

Harşena Dağı Civarında Kaya Düşmeleri ve Süreksizlik Denetimli Yamaçların Kinematik Analizi

Eroltan Durmuş^{1,*}, Özkan Coruk², Tayfun Gül³, Ebru Yıldırım¹

¹Amasya İli Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 05100, Amasya.

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

³Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 41100, Kocaeli.

Özet

Amasya ili, Merkez ilçesi, Hatuniye, Helkız ve Kurşunlu Mahallelerinin bir kısmı kaya düşmesi riski altındadır. Bu Mahalleler, Harşena Dağı'nın eteklerinde kurulmuştur. Harşena Dağı'mı oluşturan kireçtaşlarındaki süreksizliklerin mühendislik özellikleri, kireçtaşlarının ayrışma durumu ve mevcut topografik konumu, ortamda kaya düşmeleri ve yamaç duraysızlıklarını artırmaktadır. Bu duraysızlıkların araştırılması amacıyla, Harşena Dağı eteklerindeki meskun alanlar, demiryolu güzergahı ve tarihi sit alanları için süreksizlik-denetimli kinematik analizler yardımıyla duraylılık değerlendirmeleri yapılmış; ayrıca kaya düşmesi tehlikesi görülen yamaçlarda 3 boyutlu kaya düşmesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaya düşmesi analizlerinde, LiDAR teknolojisi ve nokta bulutu tekniği kullanılarak sahanın üç-boyutlu sayısal haritası çıkarılmıştır. Sahada tespit edilen düşmesi muhtemel kaya bloklarının konum ve hacimleri bu sayısal harita üzerine işlenmiştir. Yamaç duraylılığı analizlerinde, kaya kütlelerinde çeşitli gerilme mekanizmalarına bağlı olarak gelişen süreksizlik düzlemlerinin eğim ve eğim yönleri kullanılarak stereografik projeksiyon metodundan yararlanılmış ve yamaçların duraylılık koşulları incelenmiştir. Analizler sonucunda Hatuniye ve Helkız Mahallerinin sınırları içerisinde kalan meskun alanlarda, demiryolu güzergahında ve tarihi yapıların bulunduğu lokasyonlarda kaya düşmesi ve yamaç duraysızlığı riskleri belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Kaya Düşmesi, Kinematik Analiz, Stereografik Projeksiyon, Süreksizlik

Rockfalls and Kinematic Analysis of Discontinuity-Controlled Slopes in the Vicinity of Mount Harşena

Abstract

Certain parts of the Hatuniye, Helkız, and Kurşunlu Quarters, in the central district of Amasya province are at risk of rockfall hazards. These quarters are situated at the foothills of Mount Harşena. The engineering properties of discontinuities within the limestone forming Mount Harşena, the degree of weathering of the limestone, and the prevailing topographic conditions contribute to the occurrence of rockfalls and slope instabilities in the area. To investigate these instabilities, stability assessments were conducted for residential areas, the railway route, and historical sites along the lower slopes of Mount Harşena using discontinuity-controlled kinematic analyses; additionally, three-dimensional rockfall analyses were performed on slopes identified as potentially hazardous. For the rockfall analyses, a three-dimensional digital terrain model of the site was generated using LiDAR technology and point cloud techniques. The locations and volumes of potentially unstable rock blocks identified in the field were mapped onto this digital model. In the slope stability assessments, stereographic projection methods were employed to examine the stability conditions of the slopes by analyzing the dip and dip direction of discontinuity planes formed in the rock mass due to various stress mechanisms. Based on the analyses, rockfall and slope instability risks were identified in the residential areas within the boundaries of Hatuniye and Helkız Quarters, along the railway route, and in locations containing historical structures.

Keywords

Rockfall, Kinematic Analysis, Stereographic Projection, Discontinuity

1. Giriş

Kaya düşmesi, dik veya dike yakın yamaç ve şevlerde ekzojenik bir unsur olan yerçekiminin etkisiyle fiziksel ayrışma, donma-çözülme döngüleri, bitki kökleri ya da deprem gibi tetikleyici faktörlerle oluşmaktadır. Kaya kütlelerinden (rock-mass) kopan irili ufaklı parçaların (intact-rock) aniden aşağı yönlü hareketi sonucunda meydana gelmektedir. Bu olay canlılar, yerleşim alanları, yollar ve altyapılar için ciddi tehditler oluşturarak önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Kaya kütlelerinde sürekliliği bozan doğal veya yapay olarak oluşmuş çekme dayanımı oldukça düşük zayıflık yüzeyleri olan süreksizlik düzlemlerinin dağılımı ve yönelimi kaya düşmelerini ve yamaçların duraylılık davranışını doğrudan etkilemektedir (Goodman, 1989; Ulusay & Sönmez, 2007).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 3033143 Faks: +90 (262) 3031033

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

gultyfun@gmail.com (Gül T.), ebruezgi05@gmail.com (Yıldırım E.)

Gönderim Tarihi / Received : 01/05/2025

Kabul Tarihi / Accepted : 31/07/2025

Süreksizlik düzlemleri (süreksizlikler) kaya ortamının mühendislik davranışını etkileyerek şev duraylılık koşullarını değiştirmekte, kaya düşmesine ve şev yenilmelerine neden olmaktadır (Wyllie, 2017). Kaya kütlesi içerisinde süreksizlikler ile sınırlandırılmış kaya blokları doğal veya yapay nedenlere bağlı olarak belirli bir eğime sahip yamaçların yüzeyinden koparak-kayarak kaya düşmesi ve şev yenilmelerini meydana getirmektedir (Durmuş vd., 2025).

Çalışma kapsamında Amasya ili, Merkez ilçesi Harşena Dağı eteklerine kurulu olan Hatuniye, Helkız ve Kurşunlu Mahalleleri için kaya düşmesi ve kaya düşmesiyle doğrudan bağlantılı olan mevcut şevlerin düzlemsel, kamusal ve devrilme türü duraylılık koşulları incelenmiştir. Harşena Dağı'nın doğu, güney ve batı yamaçlarında şev yüzeylerinin duraylılığını doğrudan etkileyebilecek süreksizlikler dikkate alınarak, LiDAR (Light in Detection and Ranging) teknolojisi ve nokta bulutu yönteminden yararlanılıp 3-boyutlu (3D) kaya düşmesi analizi Rocfall3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İncelemenin yapıldığı lokasyonlarda meskun alanları kapsayan bölgede, demiryolu güzergahı ve tarihi tescilli yapıların bulunduğu kesimlerde riskleri tespit edebilmek amacıyla sahada süreksizlik düzlemlerine ait eğim (dip) ve eğim yönü (dip direction) ölçülerek, şevlerin doğal şartlar altında duraylılık koşulları kinematik analiz yöntemi kullanılarak Dips yazılımı yardımıyla incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

LiDAR yöntemi lazer ışınlarını kullanarak bir yüzeyin üç-boyutlu geometrisini yüksek hassasiyetle belirleyen bir uzaktan algılama teknolojisidir. İncelenen yüzeylere gönderilen lazer ışını darbelerinin dönüş süresinden mesafe hesapları yapılarak her biri üç-boyutlu koordinatlara sahip milyonlarca veri noktasından oluşan ayrıntılı nokta bulutu (point cloud) modeli oluşturulmaktadır. Bu çalışmada da kaya düşmesi ve yamaç duraysızlığının söz konusu olduğu Harşena Dağı ve yakın çevresinde LiDAR teknolojisi ve nokta bulutu verileri kullanılarak alanın üç boyutlu (3D) sayısal görüntüsü elde edilmiştir.

Dips8.0 ve Rocfall3D Rocscience Inc. (2025) yazılımlarından yararlanılarak Hatuniye, Helkız ve Kurşunlu Mahalleleri için kaya düşmesi ve yamaç duraysızlıkları belirlenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Sahada yapılan incelemelerden elde edilen bulgular ve hava fotoğraflarından Harşena Dağı'nda düşmesi muhtemel kaya bloklarının konumu, hacmi, şekli, yamaç yüzeylerinde mevcut belirgin süreksizlik düzlemlerine ait eğim ve eğim yönleri kaydedilmiştir. Olası kaya düşmesi tehlikelerine yönelik serbest/yarı serbest halde bulunan kaya bloklarına ait veriler yüzey özellikleri bakımından yamaç molozu (talus) ve kaya yüzeyi (rock surface) ayırtlamalarına göre iki sınıfa ayrılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca inceleme alanında bulunan iki kaya şevi için sahada jeolog pusulası kullanılarak ölçülen süreksizlik düzlemlerine ait eğim ve eğim yönü verileri eş-açı (equal-angle), alt-yarı küre (lower-hemisphere), eğim-eğim yönü (dip-dip direction) kriterlerine göre duraylılık analizleriyle incelenmiştir (Goodman, 1989; Hoek, 2007; Ulusay & Sönmez, 2007; Rocscience Inc., 2025). Analizlerden inceleme bölgesinde kaya düşmesi riskleri ve şev duraysızlıkları belirlenmiş bu kapsamda değerlendirmeler yapılmıştır.

3. Literatür Çalışmaları

İnceleme alanında daha önce yapılmış çalışmalar ağırlıklı olarak resmi kurum ve kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu çalışmalarda inceleme alanı ve yakın çevresinde şev duyarsızlıklarıyla ilişkili kaya düşmesi risklerinin mevcut olduğu belirtilmiş ve bazı öneriler sunulmuştur.

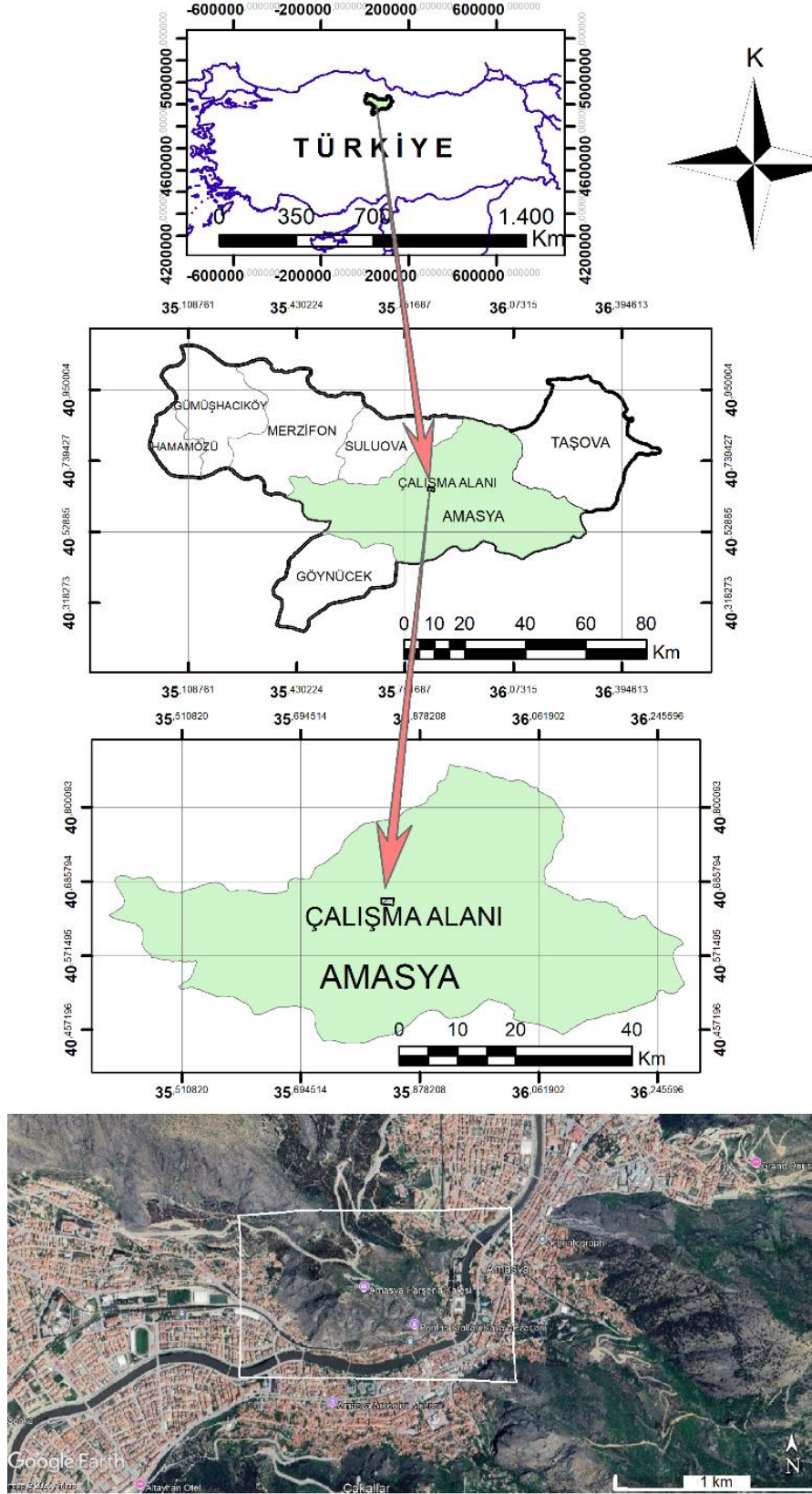
Amasya ili, Merkez ilçesi ilk olarak 1963 tarihinde Mülga İmar ve İskan Bakanlığı tarafından incelenmiştir. Şehir merkezinin Yeşilirmak Nehri güzergahı boyunca her iki yakasında kalkerden oluşan yüksek tepelerin bulunduğu yamaçlarda kayaçların moloz ve bloklar halinde parçalanmasının mümkün olduğu belirlenmiştir. Hazırlanan sonuç raporunda verilen haritada bazı alanların imara açılmayarak, yeşil alan olarak bırakılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Amasya ili, Merkez ilçesi, Hatuniye Mahallesi 1980 yılında Mesken Genel Müdürlüğü tarafından yapılan incelemede Mahallenin kaya düşmesi tehlikesi altında olduğu ve riskli görülen alanda yaklaşık 250 binanın bulunduğu belirlenmiştir. Konutların, kaya düşmesi olaylarına mukavemet gösteremeyecek nitelikte olması nedeniyle boşaltılması önerilmiştir.

Hatuniye Mahallesi 1980 yılında Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılmıştır. İncelemelerde düşmesi muhtemel çok sayıda kaya bloğunun mevcut olduğu belirlenmiş ve alandaki konutların ivedilikle boşaltılması gerektiği bildirilmiştir.

1980 tarihinde yapılan bir başka çalışmada Hatuniye Mahallesi halihazırda bir kaya düşmesi olayı yaşanmamasına rağmen yamaçların üst kotlarında yüksek eğimli şevlerin bulunması nedeniyle düşme riskinin var olabileceği ifade edilmiştir. Yapılan risk değerlendirmeleri doğrultusunda Hatuniye Mahallesi yamaçlarının üst kotlarında yeni bir binanın yapımına izin verilmemesi gerektiği belirtilmiştir. Aynı Mahalle 1981 yılında da incelenmiş, demiryolu ile kaya mezarları arasında kalan alanda küçük boyutlu da olsa kaya bloklarının düşme potansiyelinin belirlenmesi sonucunda Hatuniye Mahallesi konutların boşaltılması önerilmiştir. Mülga Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün 1983 yılında yaptığı incelemede yamaçları oluşturan kireçtaşı tabakalarının eğim yönlerinin yamacın eğim yönüyle zıt yönlü olmasından dolayı alanda büyük hacimli kaya bloğu düşmelerinin beklenmediğini belirtmiştir.

Hatuniye Mahallesi, Belediye ve Mesken Genel Müdürlüğü arasında yapılacak iş birliği ile Mahallenin başka bir alana naklinin yapılması halinde kaya düşmesi tehlikesinin ortadan kaldırılacağı ifade edilmiştir.



Şekil 1: İnceleme alanı yer bulduru haritası

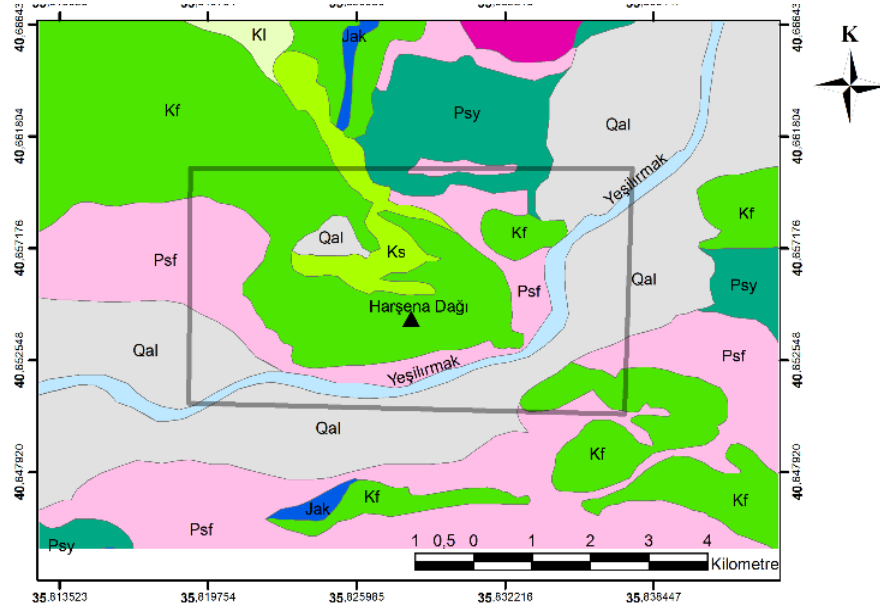
Mülga Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün Hatuniye Mahallesi için 1989 yılında hazırladığı jeolojik etüt raporunda, Mahalledeki kaya düşmesi olayının genel hayatı etkiler nitelikte olduğu ve Mahalle sınırları içerisinde yer alan 99 adet konutun güvenli bir alana nakledilmesi gerektiği belirtilmiştir. Raporunda, genel hayata etkililik oluru alınması ve aynı rapora ek olarak verilen krokide belirtilen alanlar için Afete Maruz Bölge Kararı'nın alınması istenmiştir. Raporunda ayrıca, 7269 Sayılı Kanun'un 14. Maddesi gereği vatandaşların taşınma işlemleri tamamlandıktan sonra konutların yıkılması gerektiği belirtilmiştir. 1990 tarihli başka bir raporda ise, 1989 yılında hazırlanan jeolojik etüt raporuna olan itirazlar değerlendirilmiş, 99 konuta ilave olarak 4 konutun daha güvenli bir alana naklinin gerektiğine karar verilmiştir. Düzenlenen rapora istinaden Bakanlar Kurulunca 03.03.1990 tarih ve 90/212 Sayılı Kararın ekli listesi 21. Sırası ile Hatuniye Mahallesi için Kaya Düşmesine Bağlı Afete Maruz Bölge kararı alınmıştır. İlerleyen zamanlarda 1991 ve 1993 yıllarında bu Mahallede kaya düşmeleri meydana gelmiş, zarar gören konutların 1989 yılında hazırlanan raporda belirtilen Afete Maruz Bölge sınırları içerisinde yer alan konutlar olduğu rapor edilmiştir. Söz konusu uygulamalar sonucunda Amasya ili, Merkez ilçesi, Hatuniye Mahallesi'nde kaya düşmesi olayına maruz kalmış 103 konutun malikleri için hak sahipliği çalışması başlatılmış, 90 konutun maliki hak sahipliği sürecini tamamlayarak 7269 Sayılı Kanun kapsamında Şeyhcuî Mahallesi'nde konut sahibi olmuştur.

Düzgün vd. (2012) Amasya ili, Harşena Dağı'na yönelik yaptığı çalışmada ise süreksizlik denetimli olası duraysızlıklar bulunan şevleri ve düşmesi muhtemel kaya bloklarını arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla incelemiştir. Arazide Schmidt çekici ve laboratuvar direk kesme deneyleri ile belirlenmiş olan Eklem Pürüzlülük Katsayısı (Joint Roughness Coefficient, JRC), Eklem Yüzeyi Sıkışma Dayanımı (Joint Wall Compressive Strength, JSC) değerlerinin yanı sıra süreksizliklerin eğim ve eğim yönlerini kullanarak bilgisayar yazılımlarıyla analiz etmiştir. Çalışmada Hatuniye Mahallesi'nin bir kısmı ve demiryolu güzergahının olduğu kesimlerde kaya kayması ve kaya düşmelerinden etkilenecek alanların bulunduğu belirlenmiştir.

4. İnceleme Alanının Jeolojisi

Amasya ilinin jeolojisi Paleozoyik, Mezozoik ve Senozoik yaşlı birimleri içeren istiften oluşmaktadır. İl genelinde en geniş yayılımı ise Jura-Kretase yaşlı birimler göstermektedir (Şekil 2). İl merkezi ve yakın çevresinde Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Ferhatkaya Formasyonu (Kf), Helvacı Formasyonu (Jkah) ve Carcurum Formasyonu (Jkac), Jura yaşlı Seyfe Formasyonu üzerine açısız uyumsuzlukla yerleşmiştir. Eosen'e ait seride seyrek olarak araya giren volkanitler dışında konglomera, kumtaşı, kiltası, marn ve kireçtaşı ardalanmalarından oluşan flišler yer almaktadır. Eosen-Paleosen yaşlı Çelttek Formasyonu, Üst Kretase yaşlı birimleri açısız uyumsuzlukla örtmektedir. Miyosen yaşlı Kızılırmak Formasyonu da kendisinden yaşlı birimler üzerine açısız uyumsuzlukla oturmuştur. Sahada, Neojen döneminde meydana gelen volkanik faaliyetlere rastlanılmaktadır. Volkanitler daha çok andezitik tüf ve aglomeralardan oluşmaktadır. Alanda gözlemlenen Kuvaterner yaşlı birimler alüvyonlar ve yamaç molozları olarak yer almaktadır (Ateş vd., 2006).

İl sınırları içerisinde en yaşlı birimler Paleozoyik yaşlı metamorfittlerdir. Alp (1972) bu metamorfittleri billüsel şist olarak tanımlamış, yeşil şist ve fillat serisi olarak iki grup altında toplamıştır. Paleozoyik yaşlı bu birimler, Ateş vd. (2006) tarafından büyük bir kısmı volkanik kökenli kayalardan oluşan Turhal Metamorfittleri (Ptrt) olarak adlandırmıştır. Bu kayalar arasında en yaygın olanları metalav, bazik metatüf, metaspilit, aglomera kökenli metavolkanitler, hornblendli yeşil şistler ve glokofanlı yeşil şistlerdir. İlksel özellikleri kısmen korunmuş olan bu kaya türlerine ilave olarak ardalanmalı, pelitik-psamitik metatortul, grafitist, kalkışist ve mermerler de gözlenmektedir. İstifte Triyas yaşlı Devecidağ Karmaşığı Paleozoyik yaşlı metamorfittleri açısız uyumsuzlukla örtmekte, Amasya'nın kuzeyi ve kuzeydoğusunda bulunan Jura yaşlı Seyfe Formasyonu (Jsk) ise üzerinde açısız uyumsuzlukla yer almaktadır.



AÇIKLAMALAR

		İnceleme Alanı
		Nehir
Kuvaterner		Qal Alüvyon
Kretase		Ks Sarılar Formasyonu (Marn, kalker)
		Kl Lokman Formasyonu (Konglomera, kumtaşı, kumlu kireçtaşı, marn, andezitik tüf)
		Kf Ferhatkaya Formasyonu (Kireçtaşı, dinamometamorf kireçtaşı)
Jura		Jak Kayabaşı Formasyonu (Konglomera, kumtaşı, şeyl)
aleozoyik		Psp Kuvarsporfir
		Psf Fillat
		Psy Yesilsist

Şekil 2: İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Alp, 1972)

İnceleme alanında Harşena Dağı'nı oluşturan kireçtaşları bej, açık gri renkli ve ince-orta-kalın tabakalıdır. Tabaka düzlemleri Helkız Mahallesi'nin kuzeyinde yamaç yönüyle paralellik gösterirken tabakalarda kısa mesafelerde düşük açılı kıvrımlanmalar izlenmektedir. Yaklaşık 450 m yükseltiden sonra kayaç masif görümlü bir yapı kazanmaktadır. Masif, sık çatlaklı, eklemeleri nadiren kalsit dolgulu, süreksizlik düzlemleri çoğunlukla pürüzlü ve ondülasyonlu Mezozoik yaşlı kireçtaşlarından oluşmaktadır. İlk olarak Alp (1972) tarafından Ferhatkaya Formasyonu (Kf) olarak isimlendirilen bu birim, sık çatlaklı ve eklemli bir kaya ortamı oluşturması sebebiyle süreksizlik denetimli duraysızlıklar ile birlikte kaya düşmesi potansiyeli olan bir kaynak alan özelliği taşımaktadır.

5. Kaya Düşmesi

Kaya düşmesi, kaya bloklarının süreksizlik düzlemleri boyunca buldukları ortamdan ayrılarak genellikle taşıyıcı bir kuvvet olan yerçekimi etkisiyle düşmesi olayıdır. Bu mekanizmada blokların düşmeye başladığı ilk kısım kaynak zonu olarak isimlendirilmektedir. Kaynak zonu genelde dik ve dike yakın topografik açıya sahip, çatlaklı/kırıklı yapısal özellikler göstermektedir. Bu zondan ayrılan kaya bloklarının düşme hareketleri sırasında sıçrama ve yuvarlanma hareketleri yaptıkları kısım ise yuvarlanma zonu olarak adlandırılmaktadır. Yuvarlanma zonu, Evans ve Hungr (1993)'a göre iki farklı bölüme ayrılmaktadır. Bunlar, geçiş bölgesi ve durma bölgesidir. Geçiş bölgesi, genellikle düşük enerjili ve küçük çaplı kaya bloklarının yer aldığı kısım iken durma bölgesi daha büyük çaplı ve yüksek enerjili kaya bloklarının ulaşabildiği alanlar olarak tanımlanmıştır. Ancak kaya düşmesi etki alanının sınırları içerisinde her zaman geçiş zonlarına rastlanmamaktadır. Bunun başlıca sebebi ise yamacın sahip olduğu topografik özellikler ve düşen kaya bloklarının enerjisidir.

Düşen kaya parçalarının blok enerjilerinin tamamen sönmüldüğü diğer bir deyişle blok hızlarının tamamen sıfır olduğu nokta ile blokların ilk konumları arasındaki bölge kaya düşmesi tehlikesi olan alanlar olarak tanımlanmaktadır. Bu alanlar içerisinde inşa edilen her türlü mühendislik yapısı kaya düşmesi riski altındadır.

Literatürde kaya düşmesi mekanizmasının anlaşılması konusunda (Evans & Hungry, 1993; Dorren, 2003; Wang & Lee, 2012; Düzgün vd., 2012; Wyllie, 2015; Taga & Zorlu, 2017; Ağca vd., 2020; Akın vd., 2020; San vd., 2020; Alemdağ vd., 2022a; Özcan, 2023; Durmuş vd., 2025) çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca LiDAR teknolojisi ve nokta bulut tekniğinden (Tiruneh vd., 2013; Gigli vd., 2022; Mammoliti vd., 2022) yararlanılarak yapılan 2-boyutlu ve 3-boyutlu kaya düşmesi analizleri (Akın vd., 2019; Alizadeh, 2021; Bulut, 2022; Alemdağ vd., 2022b; Erkek, 2023; Utlu vd., 2023; Varol vd., 2023) bu yenilme mekanizmasının anlaşılmasında yol gösterici olmuştur.

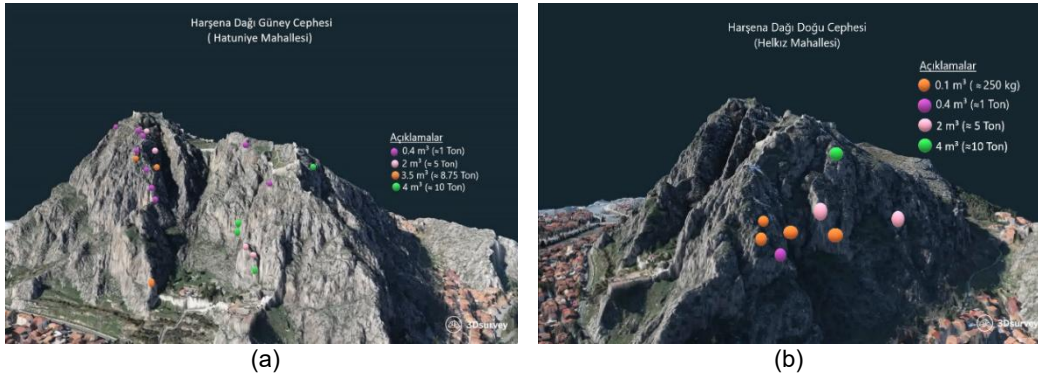
İncelemeye konu Mahallelerde çok sayıda tescilli tarihi yapı bulunmaktadır. Harşena Dağı'nın üst bölümlerinde Harşena Kalesi, Harşena yükseltisini oluşturan kireçtaşları içerisinde açılmış Kral Kaya Mezarları ve dağ eteğinde çok sayıda tarihi yapı mevcuttur (Şekil 3). Harşena Dağı'nın eteklerinde bulunan meskun alanların varlığı eski medeniyetlere kadar dayanmaktadır. Günümüze kadar olan zaman zarfında imar yönünden uygun görülen bu alanlarda Mahalle yapılaşmalarına devam edilmiş ancak kaya düşmesi tehlikelerine karşı mahalli idarelerce hiçbir önlem alınmamıştır.



Şekil 3: Harşena Dağı'nın görünümü: a) Hatuniye ve Helkız Mahalleleri, b) Kurşunlu Mahallesi

Mahallelerde uygulanan risk azaltıcı nitelikteki tek faaliyet, Mülga Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü tarafından Hatuniye ve Helkız Mahallesi için yapı ve ikamete yasaklı alanların (afete maruz bölge) ilan edilmesidir. Bu sayede genel hayatı etkileyen bir olay için 103 konut maliki kaya düşmesi riski tespit edilen alanlardan 7269 sayılı kanun kapsamında daha güvenli bir alana nakledilmiştir. Nakledilen konutların bulunduğu alanın üst kotunda halihazırda faaliyet gösteren bir demiryolu hattı bulunmakta olup Helkız Mahallesi'nin yakın çevresinde de ikamete devam edilmektedir. Ancak Hatuniye Mahallesi'nde daha güvenli bir alana nakli gerçekleştirilen meskun alanın üst kotunda bulunan tarihi sit alanında zaman zaman irili ufaklı kaya düşmeleri devam etmektedir. Bu alanın büyük bir bölümünün turizm açısından ilin önemli bir noktasında yer alması, Harşena Dağı yamaçlarında kaya düşmesi ve yamaç duraylılığına ilişkin tehlike ve risk analizini oldukça önemli hale getirmektedir. Bu amaçla çalışma kapsamında riskli görülen alanlarda kaya düşmesi ve kaya şev/yamaç duraylılığı değerlendirmeleri yapılmıştır.

Arazi çalışmaları ve LiDAR ölçümleri kullanılarak 440–560 m kotları arasında Helkız, Hatuniye ve Kurşunlu Mahallelerinin üst yamaçlarında düşme potansiyeli olan çok sayıda kaya bloğu tespit edilmiştir (Şekil 4). Bloklar Harşena Dağı'nın güney ve doğu cephelerinde hacimce dört farklı gruba ayrılacak nitelikte ve serbest/yarı serbest haldedir. Güney cephesine bakan yamaçlarda serbest/yarı serbest bloklar 0.4 m³ (1 ton), 2.5 m³ (5 ton), 3.5 m³ (8.75 ton), 4 m³ (10 ton), 200 m³ (450 ton); doğu cephesine bakan yamaçlarda ise 0.1 m³ (0.25 ton), 0.4 m³ (1 ton), 2 m³ (5 ton), 4 m³ (10 ton) hacme ve ağırlığa sahiptir.



Şekil 4: Harşena Dağı'nda düşmesi muhtemel kaya bloklarının konumu ve özellikleri: a) güney, b) doğu cephesi

Arazi gözlemlerinde düşmesi muhtemel bloklar ve bu blokların konumları risklerin değerlendirilmesi aşamasında önemli veriler sağlamıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da Harşena Dağı yamaçlarında gözlemlenen serbest/yarı serbest halde düşme potansiyeli oldukça yüksek kaya bloklarının görünüşleri verilmiştir. Topografyanın oldukça eğimli olması nedeniyle harekete geçme ihtimali oldukça yüksek olan bu blokların durma bölgesine ulaşana kadar kullanacağı güzergahta canlılara ve yapılara zarar verebileceği öngörülmektedir.



Şekil 5: Hatuniye Mahallesinde yamaç yüzeyinde düşmesi muhtemel kaya blokları



Şekil 6: Helkız Mahallesinde yamaç yüzeyinde düşmesi muhtemel kaya blokları

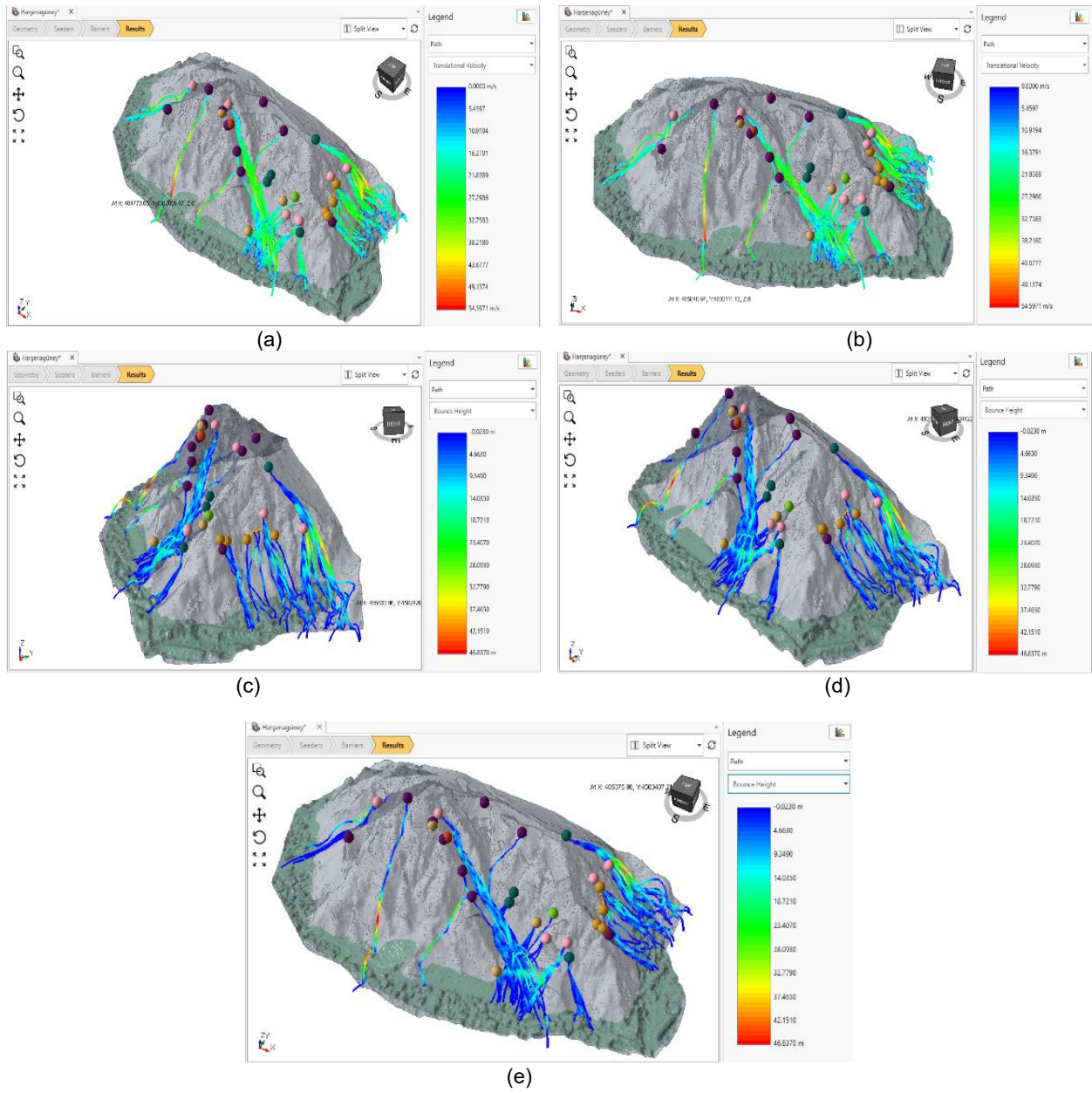
Şekil 7'de ise serbest/yarı serbest halde bulunan blokların yakın çevresinde bulunan yapılar görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi meydana gelecek kaya düşmesi, yamacın eteklerinde bulunan yapılara zarar verecek, can ve mal kaybına yol açacaktır.



Şekil 7: Hatuniye Mahallesinde yamaç üzerinde bulunan kaya blokları

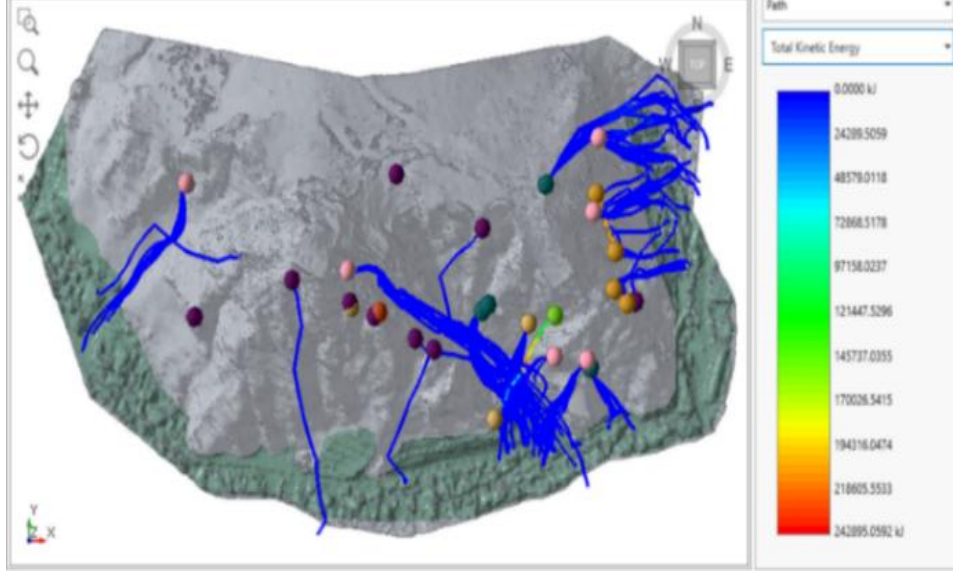
Düşmesi muhtemel serbest/yarı serbest haldeki kaya bloklarının konumları ve muhtemel düşme hatları incelendiğinde, blokların çok sayıda düşme güzergahı izleyeceği belirlenmiştir. Bu bağlamda yapılan analizlerde iki-boyutlu (2D) kesitler üzerinden çalışılması uzun bir değerlendirme süreci gerektireceğinden dolayı üç-boyutlu (3D) sayısal modeller kullanılmıştır. Modellerde kaya yüzeyleri için normal geri verme katsayısı 0.5, teğetsel geri verme katsayısı 0.9; yamaç molozları için normal geri verme katsayısı 0.3, teğetsel geri verme katsayısı ise 0.8 seçilmiştir (Akın vd., 2020). Tablo 1’de şev yüzey özelliklerine göre bu katsayıların değişimi görülmektedir.

Düşmesi muhtemel kaya bloklarının bulunduğu lokasyonlar ve farklı doğrultularda yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, blokların düşme olayı sonrası yamaç boyunca değişen topografik özelliklere bağlı olarak çok sayıda ilerleme doğrultusu kullanacağı görülmüştür (Şekil 8). Çok sayıda güzergahın olması, 30 ayrı kaya bloğunun iki-boyutlu (2D) analizinin yapılabilmesi için fazla sayıda topografik kesit gerektirmektedir. Dolayısıyla işlemler oldukça zaman alıcı olacaktır. Bu sebeple çalışmada sahanın topografik özelliklerinin sayısal hale getirilip bilgisayar ortamına aktarıldığı nokta bulutu verisi kullanılmıştır. Harşena Dağı’nda 440–560 m kotları arasında, hacimleri 0.1–200 m³ arasında değişen 30 adet serbest/yarı serbest düşmesi muhtemel kaya bloğu verisi Rocfall3D yazılımına aktarılmıştır. Saha çalışmalarından toplanan veriler ve topografyanın üç-boyutlu (3D) sayısal hali, kaya bloklarının konumu, şekli, hacmi ve yamaçların yüzey özelliklerine ait parametrik değerler kullanılarak kaya düşmesi modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 8: Harşena Dağı’nda kaya düşmesi analizlerinin sıçrama yüksekliği (bounce height) ve hız değerleri ile birlikte farklı yönlerden görünüşleri: a) güneydoğu, b) güney, c) doğu, d) doğu-güneydoğu, e) güney-güneydoğu

Analizlerde meskun alanlar, demiryolu güzergahı ve tarihi sit alanlarının kaya düşmesinden etkilenebileceği tespit edilmiştir. Kaya düşmesi etkilerinin en fazla Hatuniye Mahallesi'nde 420 m kotunda yer alan demiryolu güzergahında ve 420–480 m kotları arasında bulunan tarihi sit alanlarında olabileceği belirlenmiştir. Hatuniye Mahallesi'nde 420 m yükselti seviyesinin altındaki işyerlerinin bulunduğu alanlarda 15 işyerinin, Kurşunlu Mahallesi'nde ise 3 yapının kaya düşmesinden etkilenebileceği tespit edilmiştir. Daha önce afete maruz bölge ilan edilen Helkız Mahallesi dışında kalan alanın tamamında da kaya düşmesinin etkili olacağı belirlenmiştir (Şekil 9 ve Şekil 10).



Şekil 9: Mahallelere göre kaya düşmesi analiz sonuçlarının kinetik enerji değerleriyle birlikte harita düzleminde görünümü

Tablo 1: Farklı şev yüzeyi özellikleri için önerilen geri verme katsayıları (Akin vd., 2020)

Normal geri verme katsayısı (R_n)			Teğetsel geri verme katsayısı (R_t)			Şev yüzeyi özellikleri
En düşük	En yüksek	Ort.	En düşük	En yüksek	Ort.	
0.37	0.42		0.87	0.92		Sert yüzey kaplaması
0.33	0.37		0.83	0.87		Anakaya veya çok az toprak ve bitki örtüsü içeren bloklar
0.30	0.33		0.83	0.87		Yamaç molozu (çok az bitki örtüsü)
0.30	0.33		0.80	0.83		Yamaç molozu (orta seviyede bitki örtüsü)
0.28	0.32		0.80	0.83		Yumuşak zemin şevi (bitki örtülü)
0.28	0.32		0.78	0.82		Zemin şevi (bitki örtüsü)
		0.315			0.712	Kireçtaşı
		0.303			0.615	Kısmi bitki örtülü kireçtaşı molozları
		0.315			0.712	Yüzeyi kaplanmamış kireçtaşı yığını
		0.251			0.489	Yüzeyi bitki örtüsü kaplı kireçtaşı yığını
		0.276			0.835	Tebeşir
		0.271			0.596	Bitki örtüsü ile kaplı tebeşir molozları
		0.20			0.53	Kayalık yüzeyler ve yamaç molozları üzerindeki dolomitik kireçtaşı
		0.10			0.20	Yamaç eteklerinde birikmiş teraslardan taşınan piroklastik malzemeler
		0.00			0.24	Kaya kütleleri eteğindeki yelpaze kırıntıları
		0.393			0.567	Zemin
		0.453			0.737	Püskürtme beton
		0.487			0.91	Kaya şevi
		0.50			0.95	Anakaya
		0.35			0.85	İri bloklarla kaplanmış anakaya
		0.30			0.70	Eşit tane boyutuna sahip döküntü malzeme
		0.25			0.55	Bitki örtüsü ile kaplı zemin
		0.53			0.99	Sert ve temiz kaya yüzeyi
		0.40			0.90	Asfalt yol
		0.35			0.85	Sert yüzeyli anakaya yüzlekleri, iri bloklar
		0.32			0.82	Yamaç molozu
		0.32			0.80	Bitki örtüsü kaplı yamaç molozu
		0.30			0.80	Yumuşak zemin, seyrek bitki örtüsü
0.37	0.42					Düz sert yüzeyler ve kaplama
0.33	0.37					Anakaya ve iri bloklar
0.30	0.33					Yamaç molozu ve sıkı zemin şevleri
0.28	0.30					Yumuşak zemin şevleri

Tablo 1'in devamı

0.87	0.92	Sert anakaya yüzeyi veya kaldırım yüzeyleri gibi düz sert yüzeyler
0.83	0.87	Anakaya yüzeyleri ve bitki örtüsü olmayan yamaç molozu
0.82	0.85	Seyrek ve bodur bitki örtüsü kaplı yamaç molozu şevleri
0.80	0.83	Bitki örtüsü kaplı yamaç molozu şevleri ve seyrek bitki örtülü zemin
0.78	0.82	Çalılık kaplı zemin şevi
0.53	0.99	Sert ve temiz kaya
0.35	0.85	Anakaya yüzleği
0.32	0.82	Yamaç molozu örtüsü
0.32	0.80	Bitki örtüsü kaplı yamaç molozu
0.40	0.90	Asfalt kaplama
0.53	0.99	Sert ve temiz anakaya
0.35	0.85	Anakaya yüzleği
0.48	0.53	Beton
0.47	0.55	Ayrılmış kaya
0.48	0.53	Beton
0.47	0.55	Ayrılmış kaya
0.85	0.53	Beton
1.00	0.55	Ayrılmış kaya
0.53	0.99	Anakaya
0.50	0.70	Bloklarla kaplı yüzeyler
0.50	0.65	Bloklarla kaplı yüzeyler (çalılık ve küçük ağaçlarla kaplı)
0.50	0.50	Bloklarla kaplı yüzeyler (ormanlık)
0.30	0.80	Bitki örtüsü kaplı toprak yüzey
0.40	0.90	Asfalt kaplama
0.35	0.85	Çakıl yol
0.50	0.80	Kireçtaşı üzerleyen ince taneli yamaç molozu seyrek ormanlık şev
0.50	0.80	Kireçtaşı ve bazalt malzemesinden oluşan yamaç molozu
0.70	0.90	Kaya yüzeyi üzerinde metamorfik tüf kökenli dörtgen bloklar



Şekil 10: Helkız Mahallesi üst yamaçlarındaki kireçtaşı tabakalarının görünümü

6. Kinematik Analiz

Geometrik analiz yöntemi olarak da bilinen stereografik projeksiyon (Zanbak, 1973; Whittaker, 1984; Lisle & Leyshon, 2004; Rocscience Inc., 2025), kaya ortamında şev ve yamaç yüzeylerindeki süreksizlik düzlemlerine ait eğim, eğim yönü ve sürtünme açısını dikkate alarak stereonet üzerinde duraylılık koşullarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kinematik analizlerde kullanılan bu yöntem kaya şevinin duraylılık koşullarının düzlemsel kayma (Lim & Yang, 2004; Raghuvanshi, 2019; Yang vd., 2024), kamasal kayma (Hoek vd., 1973; Kumsar vd., 2000; Bowa & Kasanda, 2020; Velu, 2024) ve devrilme türü (Zanbak, 1979) yenilme davranışları için incelenmesinde ideal bir yaklaşım sunmaktadır (Hoek & Bray, 1977; Goodman, 1989; Hoek, 2007; Wyllie, 2017). Analizlerde incelenen bu duraysızlık türleri süreksizlik setlerinin hakim yönelimi ve süreksizlik düzlemlerinin sürtünme açısına bağlı olarak birbirleri arasında geçiş sağlamaktadır (Zanbak, 1973; Hoek & Bray, 1977; Hoek, 2007; Ulusay & Sönmez, 2007; Alemdağ vd., 2015; Keskin, 2017; Uzun vd., 2023).

Harşena Dağı'nda kaya düşmesi değerlendirmeleri sırasında kaya ortamını temsil eden yamaç yüzeylerinde süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya bloklarının varlığı gözlemlenmiştir. Bu amaçla söz konusu yamaçlarda süreksizlik denetimli duraylılık incelemesi amacıyla Dips8.0 Rocscience Inc. (2025) yazılımı kullanılarak kaya şevlerinde kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Hatuniye ve Helkız Mahallelerinin üst kotlarında yer alan bu yamaçlar için eğim-eğim yönü, alt-yarı küre, eş-açı yöntemleri birlikte kullanılarak Helkız Mahallesinde Şev-1 (60°/074°), Hatuniye Mahallesinde ise Şev-2 (48°/145°) olarak isimlendirilen yamaçlarda duraylılık değerlendirmeleri yapılmıştır.

6.1. Şev-1 İçin Duraylılık Analizi

Helkız Mahallesi doğu yamacının üst kotlarında bulunan Şev-1'de kinematik analiz öncesinde sahada gözlemlenebilen belirgin süreksizliklere ait eğim miktarları ve eğim yönleri jeolog pusulası ile ölçülerek kaydedilmiştir. 76 adet süreksizlik düzlemi okuması yapılarak analiz öncesi listelenmiştir (Tablo 2). Süreksizlik düzlemlerine ait içsel sürtünme açısı (internal friction angle) 30° olarak seçilmiştir (Düzgün vd., 2012). Süreksizlik düzlemlerinin kutup noktaları (pole vectors) dikkate alınarak dağılımlar üzerinden hakim süreksizlik düzlemleri belirlenmiştir. Bu kapsamda Şev-1 süreksizliklerinde hakim süreksizlik seti sayısı 7 adettir ve eğim ve eğim yönleri sırasıyla 65°/267° (SET-1), 24°/258° (SET-2), 25°/231° (SET-3), 26°/191° (SET-4), 11°/01° (SET-5), 02°/260° (SET-6), 11°/300° (SET-7) olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 2: Şev-1'de ölçülen süreksizlikler düzlemlerine ait eğim ve eğim yönleri

Sıra	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)	Süreksizlik Türü	Sıra	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)	Süreksizlik Türü
1	12	110	Tabaka	39	64	012	Eklem
2	30	065	Tabaka	40	68	078	Tabaka
3	76	085	Eklem	41	06	069	Tabaka
4	42	092	Tabaka	42	06	071	Tabaka
5	45	066	Tabaka	43	05	071	Tabaka
6	65	010	Eklem	44	65	052	Tabaka
7	20	105	Tabaka	45	66	050	Tabaka
8	05	070	Tabaka	46	65	053	Tabaka
9	65	050	Tabaka	47	89	081	Tabaka
10	65	080	Tabaka	48	17	105	Tabaka
11	30	116	Eklem	49	20	105	Tabaka
12	88	080	Tabaka	50	86	177	Tabaka
13	87	175	Tabaka	51	85	174	Tabaka
14	80	120	Tabaka	52	32	115	Eklem
15	14	110	Tabaka	53	78	118	Tabaka
16	12	112	Tabaka	54	32	134	Tabaka
17	28	66	Tabaka	55	80	121	Tabaka
18	43	64	Tabaka	56	76	320	Tabaka
19	30	66	Tabaka	57	28	072	Tabaka
20	75	185	Tabaka	58	34	050	Tabaka
21	74	182	Tabaka	59	30	110	Tabaka
22	75	186	Tabaka	60	44	116	Tabaka
23	40	90	Tabaka	61	36	063	Tabaka
24	41	87	Tabaka	62	78	120	Tabaka
25	40	92	Tabaka	63	82	070	Eklem
26	45	65	Tabaka	64	18	105	Tabaka
27	28	65	Tabaka	65	22	078	Tabaka
28	45	65	Tabaka	66	70	306	Eklem
29	30	115	Eklem	67	18	060	Tabaka
30	64	010	Eklem	68	35	035	Tabaka
31	66	077	Tabaka	69	24	110	Tabaka
32	85	176	Tabaka	70	67	196	Eklem
33	32	116	Eklem	71	80	215	Eklem
34	65	012	Eklem	72	58	060	Eklem
35	87	082	Tabaka	73	70	190	Eklem
36	88	078	Tabaka	74	90	115	Eklem
37	18	103	Tabaka	75	60	125	Eklem
38	65	078	Tabaka	76	80	120	Eklem

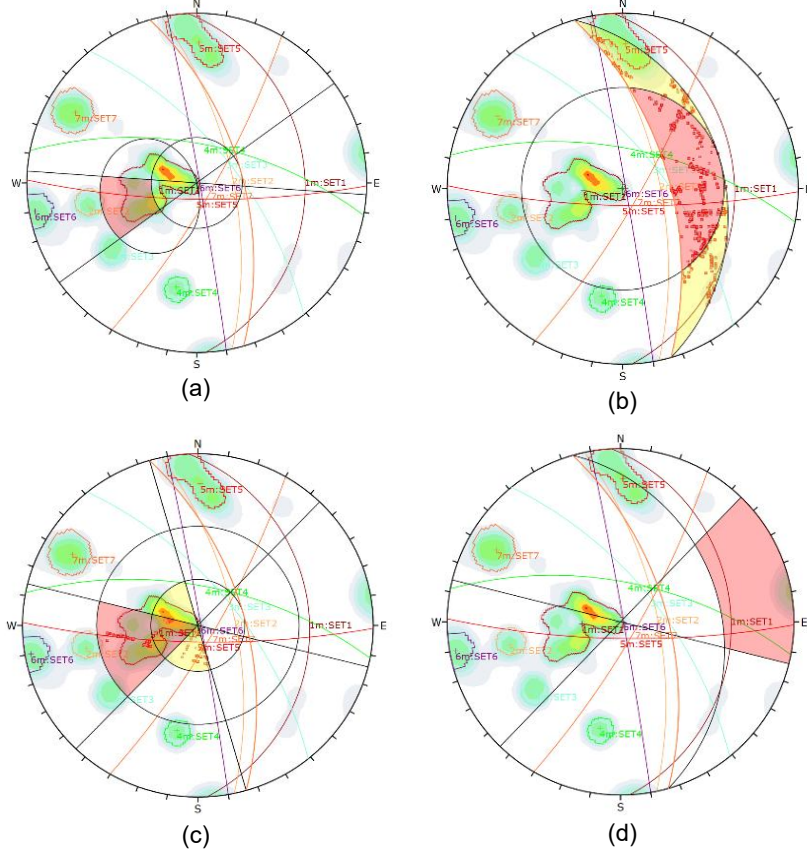
Şev eğim/eğim yönü: 60°/074°

Tablo 3: Şev-1'de ölçülen süreksizliklerin stereografik projeksiyon sonuçlarına göre hakim süreksizlik setleri

Set	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)
1	65	267
2	24	258
3	25	231
4	26	191
5	11	01
6	02	260
7	11	300

Helkız Mahallesi doğu yamacında düzlemsel kayma, kamasal kayma, blok devrilmesi ve bükülme devrilmesi için stereonetler üzerinde kırmızı alana düşen kutup noktası ve/veya süreksizlik düzlemlerinin kesişiminden oluşan noktaların toplam nokta sayısına oranından hesaplanan kinematik yenilme olasılıkları belirlenmiştir (Goodman, 1989; Wyllie, 2017).

Literatür çalışmalarında ve uygulamalarda sıkça kullanılan %5 referans değeri sınır kabul edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir (Rahman vd., 2023; Durmuş vd., 2025; Rocscience Inc., 2025). Analizlerden Şev-1'in düzlemsel kayma, kamasal kayma ve blok devrilmesi için duraysız, bükülme devrilmesi için duraylı olduğu görülmüştür (Şekil 11). Gerekli ortam şartları oluştuğunda şevde bu tür duraysızlıkların meydana gelmesi durumunda yamaç alt kotunda kalan alanların olumsuz etkileneceği belirlenmiştir.



Şekil 11: Şev-1 için kinematik analiz stereonetleri: a) düzlemsel kayma, b) kamasal kayma, c) blok devrilmesi, d) bükülme devrilmesi

Çalışma kapsamında hakim süreksizlik setlerinin farklı tür duraysızlıklar için kritiklik durumları değerlendirilmiş, sadece $65^{\circ}/267^{\circ}$ (SET-1) süreksizliğinin düzlemsel kayma ve blok devrilmesi için kritik olduğu belirlenmiştir. Şevin tüm duraysızlık türleri için kinematik yenilme olasılıkları referans değerle karşılaştırıldığında, %5 kritik limiti değerinin oluça üzerinde sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 4). Düzlemsel kayma, kamasal kayma ve blok devrilmesi için kinematik yenilme olasılıkları sırasıyla %15.79, %23.39 ve %44.74 olduğu belirlenmiştir. Blok devrilmesinde doğrudan devrilme, oblik devrilme ve taban düzlemi kinematik yenilme olasılıklarının sırasıyla %2.07, %2.07, %44.74 olduğu belirlenmiştir (Şekil 12). Bükülme türü duraysızlığa ait sonuçlar değerlendirildiğinde şevin duraylılık sorununun olmadığı görülmüştür.

Tablo 4: Şev-1 için kinematik analiz sonuçları

Şev Eğim Yönü (°)	Şev Eğim Miktarı (°)	Süreksizlik Sayısı (Adet)	Set Sayısı (Adet)	Kinematik Yenilme Türü Olasılığı (%)			
				Düzlemsel Kayma	Kama Türü Kayma	Devrilme Yenilmesi	
074	60	76	7	15.79	23.39	Blok Devrilme	
						Fleksürel Devrilme	
						44.74	0.0



Şekil 12: Şev-1'de blok devrilmesi yenilmesine maruz kalabilecek kısımlar

6.2. Şev-2 İçin Duraylılık Analizi

Hatuniye Mahallesi güney yamacının üst kotlarında bulunan Şev-2'de toplam 82 adet süreksizlik düzlemi ölçülmüştür (Tablo 5). Süreksizlik düzlemlerine ait içsel sürtünme açısı 30° 'dir (Düzgün vd., 2012). Şev-2 süreksizliklerinde hakim süreksizlik seti sayısı 2 adettir ve bunların eğim ve eğim yönleri sırasıyla $53^\circ/233^\circ$ (SET-1), $16^\circ/332^\circ$ (SET-2) olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 5: Şev-2'de ölçülen süreksizlik düzlemlerine ait eğim ve eğim yönleri

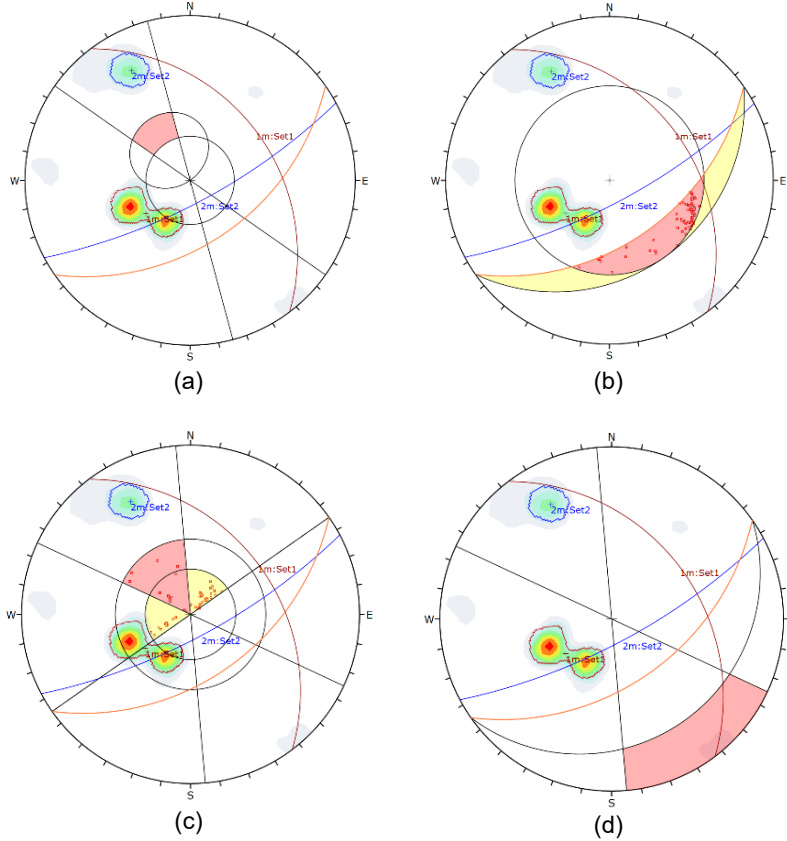
Sıra	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)	Süreksizlik Türü	Sıra	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)	Süreksizlik Türü
1	95	140	Eklem	42	64	218	Eklem
2	44	065	Tabaka	43	16	098	Tabaka
3	40	060	Tabaka	44	78	152	Eklem
4	32	032	Tabaka	45	87	330	Eklem
5	46	065	Tabaka	46	80	130	Eklem
6	47	064	Tabaka	47	75	280	Eklem
7	40	056	Tabaka	48	30	026	Tabaka
8	40	072	Tabaka	49	25	330	Tabaka
9	30	028	Tabaka	50	90	215	Eklem
10	31	028	Tabaka	51	76	052	Eklem
11	36	080	Tabaka	52	75	110	Eklem
12	44	066	Tabaka	53	26	032	Tabaka
13	45	062	Tabaka	54	80	250	Eklem
14	45	060	Tabaka	55	75	040	Eklem
15	52	062	Tabaka	56	45	065	Tabaka
16	43	062	Tabaka	57	50	140	Tabaka
17	35	015	Tabaka	58	47	280	Eklem
18	55	040	Tabaka	59	46	070	Tabaka
19	84	092	Eklem	60	70	148	Eklem
20	84	022	Eklem	61	76	155	Eklem
21	76	090	Eklem	62	72	153	Eklem
22	85	100	Eklem	63	50	073	Tabaka
23	30	030	Tabaka	64	48	071	Tabaka
24	80	140	Eklem	65	36	043	Tabaka
25	45	020	Tabaka	66	45	068	Tabaka
26	70	150	Eklem	67	42	065	Tabaka
27	72	154	Eklem	68	38	075	Tabaka
28	34	034	Tabaka	69	38	078	Tabaka
29	50	200	Eklem	70	36	060	Tabaka
30	45	026	Tabaka	71	35	043	Tabaka
31	75	150	Eklem	72	36	039	Tabaka
32	80	140	Eklem	73	33	020	Tabaka
33	25	010	Tabaka	74	45	064	Tabaka
34	52	240	Eklem	75	34	035	Tabaka
35	90	315	Eklem	76	35	029	Tabaka
36	24	028	Tabaka	77	37	026	Tabaka
37	70	215	Eklem	78	35	028	Tabaka
38	78	150	Eklem	79	36	041	Tabaka
39	28	196	Eklem	80	36	082	Tabaka
40	30	073	Tabaka	81	30	025	Tabaka
41	78	200	Eklem	82	40	072	Tabaka

Şev eğim/eğim yönü: $48^\circ/145^\circ$

Şev-2’de yapılan kinematik analizlerden şevin düzlemsel kayma, blok devrilmesi ve bükülme devrilmesi için duraylılık sorununun olmadığı, sadece kamasal kayma türünde riskli olduğu belirlenmiştir (Şekil 13). Gerekli ortam şartları oluştuğunda kamasal yenilmenin meydana gelmesi durumunda yamacın alt kotlarında bulunan alanların olumsuz etkileneceği tahmin edilmektedir. Yapılan değerlendirmelerde hakim süreksizlik setlerinin kritik olmadığı görülmüştür. Şevin tüm duraysızlık türlerinde kinematik yenilme olasılıklarına bakıldığında %5 kritik limit değerine yakın değerler söz konusudur (Tablo 7).

Tablo 6: Şev-2’de ölçülen süreksizliklerin stereografik projeksiyon sonuçlarına göre hakim süreksizlik setleri

Set	Eğim (°)	Eğim Yönü (°)
1	53	233
2	16	332

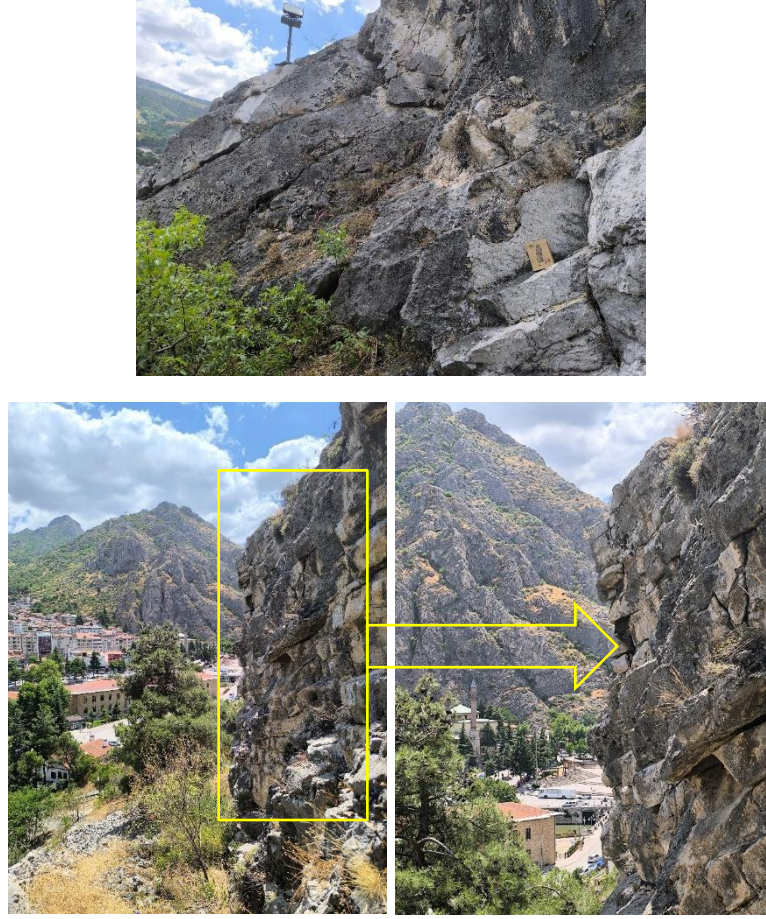


Şekil 13: Şev-2 kinematik analiz stereonetleri: a) düzlemsel kayma, b) kamasal kayma, c) blok devrilmesi, d) bükülme devrilmesi

Tablo 7: Şev-2 için kinematik analiz sonuçları

Şev Eğim Yönü (°)	Şev Eğim Miktarı (°)	Süreksizlik Sayısı (Adet)	Set Sayısı (Adet)	Kinematik Yenilme Türü ve Olasılığı (%)			
				Düzlemsel Kayma	Kama Türü Kayma	Devrilme Yenilmesi	
145	48	82	2	0.0	3.13	Blok Devrilme	
						Fleksürel Devrilme	
						3.66	3.66

Şekil 14 ve Şekil 15’de saha çalışmalarında gözlemlenen kireçtaşı tabakalarının yönelimleri verilmiştir. Görüldüğü gibi Helkız Mahallesi’nde kireçtaşlarının tabaka düzlemleri yamaç eğim yönüyle paralellik gösterirken, Hatuniye Mahallesi’nde özellikle üst kesimlerde tabaka eğimleri yamacın eğim yönüne terstir.



Şekil 14: Helkız Mahallesinde yamacın eğim yönüyle paralellik gösteren kireçtaşı tabaka düzlemleri



Şekil 15: Hatuniye Mahallesi'nin üst kesimlerinde yamacın eğim yönüne ters eğimde olan kireçtaşı tabakaları

7. Bulgular ve Tartışma

Harşena Dağı eteklerinde Hatuniye, Helkız ve Kurşunlu Mahallelerini etkileyebilecek kaya düşmesi ve şev duraysızlıklarının belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada yerleşim alanlarının kaya düşmesi bakımından riskli alanlarda olduğu görülmüştür. Harşena Dağı'nın doğu ve güney yamacında belirlenen iki şev için kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerle Hatuniye ve Helkız Mahallelerinde süreksizlik denetimli duraysızlıkların meydana gelme ihtimalinin olduğu belirlenmiştir.

Hatuniye ve Helkız Mahallelerinde konut alanı olarak kullanılan ve kaya düşmeleri ile şev duraysızlıklarından 1. derecede etkilenebilecek bu alan daha önceki tarihlerde afete maruz bölge olarak belirlenmiş konut malikleri daha güvenli bir alana taşınmıştır. Ancak yapılan incelemeler ve analizlerde söz konusu alanın alt kotlarında da duraysızlıkların oluşturacağı olumsuzluklardan etkilenebilecek yapıların mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Düşmesi muhtemel kaya bloklarının konum, hacim ve kütleleri, düşme olayının gerçekleşmesi halinde izleyecekleri yörünge boyunca temas edecekleri yamaçların yüzey özellikleri ve topografya değerlendirildiğinde, Hatuniye ve Helkız Mahallelerinin kaya düşme tehlikesi bakımından Kurşunlu Mahallesi'ne kıyasla daha riskli bir alanda olduğu belirlenmiştir.

Hatuniye Mahallesinde, yamaç şeklinin iç bükeyliğine bağlı olarak kaya düşmesi analizlerinde enerji ve hız sönmlemeleri belirli bir alanda yoğunlaşırken, Helkız Mahallesinde geniş bir alanın kaya düşmelerinden etkilendiği görülmüştür.

Yamaç yüzeylerinin süreksizlik denetimli duraysızlık değerlendirilmelerinde özellikle Helkız Mahallesinde kireçtaşlarının tabaka eğim yönlerinin yamaç eğim yönüyle paralellik göstermesi nedeniyle düzlemsel kayma riskinin olduğu belirlenmiştir. Birbirlerini kesen farklı süreksizliklerin kamasal kayma, yamaçların üst kotlarında kireçtaşları içerisinde 65° eğim değerine sahip süreksizliklerin ise blok devrilmesi riskini arttırdığı tespit edilmiştir.

8. Sonuç ve Öneriler

Yapılan kaya düşmesi analizlerinden Hatuniye Mahallesinde 15 adet işyerinin, demiryolu güzergahının ve 420 m kotunun üzerindeki tarihi sit alanlarının etkilenebileceği tespit edilmiştir. Helkız Mahallesinde metruk yapıların ve tarihi tescilli yapıların kaya düşmesi riski altında olduğu belirlenmiştir. Kurşunlu Mahallesinde ise 3 adet yapının kaya düşmesi riski altında olduğu görülmüştür.

Helkız Mahallesinin üst kotlarındaki yamaç yüzeylerinin Hatuniye ve Kurşunlu Mahallelerinin üst kotlarında yer alan yamaçlara kıyasla daha yüksek açılı olmasından dolayı Helkız Mahallesinde bulunan yapıların kaya düşmesinden diğer Mahallelere göre daha fazla etkileneceği belirlenmiştir. Yapılan kinematik analiz değerlendirmelerinde süreksizliklere bağlı duraysızlık sorunlarının Hatuniye Mahallesi oranla Helkız Mahallesinde daha fazla olduğu görülmüştür.

Hatuniye ve Helkız Mahallelerinde meskun alanların yanı sıra demiryolu güzergahı ve tarihi tescilli yapıların kaya düşmesi riski bulunan alanlarda yer alması nedeniyle her iki Mahallede de ilgili kurumlarca ıslah projelerinin geliştirilmesinde fayda görülmektedir.

Elde edilen veriler yamaç duraylılığı ve kaya ıslahına yönelik değerlendirildiğinde, incelenen kaya kütlelerinde belirlenen duraysızlıkların önlenmesi için saha koşullarına uygun ıslah yöntemlerinin projelendirilmesi ve uygulanması kaçınılmazdır. Harşena Dağı zirvesine yakın serbest/yarı serbest kaya bloklarının düşme analizlerine göre düşme hatları boyunca sıçrama yüksekliklerinin birkaç noktada 10 metrenin üzerine çıktığı, kısa mesafelerde yüksek hız (20 m/s) ve yüksek kinetik enerji (10000 kJ) değerlerine (Şekil 8 ve Şekil 9) ulaştıkları ve düşmesi muhtemel kaya bloklarının birbirlerinden uzak, farklı kot ve lokasyonlarda yer aldığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre koruma türü (kaya bariyerleri vb.) imalatları yerine, stabilizasyon türü önlemlerin daha verimli olacağı tespit edilmiştir. Kaya bariyerlerinin tercih edilmesi halinde çok sayıda kademeli yüksek enerji sönmlemeli kaya bariyer imalatı gerekeceğinden, söz konusu bu imalatlar yüksek maliyetlere neden olacaktır. Bu nedenle şev yenilmelerine bağlı yüksek sıçrama potansiyeline sahip kaya bloklarının çelik tel ağ, halat panel ağ ve pasif ankrajlar kullanılarak iyileştirilmesi ve yamaç yüzeylerinde stabilizasyona yönelik önlemlerin alınması oluşabilecek zararları en aza indirecektir.

Teşekkür

Kaynak zondaki süreksizlik denetimli yenilmelerin analizlerinde Dips8.0 deneme sürümü ve üç-boyutlu (3D) kaya düşmesi analizlerinde Rocfall3D deneme sürümü kullanılmıştır. Yazarlar, çalışmanın gerçekleşmesinde kullanılan verileri sağlayan T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Amasya İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'ne teşekkür eder.

Kaynaklar

- Ağca, M., Gültekin, N. Y., & Kaya, E. (2020). İnsansız hava aracından elde edilen veriler ile kaya düşme potansiyelinin değerlendirilmesi: Adam Kayalar örneği, Mersin. *Geomatik Dergisi*, 5(2), 134–145.
- Akın, M., Dinçer, İ., & Orhan, A. (2020). *Kaya düşmelerinden kaynaklı afetlerin değerlendirilmesine yönelik teknik kılavuz* (1. baskı). T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- 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(2), 211–232.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z., & Oktay, C. Ö. (2015). Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) karayolundaki kaya şevlerinin kinematik ve limit denge yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1–2), 1–10.
- Alemdağ, S., Bostancı, H. T., & Gacener, E. (2022a). GIS-based determination of potential instabilities and source rock areas on the Torul-Kürtün (Gümüşhane) motorway, rockfall, and protection structure analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(1), Article 30. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02498-7>
- Alemdağ, S., Kara, R. T., & Bostancı, H. T. (2022b). Evaluation of potential rock falls with three-dimensional analysis: Example of Oltanbey and Hasanbey districts (Gümüşhane city center). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 169, 87–104.

- Alizadeh, E. (2021). *Altındere Vadisi (Maçka-Trabzon) boyunca gözlenen kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyelinin çevresel etkilerinin 2 ve 3 boyutlu benzetim modeller ile incelenmesi* [Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Alp, D. (1972). *Amasya yöresinin jeolojisi*. İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Monografileri, 22.
- Ateş, Ş., Üstün, A. B., Osmanoğlu, R., Mutlu, G., Erkal, T., Özerk, O. C., Gülmez, F. K., & Çiçek, İ. (2006). *Amasya ili ve (il-ilçe merkezleri) kentsel gelişme alanlarının yerbilim verileri* (MTA Raporu No. 10893). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Bowa, V. M., & Kasanda, T. (2020). Wedge failure analyses of the jointed rock slope influenced by foliations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 4701–4710.
- Bulut, F. (2022). Uçhisar Kalesi (Nevşehir) çevresini etkileyebilecek kaya düşmelerinin 2 ve 3-boyutlu analizlerle değerlendirilmesi [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rock fall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), 69–87.
- Durmuş, E., Coruk, Ö., & Karakaş, A. (2025). Kaya düşmeleri risklerine karşı esnek kaya bariyerlerinde enerji kapasitesi tayini ve uygun yer seçim kriterleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(1), 135–156.
- Düzgün, H. Ş., Akgün, A., & Gheibie, S. (2012). *Kaya düşmeleri ve kaya şev kaymaları için risk analizine dayalı mühendislik çözümlerinin değerlendirilmesi* (Proje No. 110M796). Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Erkek, Ş. (2023). Bozca Köyü'nde (Avanos-Nevşehir) 3 boyutlu kaya düşmesi tehlike değerlendirmesi [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Evans, S., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 620–636.
- Gigli, G., Lombardi, L., Carlà, T., Beni, T., & Casagli, N. (2022). A method for full three-dimensional kinematic analysis of steep rock walls based on high-resolution point cloud data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 157, Article 105178. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2022.105178>
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering* (1st ed.). Rocscience.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1977). *Rock slope engineering* (2nd ed.). The Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., Bray, J. W., & Boyd, J. M. (1973). The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 6(1), 1–55.
- Keskin, İ. (2017). Tarihi Safranbolu'yu çevreleyen kaya şevlerindeki duraysızlık problemlerinin kinematik analizlerle değerlendirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5), 769–781.
- Kumsar, H., Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2000). Dynamic and static stability assessment of rock slopes against wedge failures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 33(1), 31–51.
- Lim, S. S., & Yang, H. S. (2004). An analysis of plane failure of rock slopes by quantified stereographic projection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(3), 744–749.
- Lisle, R. J., & Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Mammoliti, E., Di Stefano, F., Fronzi, D., Mancini, A., Malinverni, E. S., & Tazioli, A. (2022). A machine learning approach to extract rock mass discontinuity orientation and spacing from laser scanner point clouds. *Remote Sensing*, 14(10), Article 2365. <https://doi.org/10.3390/rs14102365>
- Özcan, N. T. (2023). İskilip (Çorum) civarının kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 15(1), 219–232.
- Raghuvanshi, T. K. (2019). Plane failure in rock slopes: A review on stability analysis techniques. *Journal of King Saud University - Science*, 31(1), 101–109.
- Rahman, A.U., Zhang, G., AlQahtani, S.A., Janjuhah, H.T., Hussain, I., Rehman, H.U., Shah, L.A. (2023). Geotechnical Assessment of Rock Slope Stability Using Kinematik and Limit Equilibrium Analysis for Safety Evaluation. *Water*, 15, Article 1924. <https://doi.org/10.3390/w15101924>.
- Rocscience Inc. (2025). *Dips* (Version 8.0) [Computer software]. <https://www.rocscience.com/portal/free-trials>
- Rocscience Inc. (2025). *RockFall3D* [Computer software]. <https://www.rocscience.com/portal/free-trials>
- San, N. E., Topal, T., & Akın, M. K. (2020). Rockfall hazard assessment around Ankara Citadel (Turkey) using rockfall analyses and hazard rating system. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 3831–3851.
- Taga, H., & Zorlu, K. (2017). Assessment of rockfall hazard on steep slopes: Ermenek (Karaman, Turkey). *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 38(2), 161–178.
- Tiruneh, H. W., Stetler, L. D., Oberling, Z. A., Morrison, D. R., Connolly, J. L., & Ryan, T. M. (2013, June 23–26). *Discontinuity mapping using ground-based LiDAR: Case study from an open pit mine* [Conference presentation]. 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, United States.
- Ulusay, R., & Sönmez, H. (2007). *Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri* (2. baskı). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Utlu, M., Öztürk, M. Z., Şimşek, M., & Akgümüş, M. F. (2023). Evaluation of rockfall hazard based on UAV technology and 3D rockfall simulations. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(4), 1–16.
- Uzun, A., Aylar, F., Zeybek, H. İ., & Alemdağ, S. (2023). Tor topography in Giresun mountains, Türkiye. *Journal of Mountain Science*, 20(11), 3121–3137.
- Varol, O. O., Akın, M., Orhan, A., & Dinçer, İ. (2023). Kaya düşmelerinin 3-boyutlu olasılıksal analizlerle ve ampirik yöntemlerle değerlendirilmesi: Kayseri-Soğanlı yerleşim yeri örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 47(1), 1–28.
- Velju, D., Živaljević, S., & Mijajlović, G. (2024, March 5–9). *Deterministic approach of stability analysis for rock wedge failure* [Conference presentation]. 9th International Conference Civil Engineering-Science and Practice, Kolašin, Montenegro.
- Wang, I. T., & Lee, Y. C. (2012). Simulation and statistical analysis of motion behavior of a single rock fall. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 6(1), 17–26.
- Whittaker, E. J. W. (1984). *The stereographic projection* (1st ed-2001 Electronic edition.). University College Cardiff Press.

- Wyllie, D. C. (2015). *Rock fall engineering* (1st ed.). CRC Press.
- Wyllie, D. C. (2017). *Rock slope engineering: Civil applications* (5th ed.). CRC Press.
- Yang, X., Hu, J., Sun, H., & Zheng, J. (2024). An approach for determination of lateral limit angle in kinematic planar sliding analysis for rock slopes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(4), 1305–1314.
- Zanbak, C. (1973). Kaya şevlerinin stabilitesi ve stereografik izdüşüm yöntemi ile stabilite analizi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 12(3), 1–12.
- Zanbak, C. (1979). Kaya şevlerinde devrilme türündeki bozulmaların mekaniği ve deneysel irdelenmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 18(1), 28–39.