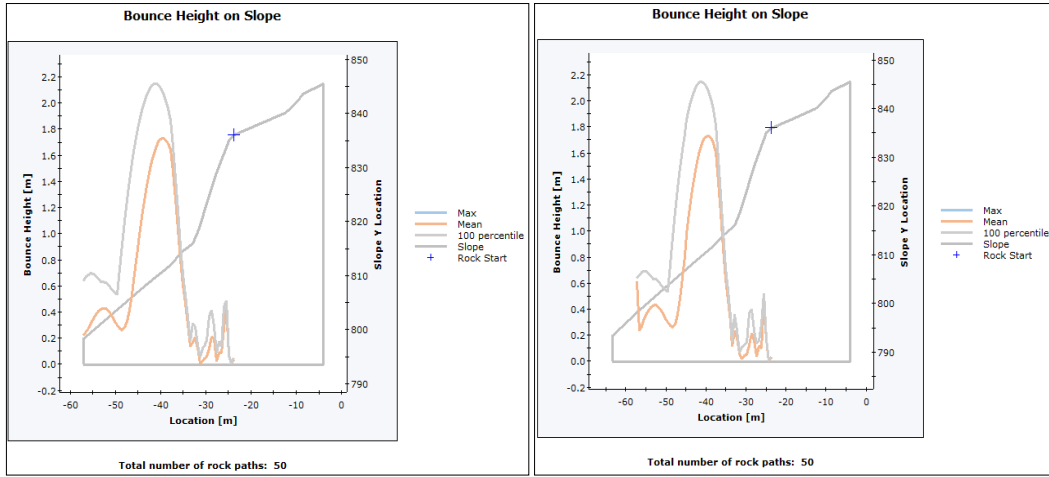
Şekil 16: Kaynak alan alt kotlarında, düşen kaya bloğunun yamaç yüzeyinde (760-750 m kotları) sıçrama yüksekliklerinin 3 metrenin üzerine çıktığı anlaşılmaktadır.

Tablo 1: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan kaya düşmesi analizinde bloğun yüzey temas noktaları, yörüngesine ait koordinatları ve temas noktalarına geliş/çıkış hızları

Nokta No	Temas Noktası H (m)	Temas Noktası X (m)	Geliş Hızları (m/s)	Çıkış Hızları (m/s)
n	0.00	0.00		$V_0=3.74$ $V_{0x}=2.82$ $V_{0y}=2.45$
n+1	-0.29	-0.28		
	-0.69	-0.56	$V=7.80$	$V_0=7.80$
	-1.18	-0.85	$V_x=2.82$	$V_{0x}=4.90$
	-1.77	-1.13	$V_y=7.28$	$V_{0y}=6.06$
	-2.42	-1.40		
n+2	-0.66	-0.49		
	-1.40	-0.98	$V=11.91$	$V_0=11.91$
	-2.26	-1.47	$V_x=4.90$	$V_{0x}=7.00$
	-3.21	-1.96	$V_y=10.86$	$V_{0y}=9.60$
	-4.14	-2.46		
n+3	-0.49	-0.35		
	-1.01	-0.70		
	-1.55	-1.05		
	-2.12	-1.40		
	-2.71	-1.75		
	-3.17	-2.02	$V=17.09$	$V_0=17.09$
	-3.96	-2.45	$V_x=7.00$	$V_{0x}=11.87$
	-4.62	-2.80	$V_y=15.60$	$V_{0y}=7.98$
	-5.31	-3.15		
	-6.03	-3.50		
	-7.53	-4.20		
	-7.71	-4.28		
n+4	-0.85	-1.19	$V=16.20$	$V_0=16.20$
	-1.79	-2.37	$V_x=11.98$	$V_{0x}=15.40$
	-2.30	-2.97	$V_y=10.92$	$V_{0y}=5.00$
	-2.84	-3.55		
n+5	-0.10	-0.31		
	-0.32	-0.92		
	-0.55	-1.54		
	-1.94	-4.62	$V=22.42$	$V_0=22.40$
	-2.78	-6.16	$V_x=15.40$	$V_{0x}=20.13$
	-4.77	-9.24	$V_y=15.86$	$V_{0y}=9.80$
	-7.14	-12.32		
	-8.47	-13.86		
Bariyer	-9.47	-14.93		
	-1.03	-2.01	$V=26.44$	
	-3.38	-6.04	$V_x=20.13$	
	-6.13	-10.07	$V_y=17.15$	
	-9.26	-14.09	$E_k=2515.26 \text{ kJ}$	
	-10.10	-15.16		



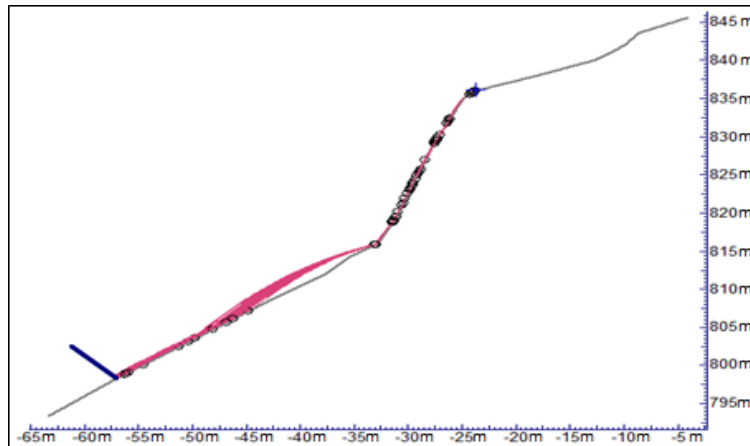
Şekil 17: B-B' topografik kesit üzerinde kaya düşmesi analizinde toplam kinetik enerjinin Rocfall8.0 yazılımında görünümü



(a)

(b)

Şekil 18: B-B' topografik kesit üzerinde bariyersiz (a) ve bariyerli (b) sıçrama yüksekliklerinin Rocfall8.0 yazılımında görünümü



Şekil 19: B-B' topografik kesit üzerindeki düşme yörüngelerinin Rocfall8.0 yazılımı ile yapılan bariyerli düşme analizi görünümü (Rocscience Inc., 2023)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Kaynak alandaki süreksizliklerin mühendislik özellikleri ve kaynak alan yamaç geometrisi dikkate alınarak değerlendirilen kinematik analiz sonuçlarına göre kaynak alan yamaç yüzeyindeki yenilmelerin daha çok kamalanma ve devrilme şeklinde gerçekleşebileceği sonucuna varılmaktadır. Süreksizliklerin mühendislik özellikleri nedeniyle kaynak alan yamaç yüzeyinde kaya düşmelerine karşı doğrudan bir çelik ağ ile örtüleme işlemi uygun bulunmamıştır. Bu işlemde kaynak alan yamaç yüzeyine ve yamaç tepe hattına sistematik olarak yerleştirilecek 1.5-2.0 m boyundaki pasif ankraj (yüzey ve tepe ankrajları) uygulaması sırasında duraylı zonun dışında kalan ankrajlar kaynak alan yamaç yüzeyindeki makaslama gerilmelerinin artmasına sebep olacaktır. Yapılan değerlendirmelerden sonra, kaynak zonu bitiminde yamaç yüzeyinde yüksek enerji sönümlemeli kalıcı bir kaya bariyeri uygulaması için en uygun kot olan 797 m kotundaki darbe enerjilerinin hesaplamalara göre toplamda 2297 kJ ile 2515.26 kJ arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Sıçrama yüksekliği ise B-B' topografik kesite göre 797 m kotunda 96 cm olduğu görülür. Kaynak zon ile 797 m arasında maksimum sıçrama yüksekliği 802 m kotlarında 1.45 m değeri elde edilmiştir. Bilgisayar yazılımında ise 802 m kotunda bu değer yaklaşık 2.11 cm'dir. Sahada, kaya ortamının tek eksenli sıkışma dayanımını belirlemek için yapılan Schmitd çekici testlerinde dayanım değerlerinin 55-110 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmak amacıyla hesaplamalarda dayanım değerleri 55-80 MPa aralığında kabul edilmiştir. Bu değerlere göre ankraj boylarının 2 metrenin altında olmaması önerilmiştir. Ancak dayanım testlerinin laboratuvar ortamında doğrudan tek eksenli deneye tabi tutulması daha doğru bir yaklaşım olarak görülmektedir. Kaya düşmesi analizlerinde, bitkisel örtüye ait (ağaçlık, ormanlık sahalar) enerji ve hız sönümlerinin dikkate alınmaması önerilir. Eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerine bağlı olarak bu tür ortamlar enerji ve hız sönümlemelerine dair beklenen etkiyi göstermeyecektir; ilk düşen blok veya blokların ağaçları yıkarak ya da devirerek arkasından gelecek blok veya bloklar için engelsiz bir düşme hattı açabileceği unutulmamalıdır.

Yenice mahallesi kuzey doğusundaki kaynak zon alt kotunda (797 m) konulacak bir kalıcı esnek kaya bariyeri için 2 ayrı kesit üzerinde hesaplanan toplam kinetik enerji değerleri 2297-2515.26 kJ olarak tespit edildiğinden, 797 m kotunda konulacak bir kaya bariyerinin enerji sönümleme kapasitesi en az 3000 kJ olarak tasarlanmıştır. Topoğrafik kesitler üzerinde yapılan düşme analizlerinde 797 m kotunda maksimum toplam kinetik enerji değerinin yaklaşık 1600 kJ, aynı kotta (797 m) maksimum sıçrama yüksekliğinin ise yaklaşık 65 cm olduğu görülmüştür. Bilgisayar yazılımına göre B-B' topografik kesit üzerinde en fazla sıçrama yüksekliği, 812 m kotlarında 2.15 m civarındadır. Görüldüğü üzere, yapılan hesaplamalar ile bilgisayar yazılımı karşılaştırıldığında, B-B' topografik kesit üzerinde düşme hattı boyunca maksimum sıçrama yükseklikleri ve düşüş yörüngeleri arasında büyük farklar bulunmamaktadır. Toplam kinetik enerji bakımından bilgisayar yazılımı ile aradaki farkın sebebi ise, hesaplamalarda yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarının güvenli alanda kalınması amacıyla ihmal edilmesidir. Güvenli alanda kalma öngörüsü; eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı blok düşmelerinin gerçekleşebilme olasılığı nedeniyle.

Yapılan düşme analizleri sonucunda, kaynak zon alt kotlarında (797-790 m) enerji kapasitesi ve sıçrama yükseklikleri de göz önünde bulundurulduğunda en uygun bariyer hattının 797 m kotu olduğu tespit edilmiştir: 797 m kotu altında blok sıçrama yükseklikleri 3 metrenin de üzerine çıkabilmekte, ayrıca kaya bloğunun temas noktasındaki toplam kinetik enerjisi de artmaktadır. Düşen bir bloğun enerjisinin ve sıçrama yüksekliği değerlerinin artmasına izin verilmemesi gerektiği düşünüldüğünde, 797 m kotunun yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri için uygun bir hat olduğu kanaatine varılmıştır. Bu durumda, 797 m kotunda ETAG 027 (2013) yönergesi dahilinde $h = 5$ m yüksekliğine sahip, 3000 kJ enerji sönümlemeli esnek kaya bariyeri uygulaması gerekmektedir. Yapılacak bariyerin hat uzunluğu ise, daha önce düşmüş kaya bloklarının düşme hatları, düşmesi muhtemel blokların muhtemel düşme doğrultuları, mevcut yamaç topoğrafik eğim değerleri göz önüne alındığında 70 m uzunluğunda olacaktır.

Geçen süre zarfında 2.5 m^3 'ten daha küçük boyutlu ($0.5\text{-}1.0 \text{ m}^3$ arasında) az sayıda kaya blokları düşmüş, ancak yüksek enerji sönümlemeli esnek kaya bariyeri nedeniyle yerleşim alanına ulaşamamışlardır. Kaynak zondaki 2 m^3 veya daha büyük boyutta tespit edilmiş düşmesi muhtemel kaya blokları, çoklu blok düşmelerinin de önüne geçilebilmesi amacıyla kaynak zon üst kotlarındaki uygun kaya ortamlarına çelik halatlar ile ankrajlanarak stabilizasyon sağlanmıştır. Bu uygulama, kaya bariyerinin sahadaki ömrünü de uzatmıştır. Bu türde kaya ıslahı imalatlarının belirli aralıklarla kontrol edilmesi, kaya düşmesine maruz kalıp kalmadıklarının incelenmesi gerekir; 2 m^3 veya daha büyük boyutlu bir kaya bloğunun bariyere ulaşması halinde kaya bariyerine ait elemanların (fren sistemi, halat panel ağ gibi) bakım ve onarımının da yapılması gerekir.

Teşekkür

Kaynak zondaki süreksizlik denetimli yenilmelerin analizleri için Rocscience Dips8.0 deneme sürümü kullanılmıştır. Yazarlar, çalışmanın gerçekleşmesinde kullanılan verileri sağlayan İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü ile çalışmadaki kaya düşmesi analizleri için Rocscience Rocfall8.0 yazılım desteği sağlayan Dynamica Mühendislik firmasına teşekkür eder.

Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020). *Kaya düşmelerinden kaynaklı afetlerin değerlendirilmesine yönelik teknik kılavuz*. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Yayını.
- Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics*, 13(9), 255–279.
- Caltrans. (2020). *Caltrans geotechnical manual – Rockfall Section*, California Department of Transportation. 15 Ocak 2025’de <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/geotechnical-services/202012-gm-rockfall-a11y.pdf> adresinden alındı.
- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock* (Technical Report No. AFWL-TR-65-116). Air Force Weapons Laboratory, Research and Technology Division. <https://doi.org/10.21236/ad0646610>
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rock fall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69-87.
- ETAG 027. (2013) *Guideline for European technical approval for falling rock protection kits*. EOTA (European Organization for Technical Approvals). <https://www.eota.eu/sites/default/files/uploads/ETAGs/etag-027-april-2013.pdf>
- Evans, S., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 620–636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1977). *Rock slope engineering*. The Institute of Mining and Metallurgy.
- Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. (1998). *Artvin ilinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. (2012). *Artvin F47-F48-G46-G48 paftaları sayısal jeoloji haritaları*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record*, 17, 13–28.
- Rocscience Inc. (2023). *RocFall version 8.0 – Statistical analysis of rockfalls*. <https://www.roscience.com>
- Rocscience Inc. (2024). *Dips version 8.0 – Graphical and statistical analysis of orientation data*. <https://www.roscience.com/portal/free-trials>
- Ulusay, R. (2001). *Uygulamalı jeoteknik bilgiler*. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını.
- Ulusay, R., & Hudson, J. A. (Eds.). (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization: Testing and Monitoring (1974-2006)*. ISRM Turkish National Group.
- Wang, T., & Lee, Y. C. (2012). Simulation and statistical analysis of motion behavior of a single rock fall. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 16(1), 17–26.
- Wyllie, D. C. (2014). *Rock fall engineering: development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways*. The University of British Columbia.
- Wyllie, D.C. (2015). *Rock fall engineering*. CRC Press.