

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOZCA KÖYÜ'NDE (AVANOS-NEVŞEHİR) 3 BOYUTLU  
KAYA DÜŞMESİ TEHLİKE DEĞERLENDİRMESİ**

**Tezi Hazırlayan  
Şenol ERKEK**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail DİNÇER**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2023  
NEVŞEHİR**



**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOZCA KÖYÜ'NDE (AVANOS-NEVŞEHİR) 3 BOYUTLU  
KAYA DÜŞMESİ TEHLİKE DEĞERLENDİRMESİ**

**Tezi Hazırlayan  
Şenol ERKEK**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İsmail DİNÇER**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2023  
NEVŞEHİR**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. İsmail DİNÇER danışmanlığında Şenol ERKEK tarafından hazırlanan " **Bozca Köyü'nde (Avanos-Nevşehir) 3 Boyutlu Kaya Düşmesi Tehlike Değerlendirmesi** " başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

../07/2023

### JÜRİ

Başkan :

Üye :

Üye :

### ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../ 20..

Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA  
Enstitü Müdürü



## **TEZ BİLDİRİM SAYFASI**

Tez kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şenol ERKEK

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans dönemimde ve tez çalışmalarımnda benimle gerek bilgi paylaşımı olsun gerek her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan, Sayın Hocam Prof. Dr. İsmail DİNÇER'e,

Ayrıca, tez jürimde yer alarak katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Müge AKIN ve Dr. Öğr. Ü. Ahmet ORHAN'a,

Desteklerinden dolayı Jeoloji Mühendisliği bölümü öğretim elemanları Prof. Dr. Mutluhan AKIN'a, Prof. Dr. Feyza DİNÇER'e, Doç.Dr. Ayşe ORHAN'a, Dr. Öğretim Üyesi M. Avni AKÇE, Dr. Öğr. Üyesi Ogün Ozan VAROL ve Araş. Gör. Mehmet Yasin CANBOLAT'a

Ayrıca tez çalışma sahamın insansız hava aracı (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofotodan sayısal yüzey modeli (SYM) üretilmesinde yardımcı olan ALTINORAN TEKNİK ATOLYE çalışanlarına ve Nail USLU'ya ayrıca teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benim yanımda olan, aldığım kararları her zaman destekleyen, sadece bu çalışma sürecinde değil tüm hayatım boyunca bana destek veren babam Ahmet ERKEK'e annem Ayşe ERKEK'e eşim Zehra ERKEK'e kızım Zehra Nil ERKEK'e kardeşim Merve ERKEK'e

Teknik ve idari yardımlarından dolayı Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Rektörlüğü'ne, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dekanlığı'na, Jeoloji Bölüm Başkanlığı'na teşekkür ederim.

# BOZCA KÖYÜ'NDE (AVANOS-NEVŞEHİR) 3 BOYUTLU KAYA DÜŞMESİ TEHLİKESİ DEĞERLENDİRMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şenol ERKEK

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

## ÖZET

Kapadokya bölgesinde doğal ve kültürel mirasın yanı sıra bölgede birçok yerleşim alanı da kaya düşmelerinden ciddi anlamda etkilenmektedir. Nevşehir ili, Avanos ilçesine bağlı Bozca köyü, kaya düşmelerinin tehdidi altında olup, kuzeyinde kayadan oyma yapıların bulunduğu bölge daha önce, kaya düşmesi nedeniyle afete maruz bölge ilan edilmiştir. Bozca köyünün kuzey batısında yer alan Uzaktepe'de ignimbiritlerden oluşan kaynak alanda ayrışma ve süreksizlik kontrollü duraysızlıklar meydana gelmektedir. Bunun sonucu ana kütlede ayrılan bloklar, yamaç boyunca hareket ederek daha alt kotlarda bulunan konut, yol vb. yapıları tehdit etmektedir. Söz konusu kaya düşmelerini değerlendirmek üzere insansız hava aracı (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofotodan sayısal yüzey modeli (SYM) üretilmiş ve RocPro3D kullanılarak 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde maksimum blok boyutu 4 m<sup>3</sup> olarak kabul edilerek, kaynak alandan 10000 adet kaya blok düşürülmüştür. Yapılan 3-boyutlu olasılıksal analiz sonuçlarına göre düşen bloklar hareketleri sırasında toplam kinetik enerji değerleri maksimum 10000 kJ, sıçrama yükseklikleri 5 m olarak belirlenmiştir. Düşen blokların ulaşabildikleri en uzak mesafe 87 metre olup, blokların önemli bir bölümü son yıllarda ağaçlandırma çalışmaları sırasında oluşturulan yolda durmaktadır. Ağaçlandırma çalışmaları kapsamında açılan yol ve oluşturulan teraslar blokların enerjisini sönmleyen ve blokların hareketini sınırlandıran bir koruma yapısı gibi davranmakta ve blok hareketini sınırlandırmaktadır.

**Anahtar kelimeler** : *Kaya düşmesi, 3-boyutlu olasılıksal analiz, ignimbirit, Nevşehir*

**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. İsmail DİNÇER

**Sayfa Adedi** : 65

**3D ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT IN BOZCA VILLAGE (AVANOS-NEVŞEHİR(M. Sc. Thesis)**

**Şenol ERKEK**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**July 2023**

**ABSTRACT**

As in the natural and cultural heritage in the Cappadocia region, many residential areas are seriously affected by rockfalls. Bozca village of Nevşehir province is under the threat of rockfalls, and some part of the village has been defined a disaster area due to rockfalls. Weathering and discontinuity-controlled rock mass instabilities occur in the source area consisting of ignimbrites in Uzaktepe, where is located in the northwest of Bozca village. As a result, the blocks leave from the source area move along the slope and threaten structures such as houses and roads located at lower levels. To assess the rockfall event, a digital surface model (DEM) was produced from the high resolution orthophoto obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV) and 3-dimensional probabilistic rockfall analyzes were performed by using the RocPro3D software. In the analysis, the maximum block size was accepted as 4 m<sup>3</sup>, and 10000 rock blocks were dropped from the source zone. According to the results, the kinetic energy values during the movements of the blocks falling from the source zone were determined as maximum 10000 kJ and bounce height was determined as 5 m. The runout distance 87 meters, and a significant part of the falling blocks stop on the road created during the afforestation works in recent years. The road and terraces created within the scope of afforestation works have changed the topography and they act as a protection structure that absorbs the energy of the blocks and restricts the movement of the blocks.

**Key words** : *Rockfall, 3-dimensional probabilistic analysis, ignimbrite,*

**Thesis Supervisor** : Prof. Dr. İsmail DİNÇER

**Page Number** : 65

# İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xi
1. BÖLÜM	
GİRİŞ .....	1
1.1. Kaya Düşmeleri.....	2
1.1.1. Yapısal Faktörler .....	4
1.1.2. Çevresel Faktörler .....	5
1.1.3. Antropojenik Faktörler .....	5
2. BÖLÜM	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
3.BÖLÜM	
MATERYAL VE METOD .....	11
3.1. Materyal .....	11
3.2. Metod .....	11
3.2.1. Arazi Çalışmaları .....	11
3.2.2. Labaratuvar Çalışmaları .....	12
3.2.2.1. Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	13
3.2.2.2. Porozite (Gözeneklilik) ve Boşluk Oranının Belirlenmesi .....	13
3.2.2.3. Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme Oranının Belirlenmesi .....	13
3.2.2.4. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (UCS) .....	14
3.2.3. Büro Çalışmaları .....	15
3.2.3.1. Kinematik Analizler .....	15

3.2.3.1.1.	Düzlemsel Kaymanın Analizi .....	17
3.2.3.1.2.	Kama Tipi Kaymanın Analizi .....	17
3.2.3.1.3.	Devrilme Tipi Kaymanın Analizi.....	17
3.2.3.2.	3B Kaya Düşme Analizleri .....	19
4.BÖLÜM	.....	21
<b>BULGULAR</b>		
4.1.	Çalışma Alanının Jeolojisi .....	21
4.1.1.	Altıpınar Formasyonu (Boztepe Üyesi) .....	21
4.1.2.	Tuzköy Formasyonu.....	22
4.1.3.	Ürgüp Formasyonu (İncesu Üyesi) .....	23
4.1.4.	Ürgüp Formasyonu (Topuzdağ Bazaltı).....	23
4.1.5.	Kızılırmak Çakıltası .....	24
4.1.6.	Alüvyon.....	24
4.2.	Çalışma Alanının Mühendislik Jeolojisi .....	24
4.2.1.	Kireçtaşı (Gösel Kireçtaşı).....	25
4.2.2.	Kumtaşı (Vs-1).....	26
4.2.3.	İğnimbirit-1 (İgm-1).....	26
4.2.4.	İğnimbirit-2 (İgm-2).....	26
4.2.5.	Çakıltası.....	27
4.2.6.	Kiltaşı-Marn-Kumtaşı (Vs-2).....	27
4.2.7.	İğnimbirit-3 (İgm-3).....	27
4.3.	Kaya Kütle Duraysızlıkları .....	27
4.4.	Kaynak Alanın Malzeme ve Kaya Kütle Özellikleri .....	31
4.5.	Kinematik Analiz Sonuçları .....	37
4.5.1.	Süreksizlik düzlemlerinin kayma dayanımı .....	37
4.6.	Kaya Düşme Analizleri .....	44
5.BÖLÜM	.....	
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	58
KAYNAKLAR	.....	61
ÖZGEÇMİŞ	.....	65

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1.	Kaynak alanı oluşturan ignimbiritlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	31
Tablo 4.2.	Kinematik analizlerde göz önünde bulundurulan şev parametreleri .....	40
Tablo 4.3.	Belirlenen sektörlere göre kinematik açıdan oluşabilecek duraysızlıkların oransal dağılımı.....	40
Tablo 4.4.	3-B kaya düşme analizleri için kullanılan geri verme ve sürtünme katsayıları .....	47



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Çalışma alanı yer bulduru haritası .....	2
Şekil 1.2.	Kaya düşmesinin bölgeler halinde şekilde gösterilmesi (Evans ve Hungr, 1993; Fanos ve Pradhan, 2018; Afad, 2020) .....	3
Şekil 3.1.	Arazide Schmidt çekici ve İğne penetrometresi deneyinin uygulanması ..	11
Şekil 3.2.	Kaynak alandan alınan ignimbirit bloklarından hazırlanan karot örnekleri .....	13
Şekil 3.3.	Karot örneklerinin saf su içinde görünümü .....	14
Şekil 3.4.	Tek Eksenli sıkışma dayanımı deneyinin görünümü .....	14
Şekil 3.5.	Başlıca şev duraysızlık türleri ve bunların stereonet çizimleri (Hoek ve Bray, 1977) .....	16
Şekil 3.6.	Düzlemsel kayma koşulu ve düzlemsel kaymanın kinematik analizi (Hoek ve Bray, 1977) .....	18
Şekil 3.7.	Kama tipi yenilme koşulu ve kinematik analizi (Hoek ve Bray, 1977) .....	19
Şekil 4.1.	Çalışma alanının ve civarının jeolojisi (Atabey, 1989) .....	21
Şekil 4.2.	Tuzköy formasyonun genel görünümü (batıya bakış) .....	22
Şekil 4.3.	Tuzköy-İncesu ignimbiritlerin genel görünümü (kuzey doğuya bakış) .....	24
Şekil 4.4.	Çalışma alanındaki birimlerin araziden genel görünümü .....	25
Şekil 4.5.	Çalışma alanı batı-doğu boyunca mühendislik jeolojisi kesiti .....	26
Şekil 4.6.	Kaya kütle duyarsızlıklarının meydana geldiği topografyanın genel görünümü .....	28
Şekil 4.7.	Malzeme alımı ve ayrışma sonucu blokların asılı hale gelişinin görünümü .....	29
Şekil 4.8.	Ana kayadan süreksizlik boyunca ayrılmış bloklar .....	29
Şekil 4.9.	Kaynak alandaki kaya kütle duyarsızlıkları ve düşmüş blokların görünümü .....	30
Şekil 4.10.	Çalışma alanında gözlenen ignimbiritlerin farklı dayanım sınıflandırmalarındaki konumu .....	32
Şekil 4.11.	İğne penetrometresi direncinden kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının tahmin edilmesine yönelik grafik (Ulusay ve Ergüler, 2012) .....	33
Şekil 4.12.	Arazide düşey soğuma çatlakları ve süreksizliklerin genel görünümü .....	34



Şekil 4.13.	Kaynak alandaki hakim süreksizlik takımları ve kontur diyagramları.....	35
Şekil 4.14.	Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) abağında İgnimbirit-2 biriminin gösterimi (Sönmez ve Ulusay, 2002).....	36
Şekil 4.15.	RS Data yazılımının ekran görüntüsü (Rocscience, 2023).....	37
Şekil 4.16.	Kaynak alanda yer alan ignimbiritler için belirlenen süreksizlik yenilme zarfı.....	38
Şekil 4.17.	Kaynak alanda kinematik analizler için ayrılan sektörler.....	39
Şekil 4.18.	Sektör 1 ve 2 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları.....	41
Şekil 4.19.	Sektör 3 ve 4 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları.....	42
Şekil 4.20.	Sektör 5 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları.....	43
Şekil 4.21.	Sektör 5 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları.....	44
Şekil 4.22.	Çalışma alanının sayısal yüzey modeli.....	45
Şekil 4.23.	İnceleme alanının eğim modeli.....	45
Şekil 4.24.	Kaya düşmesi kaynak alan ve litolojik ayrımlar.....	46
Şekil 4.25.	Daha önceden düşmüş blokların genel görünüşleri.....	47
Şekil 4.26.	3-boyutlu kaya düşme analizlerinde blok dinamiğine (ignimbiriti için) ait parametreler ve değişkenlik aralıkları.....	48
Şekil 4.27.	3-boyutlu kaya düşme analizlerinde blok dinamiğine (sedimanter seviye için) ait parametreler ve değişkenlik aralıkları.....	48
Şekil 4.28.	3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatları.....	49
Şekil 4.29.	3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan toplam kinetik enerji modeli.....	50
Şekil 4.30.	3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan sıçrama yükseklikleri.....	51
Şekil 4.31.	3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan blokların hareket hızları.....	51
Şekil 4.32.	3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan blokların hareket süreleri.....	52
Şekil 4.33.	3-B kaya düşme analizi ile belirlenen blokların durma noktaları.....	53
Şekil 4.34.	8632 numaralı bloğun toplam kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği değerlerinin yuvarlanma hattı boyunca değişimi.....	54
Şekil 4.35.	3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatlarının ortofoto.....	56
Şekil 4.36.	3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatlarının ortofoto üzerinde detay görünümü (Şekil 4.35’de ait olduğu alan gösterilmiştir) ..	57
Şekil 4.37.	Çalışma alanının kuzeyinde kaynak alan ve topoğrafik düzlük.....	57
Şekil 5.1.	Mevcut yol boyunca açılacak kaya tutma hendeğinin performansı.....	60

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ISRM</b>	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (International Society of Rock Mechanics)
<b>JCS</b>	Süreksizlik yüzey mukavemeti (joint compressive strength)
<b>JRC</b>	Süreksizlik pürüzlülük katsayısı (joint roughness coefficient)
<b>kN</b>	Kilo Newton
<b>UCS</b>	Tek eksenli basınç dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)
<b>RMR</b>	Kaya Kütle Özellikleri
<b>GSI</b>	Jeolojik Dayanım İndeksi
<b>RQD</b>	Kaya Kalitesi Tanımı
<b>DC</b>	Süreksizlik Durumu
<b>DS</b>	Süreksizlik Aralığı
<b>SCR</b>	Süreksizlik Yüzey Koşulu

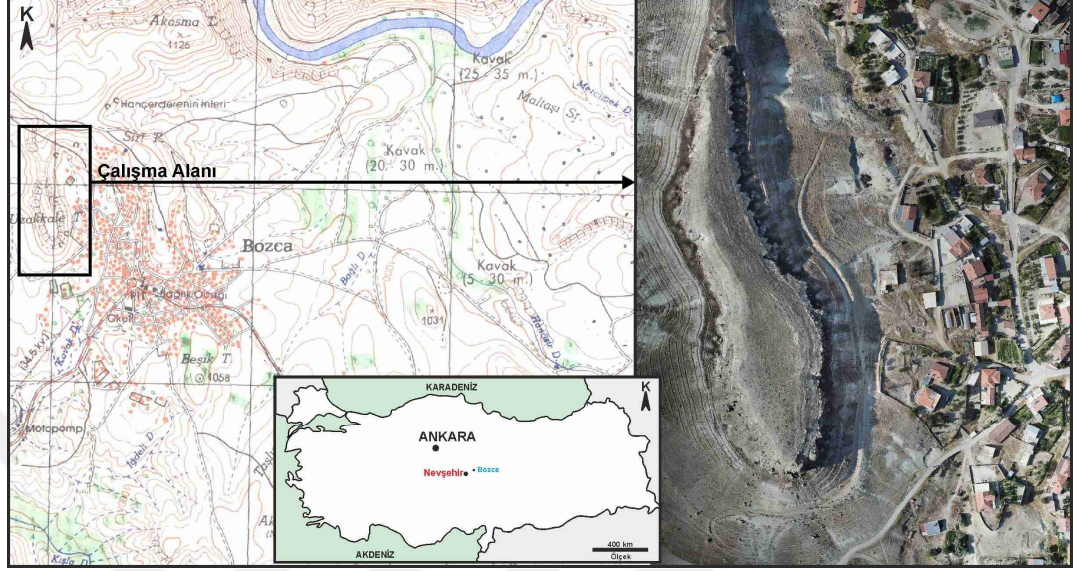
## 1.BÖLÜM

### GİRİŞ

Ülkemizde içinde bulunduğu jeolojik konumu, jeomorfolojik ve iklimsel durumu nedeniyle her yıl mal ve can kaybına yol açan deprem, heyelan, sel vb. birçok doğal afet meydana gelmektedir. Söz konusu doğa olaylarından dolayı ülkemiz büyük ekonomik zararlar ile karşı karşıya kalmakta ve bu doğa olaylarının ülkeye zararı giderlerimizin yaklaşık %3-4 ü oranındadır. Depremler neden oldukları sonuçlardan dolayı en önemli doğal afetler arasında öne çıkmaktadır. Ancak, kaya düşmeleri de ülkemizde görülen önemli doğal afetler arasında yer almaktadır. Gökçe ve diğ., (2008) tarafından hazırlanan raporda, kaya düşmesi olaylarının ülkemizin her yerinde görüldüğü ve en çok kaya düşmesi olaylarının sırasıyla Erzurum, Nevşehir Kayseri illerinde gerçekleştiği belirtilmiştir. Büyük bölümünün Nevşehir sınırları içerisinde yer alan Kapadokya, doğası, tarihi ve kültürel değerleri ile 1985 yılında UNESCO tarafından dünyada korunması gerekli Kültür Mirası listesine dâhil edilmiş olup, aynı zamanda ülkemizin de en önemli turizm alanlarından biridir. Bölge ve sahip olduğu doğal, tarihi ve kültürel miras meydana gelen veya gelebilecek kaya düşmelerinin tehdidi altındadır.

Bu tez kapsamında Avanos ilçesine bağlı Bozca köyünde yerleşim alanını etkileyen kaya düşmeleri mühendislik jeoloji açısından incelenmiş olup, Bozca köyü Nevşehir il merkezine 38,2 km, Avanos ilçe merkezine 22,9 km uzaklıktadır (Şekil 1.1). Köy nüfusunun 700'ün altında olduğu tahmin edilmektedir Köyün önemli bir bölümü kaya düşmesi afetinden dolayı afete maruz bölge ilan edilmiş olup, tez kapsamında çalışılacak olan Uzaktepe ve doğusu henüz afet kapsamına alınmamıştır. Bu çalışmada köy merkezinin kuzey batısında kalan yaklaşık 5 km<sup>2</sup>'lik bir alan incelenmiştir. Tez kapsamında olası kaya düşmeleri 3-boyutlu analizler ile değerlendirilerek, kaya düşme tehlike zonu belirlenmiştir. Bu amaç için arazi, laboratuvar ve büro çalışmaları kapsamında kaya malzeme ve kütle özellikleri belirlenmiş, düşebilecek potansiyel bloklar haritalanmıştır. Daha sonra İnsansız hava aracı (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofotodan sayısal yüzey modeli (SYM) üretilmiştir. SYM üzerinde RocPro3D yazılımı ile 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece kaynak alandan ayrılacak blokların hareketleri sırasında ulaşabilecekleri toplam kinetik enerji, maksimum sıçrama yüksekliği, ötelenme hızları ve maksimum durma mesafeleri

belirlenmiştir. Eldeki bulgular ışığında çalışma alanında yer bulunan konut, yol vb. yapılar için kaya düşme tehlikesinin boyutları tanımlanmıştır.



Şekil 1.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

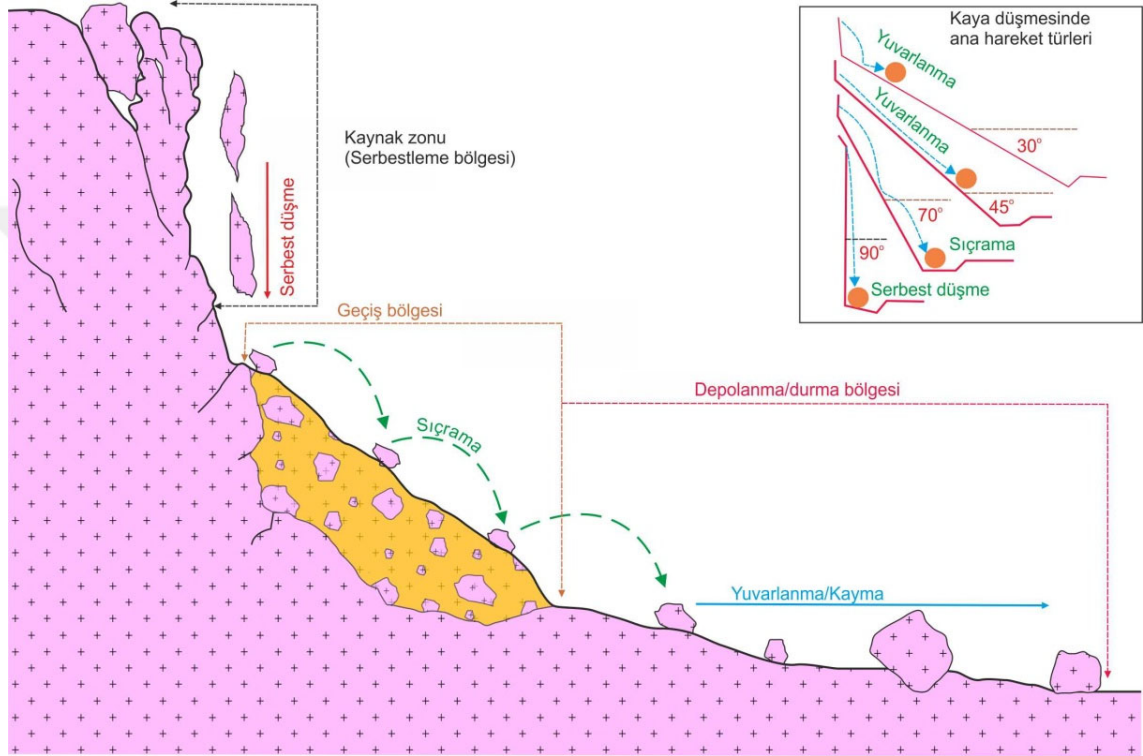
### 1.1. Kaya Düşmeleri

Kaya düşmeleri doğal olaylardır ve dünya genelinde çeşitli coğrafi bölgelerde meydana gelir. Bu olaylar, kaya bloklarının eğimli yamaçlardan veya dağlardan koparak aşağıya doğru hareket etmesi şeklinde gerçekleşir. Kaya düşmeleri ciddi tehlikeler oluşturabilir ve insanlar, yapılar ve çevre üzerinde önemli hasarlara neden olabilir.

Kaya düşmesi kayalık bir yamaçtan veya gevşek materyalden kopan kaya ve/veya kaya bloklarının düşmesi, yuvarlanması veya yere çarpıp sıçrayarak ilerlemesi olarak tanımlanmıştır. Taş ve kaya yuvarlanmalarında kopmanın başladığı noktadan depolandığı yere kadar takip ettiği hat yörünge olarak adlandırılır. Yörünge yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla: Başlama (Kaynak) bölgesi, Geçiş bölgesi, Depolanma bölgesi olarak üçe ayrılır (Şekil 1.2). Taş ve kaya yuvarlanmaları yörüngelerinin hareket şekilleri dikkate alınarak; serbest düşme, sıçrama, yuvarlanma ve kayma olmak üzere 4 farklı şekilde tanımlanabilir.

Düşen bir taş ve/veya kaya genellikle serbest düşme şeklinde ilk hareketine başlar sonra yamaca çarpar ve yamaç boyunca ya sıçrayarak (bouncing) ya yuvarlanarak ya da kayarak hareketine devam eder. Eğimin düşmeye başladığı yerde de hızını ve enerjisini kaybederek yavaşlamaya ve durmaya başlar (Heidenrich, 2004).

Bu durum yörünge boyunca yolunun üzerinde herhangi bir yapay ya da doğal engelin olmaması durumunda geçerlidir. Yamaç eğimi  $45^\circ$  ise bloklar genellikle yuvarlanarak,  $46-63^\circ$  arasında ise sıçrayarak,  $63^\circ$  den fazla ise de serbest düşme şeklinde hareket etme eğilimindedir. Çok büyük kaya blokları ise kayarak hareket etmektedirler.



Şekil 1.2. Kaya düşmesinin bölgeler halinde şekilde gösterilmesi (Evans ve Hungr, 1993; Fanos ve Pradhan, 2018; Afad, 2020)

Kaya düşmeleri, dik yamaçlarda, maden şevlerinde, dağlık arazilerde meydana gelen yerleşim yerlerine, kara ve demir yollarına zarar veren doğal afet türlerindedir. Kaynak zonda askıda duran kaya blokları yer çekimi etkisiyle veya deprem gibi dinamik yüklerin etkisiyle yamaç boyunca harekete başlarlar ve düşerken geçtiği alanlarda bulunan tarihi yapılara, yollara, yerleşim yerlerine ciddi zararlar vererek ölüm ve yaralanmalarla neticelenebilmektedir. Ülkemizde özellikle Karadeniz Bölgesi, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgeleri kaya düşme olaylarının sıklıkla meydana geldiği yerlerdir. Kayseri, Nevşehir, Erzurum, Erzincan illeri kaya düşme olaylarının en fazla meydana geldiği illerdir (Gökçe ve diğ., 2008). Kaya düşmeleri nedeniyle ülkemizde birçok yerleşim

yeri afete maruz bölge olarak ilan edilmiştir. Literatürde kaya düşmeleri ile birçok çalışma bulmak mümkündür.

Kaya düşmelerinde, farklı kuvvetlerin etki ettiği bölgelerde meydana gelen, kaya düşmelerini tetikleyen birçok etken bulunmaktadır. Bu faktörleri yapısal, çevresel ve antropojenik faktörler olarak üç başlık altında inceleyebiliriz. Antropojenik faktörler, uygun olmayan şev tasarımları, trenlerin ve büyük inşaat araçlarının sebep olduğu sarsıntılar ve kontrolsüz yapılan patlatmaların sebebiyet verdiği kaya düşmeleri başlıkları altında incelenmektedir. Yapısal faktörler, kırıklı-çatlaklı kaya kütleleri, kinematik olarak duraysızlık potansiyeli olan süreksizlik yüzeyleri ve yamacın/şevin jeolojik yapısı olarak üç ana başlık altında toplanır. Son olarak çevresel faktörleri inceleyecek olursak, rüzgâr, donma-çözülme, yağmur, kar erimeleri, ani yüzeysel akışlar, su kaynakları veya sızıntılar, kazıcı hayvanlar, farklı ayrışma, ağaç kökleri, depremler gibi 10 faktör adı altında incelenmektedir (Volkwein vd., 2011).

### **1.1.1. Yapısal Faktörler**

Kaya düşmelerinde önemli pay sahibi olan faktörlerden birisi de yapısal faktörlerdir. Yapısal faktörler üçe ayrılır; yamacın jeolojik yapısı, kinematik olarak duraysızlık potansiyeli olan süreksizlik yüzeyleri ve kırıklı-çatlaklı kaya kütleleri.

Kaya düşmeleri, topografyanın dik olduğu alanlarda yüksek kotlarda yüzeylenen kaya kütlelerinde blokların ufak hareketlerle durağanlılığını kaybederek yüksek kottan düşük kota doğru yüksek hızla hareket ettiği bir tür yamaç duraysızlığı olarak tanımlanır.

Tabakalanma eğim açısının, süreksizlik yüzeyi sürtünme açısından büyük olması durumunda yüzeyler üzerinde kayma meydana gelir. Kaya düşmesi, sarp arazide açığa çıkan ve süreksizliklerle ayrılmış bir dizi kaya kütlelerinin eğim yönünde aşağı yönde hareket etmesi anlamına gelir. Dik zeminden düşerler, yokuşlarda dengelerini kaybederler ve arazideki tüm enerji tükenene kadar devam yuvarlanmaya devam ederler. Tektonik (dış), termal (ısısal) veya kalıntı (iç) stresler sonucu oluşturulan, bir boyutu diğer iki boyutuna göre çok dar, düzlemsel veya hemen hemen düzlemsel süreksizlikler, kırık olarak adlanır. Bir kayaç kütlesi kırılma sonucu kırık yüzeyi boyunca iki bloğa ayrılır. Bu bloklar arasındaki kırılma yüzeyi boyunca dikliği çekecek kadar açıklık meydana gelmemişse ve bloklar birbirine göre kaymamışlarsa, bu tür kırıklara çatlak adı verilir.

### **1.1.2. Çevresel Faktörler**

Çevresel faktörler (dış faktörler); Yağmur, Donma-çözülme, Rüzgâr, Kar erimeleri, Ani yüzeysel akışlar, Su kaynakları veya sızıntılar, Kazıcı hayvanlar, Farklı ayrışma, Ağaç kökleri, Depremler olmak üzere on bölümde incelenebilir. Tamamen doğa olaylarının etkili olduğu olaylar sonucunda kaya düşmelerine sebebiyet veren faktörlerdir.

### **1.1.3. Antropojenik Faktörler**

Antropojenik faktörler; Kontrolsüz patlatma olayları, trenlerin ve büyük inşaat araçlarından kaynaklı sarsıntılar, kaya düşmelerini destekleyebilecek olan çevre ayarlamaları olmak üzere üç bölümde incelenmektedir. Tamamıyla dış faktörler olup insan eliyle doğaya müdahale edilip kaya düşmelerine sebebiyet verilmektedir.

## 2.BÖLÜM

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kaya düşmesi olayları ülkemizin tamamında görülüyor fakat, karasal iklimin hüküm sürdüğü, gece-gündüz sıcaklık farklarının yüksek olduğu, dolaylı olarak fiziksel aşınmanın etkin görüldüğü yerlerde daha fazla gözlenmektedir. En fazla kaya düşmesinin meydana geldiği iller sıralandığında, Kayseri, Erzurum, Nevşehir, Adıyaman ve Sivas illeri ilk beşe girmektedir. Afettede sayısına bakıldığında da Kayseri, Nevşehir, Niğde, Erzurum ve Karaman öne çıkmaktadır. Çalışma alanında içerisinde yer aldığı Kapadokya Bölgesi sahip olduğu, jeolojik miraslardan dolayı birçok çalışmaya konu olmuştur. Bölgede yapılan bilimsel çalışmalarda kaya düşmelerinin süresizlikler (soğuma çatlakları) ve atmosferik koşulların (donma-çözülme, ıslanma-kuruma vb.) kontrol ettiği ayrışma tarafından tetiklendiği belirtilmiştir (Topal ve Doyuran, 1997; Topal ve Doyuran, 1998; Ulusay vd., 2006; Aydan vd., 2007, 2008, Tuncay, 2011; Kaşmer ve Ulusay, 2013; Kaşmer vd., 2013; Dinçer vd., 2016; Akın vd., 2021a).

Kapadokya civarlarında, alt seviyelerde bulunan çakıltaşı-konglomera gibi birimlerin en üst seviyede bulunan ignimbirit gibi birimlere göre duraylılığının daha düşük olması nedeniyle, söz konusu yüzey şekillerinde önemli ölçüde kaya düşme tehlikesi yaşanmaktadır (Zorlu vd., 2009).

Kapadokya, 1985 yılında UNESCO tarafından dünyada korunması gerekli Kültür Mirası listesine dâhil edilmiş olmakla birlikte bölgedeki doğal, tarihi ve kültürel miras dik yamaçlar boyunca ortaya çıkan kaya düşmeleri sonucunda tahrip olmaktadır. Bölgede kaya düşmeleri Neojen yaşlı volkano sedimanter ardalımalı piroklastik birimler içerisinde meydana gelirken, dayanım ve kaynaşma farklılıklarına bağlı olarak gelişen farklı ayrışma kaya düşmelerini meydana getiren en önemli unsurlar arasındadır (Zorlu vd., 2011).

Kaya düşmeleri Kapadokya bölgesi için önemli bir mühendislik jeolojisi problemi olup, koruma çalışmalarını zorlaştıran bir unsurdur. Koruma ve iyileştirme çalışmalarının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için kaya düşmelerinin mekanizması ve süreci etkileyen faktörlerin yenilikçi yöntemlerle ortaya konulması büyük önem taşımaktadır (Topal vd. 2012).



Turistik işletmelerin var olduğu Akköy(Ürgüp) yerleşim yerinde, düşebilecek kaya bloklarının yaşam alanlarına ulaşmasını engellemek için, üst bölgelere 2 metreye yaklaşan derinlikte ve yaklaşık 1 kilometre uzunluğunda kaya tutma hendeği yapılmış olup, kaya düşme tehlikeleri kontrol altına alınmak istenmiştir (Dinçer vd. 2019).

Kaya düşmeleriyle ilgili olarak Ürgüp ilçesi Şahinefendi köyünde olan kaya düşmelerinin değerlendirilmesi çalışmalarında bölgenin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan mühendislik jeolojisi, arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, kinematik ve kesitler üzerinde Rocfall 6.0 programının yazılımı kullanılarak 2-boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirildi. Sonuç olarak açılan hendeklerin görevlerini yerine getirmediği gözlenmiş olup, hendeklerin düşebilecek kayaları önleyebilmesi için durumlarının iyileştirmek gerektiğini belirlemişlerdir (Buz., 2019)

Kapadokya bölgesinde yağmur, rüzgâr, sıcaklık ve diğer fiziki etmenler nedeniyle meydana gelen deformasyonlar sonucunda peri bacaları ve kayalık alanlarda çok fazla kaya düşmesi olayı meydana gelmektedir (Ağca vd. 2020).

Kapadokya bölgesinde ortaya çıkan kaya düşmeleri ve mağara çökmeleri gibi doğal afet olaylarının, geleneksel yerleşim alanlarında meydana getirdiği koruma problemleri, mimari miras bağlamında gözlemlenmiş olup geleneksel konutlardaki geleneksel yaşamın kültürel ve fiziksel izlerinin, dönüşüm süreçlerinde afet kararlarının sebebiyet verdiği durumlardan nasıl etkilenildiği değerlendirilmiştir (Şakar vd. 2020).

Bir kaya düşmesi hendeğinin etkinliğinin 3 boyutlu olasılık yoluyla değerlendirilmesi çalışmasında, bir yerleşim yerini düşen kayalardan korumak için oldukça uzun bir kaya düşmesi hendeğinin etkinliği araştırılmıştır. Yüksek çözünürlüklü dijital yüzey modelleri kullanılarak gerçekleştirilen 3 boyutlu kaya düşmesi analizlerine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Kaya düşmesi hendek verimliliği, blok yüzdesi dikkate alındığında çeşitli segmentler için orta ile sınırlı bulunmuştur. Ayrıca, hendek verimliliğinin hendek derinliğine duyarlılığı otomatik olarak analiz edilmiştir (Akın vd., 2021).

Batı Yunanistan'da Moira, Myloi ve Platiana yerleşim yerlerinde meydana gelen üç farklı kaya düşmesi olayının incelenmesinde kaya düşmesi gövdeleri boyunca yükseklik profilleri, çeşitli DSM'lerden oluşturulmuştur. Daha sonra bu profiller, 2D kaya düşmesi

için RocFall yazılımına uygulanmıştır ve üretilen simülasyonlar, DSM'lerin uzamsal çözünürlüğüne göre değerlendirildi ve saha gözlemleri ve ölçümleri ile teyit edilmiştir. Bu makalenin nihai kapsamı, RocFall yazılımı aracılığıyla kaya düşmesi simülasyonları için en uygun DSM sonucuna varmaktır (Kakavas vd., 2023).

Kuzey Tayvan'da yıkıcı bir kaya düşmesi olayı meydana gelmesinden sonra düşen bloklar istinat yapılarına ciddi şekilde zarar vermiştir. Kaya düşmelerinin yörüngesini bulabilmek için ve yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek için bir dizi araştırma yapılmış olup elde edilen verilerle üç boyutlu simülasyon geliştirilmiştir (Yang vd., 2022)

Dongshugang otoyoluna düşen kaya bloklarının, şev alanındaki potansiyel kaya düşmesi tehlikelerine ilişkin bir ön değerlendirme yapmak, koruyucu desteklerin iyileştirilmesi ve mükemmelleştirilmesi için jeolojik araştırma, sayısal simülasyon ve yapısal özelliklerin analizi ile süreksizlikler incelenmiş olup , kaya düşmesinin ana yenilme mekanizmaları ayrışma hasarı, düzlemsel kırılma, kama kırılması ve devrilme arızası olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada Rocfall v.4.0 yazılımını kullanılıp simülasyon analizi için blokların kütlesi 4000 kg olarak belirlenmiş ve maksimum kinetik enerjileri 1680.7 kJ'ye ulaşabilmektedir (Zhong vd., 2022)

Antik Kilistra doğal yerleşim alanında yapılan araştırmalarda bir tepe üzerinde yer alan yerleşim alanı sarp yamaçlarda düşen kayaların tehditi altındadır ve bu durum bazı tarihi yapıların yıkılmasına neden oluyor. Bölgedeki kaya düşmesi riski, sırasında arazi sahipleri ve ziyaretçiler için bugün ciddi tehlike durumundadır. Kilistra için kaya düşmesi tehlikesi değerlendirmesi deneysel araştırmaya dayalı yerleşim ve sayısal analizler, eğim profilleri, süreksizlikler üzerinde tarama hattı araştırmaları ve şevlerin stabilite analizleri yapılmış olup düşmüş ve düşebilecek kaya boyutları belirlenmiştir. Veriler ışığında kaya düşmesi analizlerinden, olası kaya düşmesine dayalı antik Kilistra için tehlike bölgeleri belirlenmiş olup yerleşim ve yakın çevresi tehlike altındadır. Sonuç olarak acil bir gereklilikte destek sistemlerinin kurulumu gerekmektedir (Bozdağ., 2022).

Saha ölçümlerinde olası kaya düşmesi profilleri belirlenmiş olup, 2B kaya düşmesi programına veriler girilmiştir. Kaya düşmesi olaylarını simüle etmek için gerçek blok boyutları girilmiştir ve sonuç olarak 2B yörünge modeline göre kaya düşmesi tehlikesi

gözlemlenemedi. Farklı analiz tekniklerinin kullanılmasının kaya düşmeleri için daha önemli olacağı ve kaya düşme riskinin belirlenebileceği görülmüş oldu (Sarı., 2022).

Hindistan'ın Mizoram eyaletinde Lengpui-Aizawl karayolu boyunca, üç boyutlu süreksiz modelleme tekniği kullanılarak anizotropik kayaçlardaki göçme sürecinin ve deformasyonun analizinin yapıldığı bu çalışmada, Ubiquitous-Joint modellerinin kaya kütlelerinin anizotropik davranışını içerecek bir alan ölçeğinde uygulanması için, 3DEC şev stabilitesi analizi kullanılarak yenilmeye eğilimli alanlar belirlenmiş olup kaya düşmesi analizleri de yapılmıştır. Düşen kaya bloklarının sekme yüksekliği ve toplam kinetik enerjileri belirlenmiştir. 3DEC programında yapılan analizlerde 0,25 m/s'lik maksimum hız ile 2,6 cm'lik maksimum toplam yer değiştirme, şevdeki dengesizliği doğrular durumdadır ve bu kaya düşmesi simülasyonu, düşen kaya bloklarının 58,5 kJ kinetik enerji ile yoldaki araca çarpabileceğini ortaya koymaktadır bu da yolu güvensiz hale getirmektedir (Sardana vd., 2020).

“Kakia” alanındaki tektonik olarak örselenmiş kireçtaşlarının Derecelendirme ve Kaya Düşmesi Tehlike Derecelendirme Sistemi değerleri “Patra–Atina–Selanik–Evzoni (P. A. T. H. E.)” otoyolunun bir parçası olan Skala”, Yunanistan'ın en önemli otoyollardan biridir. Bu nedenle jeolojik ve jeomorfolojik araştırmalar sonucunda bibliyografik referanslar ve yol yapımının özellikleri (tünel, bent, hendek vb.), tehlikeli konumlar tespit edildi. Son olarak, ayrı kaya düşmesi analizi için en tehlikeli iki bölge seçilmiştir. Bu Stabil olmayan blokların yörüngelerinin ve kinematik özelliklerinin tahmini için RocFall yazılımı kullanılmıştır. Düşen kinetik enerjiye göre doğru ölçülerde uygun destek ölçüsü seçilip düşebilecek kayalar uygun yere yerleştirilmiştir (Mazarakis vd., 2021).

Zonguldak-İstanbul karayolu şevleri yakınında meydana gelebilecek olası kaya düşme olaylarını ve olası kaya düşme risk değerlendirmesini incelendiği bu çalışmada Zonguldak'ın dağlık yöresinde kaya düşmesi olayları, kayadaki süreksizliklerin varlığı, kaya birimlerinin tektonizması ve yağış etmenleri ve bu etkenlerin birleşimi sonucu meydana gelmiştir. Bu amaçla, şev ve kaya özelliklerine ilişkin detaylı bir arazi gözlemi yapılmıştır. Toplu kütle yöntemine dayalı Rocfall nümerik analiz programı kullanılarak, bir lokasyonda alınan seçilmiş iki şev profili üzerinde kaya düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece, her bir ölçüm boyunca blokların sekme yüksekliği, düşme mesafesi, hızı ve kinetik enerjisi analiz edilmiştir. Kaya Düşmesi Potansiyel Tehlike

Değerlendirmesi, Evolving Rockfall Hazard Assessment (ERHA) yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, incelenen alan orta ila yüksek risk kategorisi olarak tanımlanır ve gerekli koruyucu önlemler önerilmiştir (Sakız vd., 2021).

Kaya boyutları ve şekilleri, kaya düşmelerinin gidişatını etkiler, bu çalışma sıçrama yüksekliğini ve etki alanı incelemiştir. Farklı kaya boyutlarına, kaya şekillerine ve zemin yüzeylerine göre düşen kayaların laboratuvar deneyleri farklı zemin yüzeylerinde 35°, 45° ve 60° eğim açılarından düşey olarak düşen çeşitli ebatlarda gerçekleştirilmiştir. Düşen kayaların mekanizmasını anlamak için, RocFall 5.0 (Rocscience), 2D kaya düşmesi sayısal simülasyon programı, farklı zemin yüzeylerinde çeşitli kaya şekilleri için olası sekme yüksekliğini ve etki alanını belirlemek için kullanılmıştır. Laboratuvar testinin uygulanabilirliğini doğrulamak için laboratuvar deneyi ve sayısal simülasyon karşılaştırıldı ve kaya düşmesi değerlendirme yapıp ve zıplayan bloklarda kritik bir parametre olan eski haline dönme katsayısını kalibre edilip sonuçlar belirlendikten sonra dik eğimler ve sert zemin yüzeyleri, düşen kayaların yüksek sekme yüksekliğine neden olur. Bu nedenle, kaya düşmesinin araştırılmasında kaya boyutlarının ve şekillerinin ve darbe yüzeyi malzemesinin etkisi göz ardı edilmemelidir (Nagendran vd., 2018).

## 3.BÖLÜM

### MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Materyal

Bozca köyü Nevşehir il merkezine 38,2 km, Avanos ilçe merkezine 22,9 km uzaklıkta olup, köy nüfusunun 700'ün altında olduğu tahmin edilmektedir. Köyün önemli bir bölümü kaya düşmesi afetinden dolayı taşınmış olup, çalışmaya konu olan bölge henüz afet kapsamına alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında köy merkezinin kuzey batısında kalan yaklaşık 5 km<sup>2</sup>'lik bir alan incelenmiştir.

#### 3.2. Metod

Bu çalışmada arazide detaylı ölçüm, kaya kütle ve litolojik tanımlamalar yapılmış olup ardından laboratuvar ve büro çalışmaları da yapılarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

##### 3.2.1. Arazi Çalışmaları

Arazi çalışmaları sırasında; blok boyutlarının ölçümünün yapılması, iğne penetrometresi ve schmidt çekici deneyleri, mühendislik jeolojisi haritası çizimi ve süreksizliklerin ölçülmesi gibi işlemler yapılmıştır. Schmidt çekici deneyi arazide bloklar üzerinde çatlak ve süreksizliğin olmadığı alanlarda ve süreksizlik yüzeylerine dik olarak uygulanmıştır. ISRM standartlarında yapılan Schmidt çekici deneylerinde her blok için yapılan deneylerde en yüksek 10 değerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.1. Arazide Schmidt çekici ve İğne penetrometresi deneyinin uygulanması

İğne penetrometresi deneyinin amacı, insan eliyle yapılan yüklemeye penetrometrenin ucunda olan iğnenin kayacın içine batması olayıdır (Ergüler, 2007). Deneylerde kullanılan iğne penetrometresi aleti, Maruto Testing Machine Co. (Maruto, 2006) tarafından üretilen SH-70 modelidir ve ağırlığı yaklaşık 700 g'dır. Elde edilen bu değerler ışığında ignimbiritlerin tek eksenli basınç dayanımlarının (UCS) bulunmasında Ulusay ve Ergüler (2012) tarafından önerilen ampirik ilişki kullanılmıştır.

Süreksizlik hat etütleri neticesinde kaynak zonda bulunan süreksizliklerin eğim/eğim yönleri belirlenerek hakim süreksizlik takımları ve süreksizlik özellikleri (aralık, açıklık, blok boyutu, yönelim, devamlılık, pürüzlülük, dolgu, sızıntı, takım sayısı vb. belirlenmiştir.

Arazi çalışmaları sırasında litolojilerin sınırlarını belirleyip jeolojik harita çizimi işlemini yaptık. Düşme riski olan kaya kütlelerini ve düşen kaya bloklarının belirlemesi konusunda gözlemler ve ölçümler gerçekleştirdik.

### **3.2.2. Laboratuvar Çalışmaları**

Çalışma alanında gözlenen kaya birimlerinin indeks, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kaya mekaniği deneyleri yapmak için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarı'nda araziden getirilen kaya bloğundan 12 adet karot numuneleri standartlara uygun olarak alınmıştır. Bu kapsamda alınan düzgün şekilli karotlar üzerinde ISRM (2007)'e göre birim hacim ağırlık, porozite, ağırlıkça ve hacimce su emme, tek eksenli sıkışma deneyleri yapılmıştır.





Şekil 3.2. Kaynak alandan alınan ignimbirit bloklarından hazırlanan karot örnekleri

### **3.2.2.1 Birim Hacim Ağırlık Deneyi**

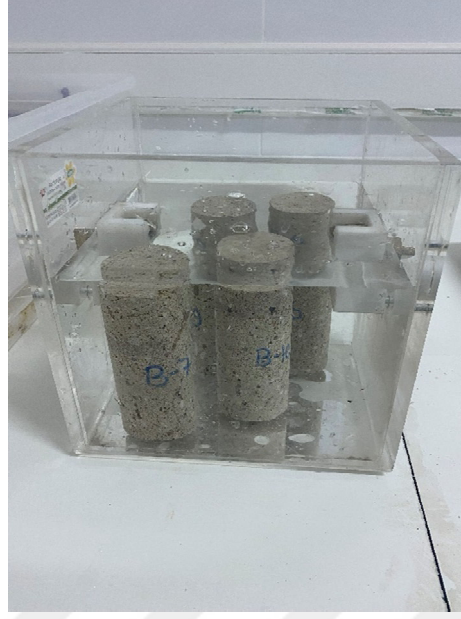
Muntazam şekilli örneklerden hazırlanan karot numunelerinin ilk olarak ayrı ayrı ISRM (2007)'de olduğu gibi (kumpas yöntemi) yoğunlukları ve birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Yapılan deneylerde kayaların doğal yoğunlukları ve birim hacim ağırlıkları aritmetik ortalamayla bulunmuştur.

### **3.2.2.2 Porozite (Gözeneklilik) ve Boşluk Oranının Belirlenmesi**

Bu deneyde hazır olan numuneler 105 C°'ye ayarlanmış fırında 18 saat bekletildikten sonra desikatör içine koyulmuştur. Kuru ağırlıkları belirlenen numuneler daha sonra 48 saat suda bekletilmiştir. Suyu doymuş numunelerin ağırlıkları belirlenip, porozite ve boşluk oranlarının değerleri bulunmuştur. Suyu doyurulan numunelerin ıslak birim hacim ağırlığı değerleri hesaplanmıştır.

### **3.2.2.3 Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme Oranının Belirlenmesi**

Aşağı yukarı aynı boyutlarda hazırladığımız karot numunelerini saf su içinde 18 saat bırakıldıktan sonra sulu ağırlıkları belirlenmiş olup bir süre sonra numuneler 105 C°'ye ayarlanmış fırında 18 saat kurutulmuştur. Fırından çıkarılan numunelerin kuru ağırlıkları belirlendikten sonra ağırlıkça ve hacimce su emme durumları belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Karot örneklerinin saf su içinde görünümü

#### 3.2.2.4 Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (UCS)

Kapasitesi 2000 kN olan ekipmanların kullandığımız deneylerde uzunluk/çap oranı 2.0–2.5 olan numunelerimizin tek eksenli sıkışma dayanımları belirlenmiştir. Yükleme hızı olarak 0.1 kN/sn seçilmiş olup, numuneler 5–10 dakika arasında yenilmiştir. Her bir blok üzerinden alınan numune için en az 5 örnek üzerinde deney tekrar edilmiştir.



Şekil 3.4. Tek Eksenli sıkışma dayanımı deneyinin görünümü



### **3.2.3. Büro Çalışmaları**

Çalışmanın önemli bir kısmını oluşturan bu aşamada ise çoğunlukla arazide ve laboratuvarında yapılan çalışmalar sonucunda elde ettiğimiz verilerin değerlendirilmesi, bilgisayar programları kullanılarak kinematik ve 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin gerçekleştirilmiştir.

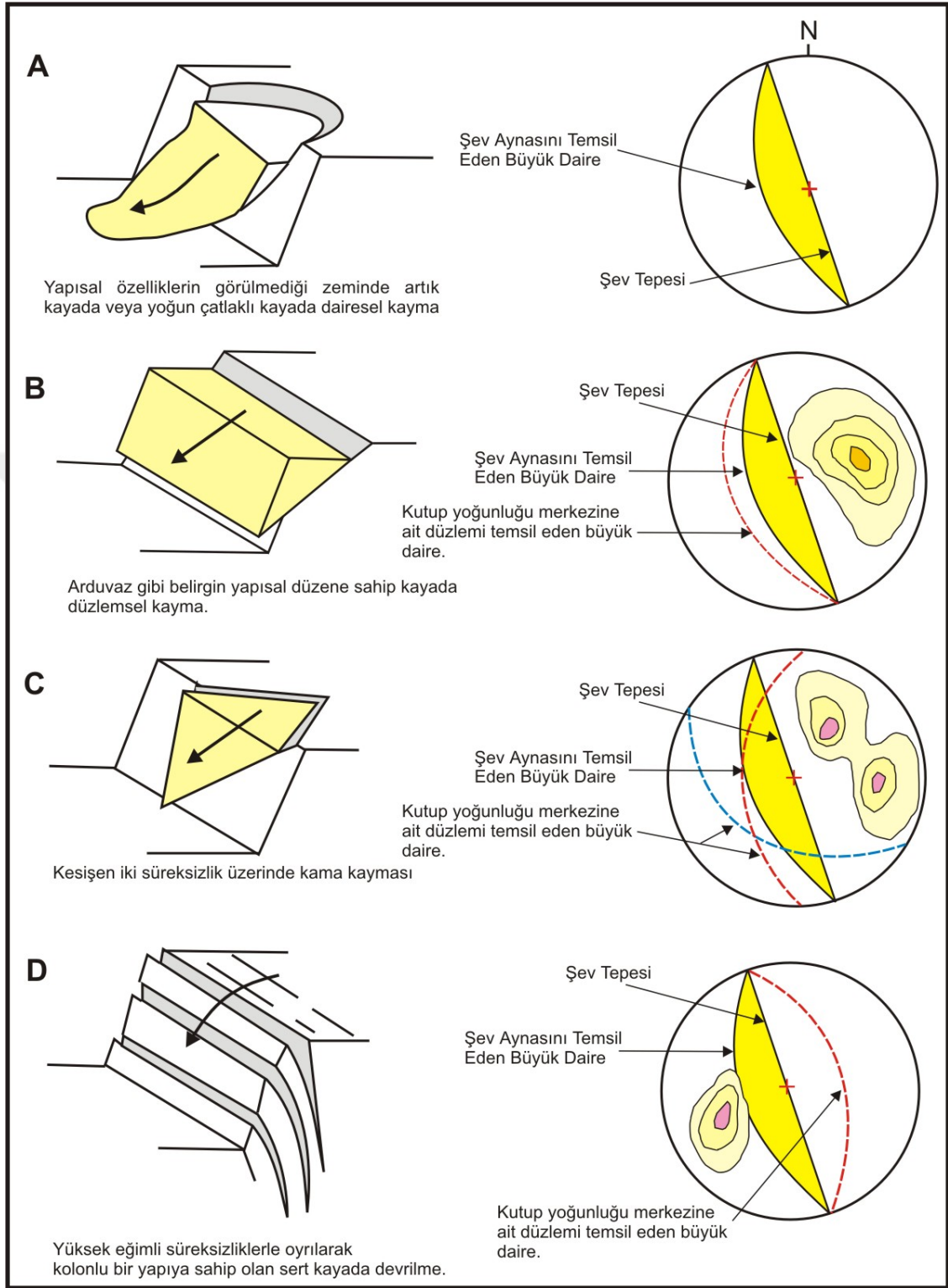
#### **3.2.3.1. Kinematik Analizler**

Kaya kütlelerinde duraysızlıkları kontrolü altında tutan en önemli faktör süreksizliklerdir. Kinematik analizler, duraylılığın süreksizlik sistemleriyle kontrol altında olduğu kaya kütlelerinde stabiliteelerde meydana gelebilecek problemlerde şevlerin ayırt edilmesi amacıyla detaylı analizleri yapmadan kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde süreksizliklerin doğrultu ve eğimi, şevin doğrultu ve eğimi ve süreksizlik yüzeylerinin sürtünme açısı girdi parametresi olarak kullanılır.

Kinematik analizler doğrudan doğruya kaya düşmelerinin değerlendirilebildiği analiz değildir ve yardımcı bir değerlendirme gibi düşünülebilirler. Kinematik analizlerde amaç, kaya düşmeden önce olaya sebebiyet verecek bir kaya kütle duraysızlığının olduğunu bulabilmektir.

Kinematik analizlerde iki aşama izlenir. İlk aşama: Stereografik izdüşüm tekniğiyle şevin büyük dairesi ile süreksizliklerin büyük daireleri ve kutup noktaları stereonete işlenir ve 2. aşamada: Yönelimler ve içsel sürtünme açısı dikkate alınarak, duraysızlık türü saptanır.

Kinematik analizler için 5 farklı yamaç yönelimine sahip sektörler göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan tilt deneylerinin ardından Barton ve Bandis yenilme ölçütü kullanılarak ignimbiritlerdeki süreksizlik düzlemleri için sürtünme açısı belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Başlıca şev duraysızlık türleri ve bunların stereonet çizimleri (Hoek ve Bray, 1977).

### **3.2.3.1.1. Düzlemsel Kaymanın Analizi**

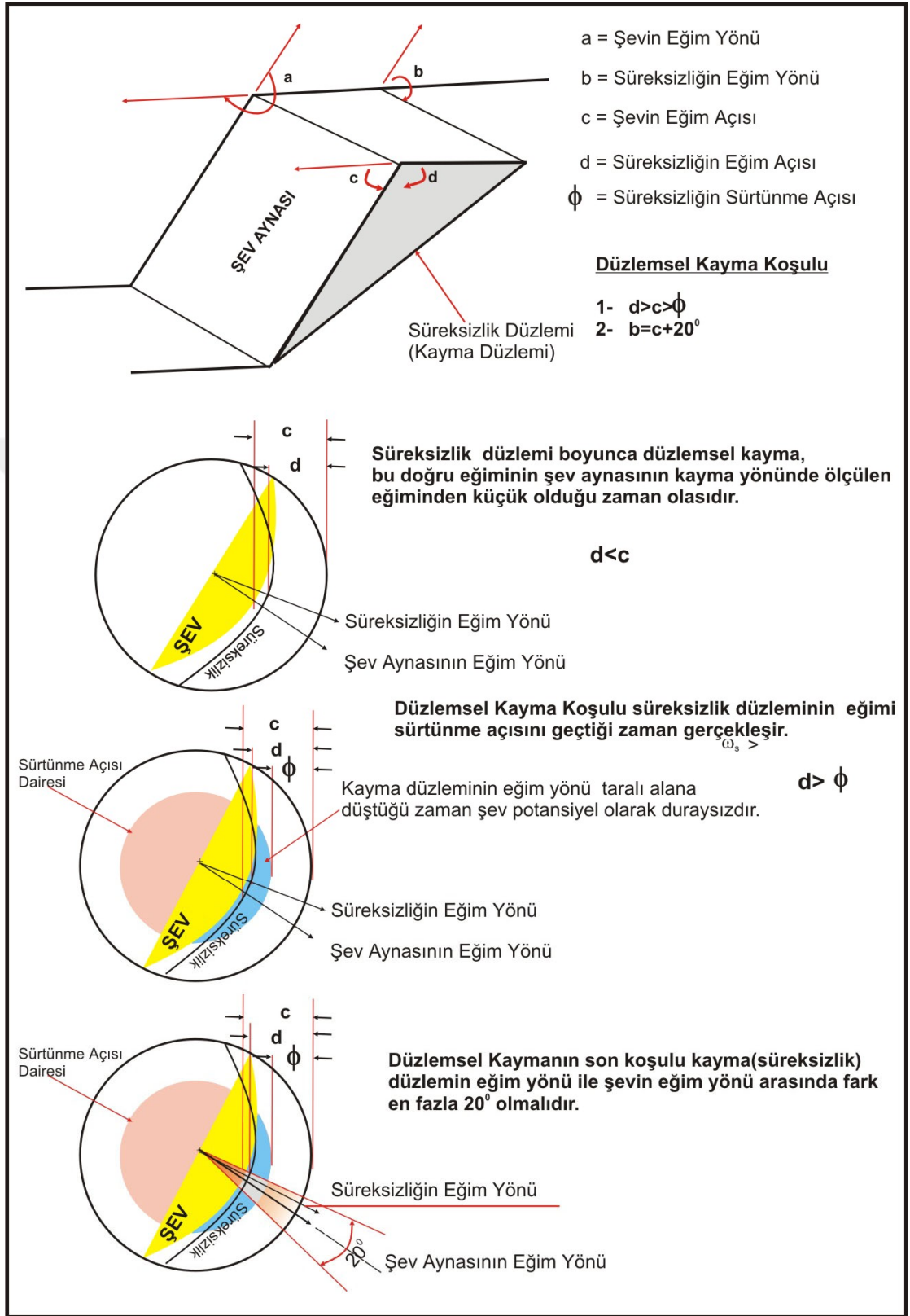
Şekil 3.14'deki koşulların yerine getirilmesi sonucunda düzlemsel türü duraysızlık gerçekleşir. Kayma düzleminin eğiminin şev aynasının eğiminden küçük olması ve sürtünme açısı değerinden büyük olması düzlemsel kaymanın gerçekleşmesini sağlar. Kayma düzleminin eğim yönü ile şev aynasının eğim yönü birbirlerine yaklaşık olarak paralellik sunmaları ise başka bir yöntem olarak düzlemsel kaymanın gerçekleşebilmesini sağlar. Yani kayma düzleminin eğim yönü ile şev aynasının eğim yönü arasındaki fark en fazla 200 olması gerekir. Şekil 3.14'da söz konusu durumların net üzerindeki konumları gösterilmektedir. Stereonet üzerinde kayma için uygun koşul göz önünde bulundurulmuştur. Eğim yönü gri olarak taranmış bölgeye düşen her süreksizlik düzlemsel kayma potansiyeli taşımaktadır.

### **3.2.3.1.2. Kama Tipi Kaymanın Analizi**

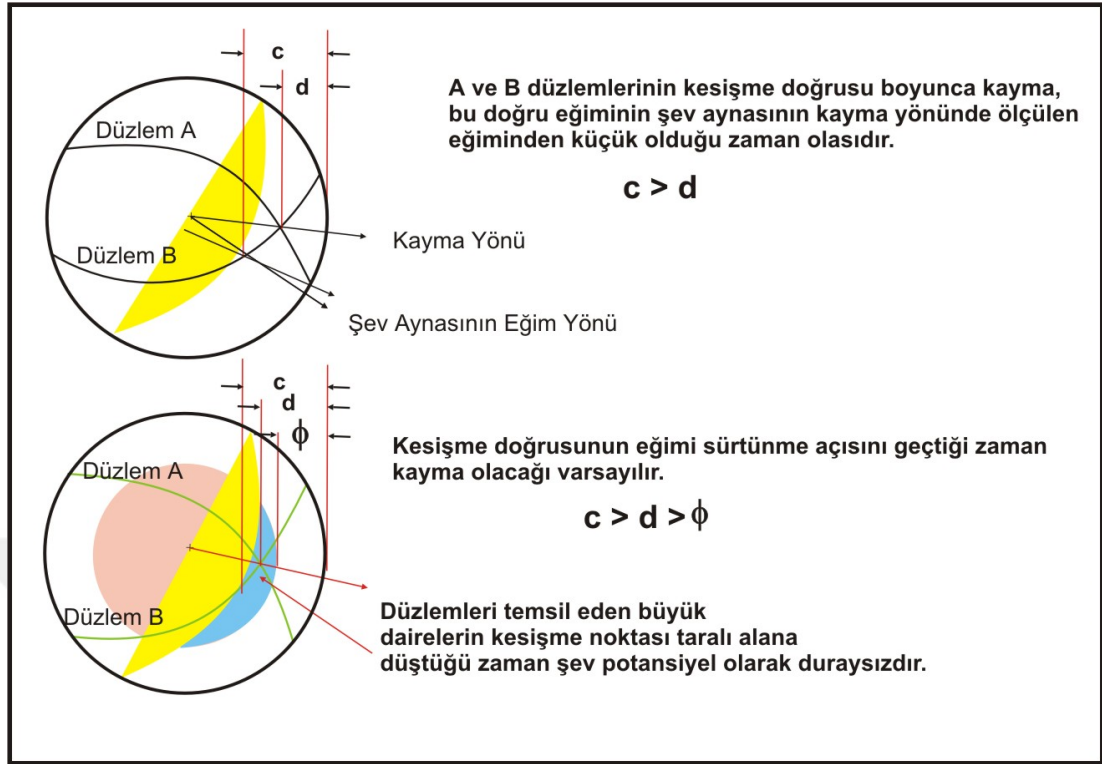
İki farklı süreksizliğin neden olduğu kesişme düzlemi, kama tipi kaymanın oluşabilmesi için gereklidir. Bu durumların sonucunda en az iki farklı kutup yoğunlaşmasının gözlenme durumu gereklidir. Şekil 3.5 detaylı incelendiğinde kama tipi yenilmenin ortaya çıkması için ilk koşul A ve B düzlemlerinin kesişme doğrusunun eğiminin şev aynasının kayma yönünde ölçülen eğiminden küçük olması gerekmektedir. İkinci koşul olarak kesişme doğrusunun eğimi sürtünme açısı eğimden daha fazla olduğu zaman kayma olacağı varsayılır. Bu bölgeye düşen kesişme noktaları kama tipi yenilme potansiyeli taşımaktadır.

### **3.2.3.1.3. Devrilme Tipi Kaymanın Analizi**

Şekil 3.6'de görülen koşulların yerine getirilmesi devrilme tipi yenilmenin gerçekleşmesi anlamına gelmektedir. Bu durumların sonucunda şevin büyük dairesi belirlendikten sonra, şevin büyük dairesinden itibaren netin kenarına doğru sürtünme açısı kadar sayılarak sürtünme açısını tanımlayan büyük daire çizilir.



Şekil 3.6. Düzlemsel kayma koşulu ve düzlemsel kaymanın kinematik analizi (Hoek ve Bray, 1977)



Şekil 3.7. Kama tipi yenilme koşulu ve kinematik analizi (Hoek ve Bray, 1977)

### 3.2.3.2. 3B Kaya Düşme Analizleri

İki boyutlu kaya düşme analizleri kesit hatları üzerinde gerçekleştirilirken, 3-boyutlu kaya düşme modellerinde X, Y ve Z düzlemleri dikkate alınmaktadır. Kaya düşme hatları boyunca topoğrafya yüzeyinde yer alan kanal, oluk, sırt gibi jeomorfolojik düzensizliklerin yönelim ve yuvarlanma mesafeleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Öte yandan bu düzensiz yapılar düşen bloğun rotasyonel ve transrasyonel kinetik enerji bileşenlerini de etkilemektedir. 3-boyutlu topoğrafik değişkenliklerin kaya düşme hatları üzerindeki en önemli etkisi yanal saçılımlardır (Crosta ve Agliardi, 2004). Yanal saçılım, bir noktadan yuvarlanan bloğun, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe ile şev uzunluğu arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır (Turner ve Schuster, 2012). Kaya düşmelerinde yanal saçılımlar, toplam şev uzunluğunun %20'sine kadar ulaşabilir. Kısa ve dik şevlerde bu oran azalırken, düzensiz topoğrafyaya sahip uzun şevlerde bu oran artmaktadır (Azzoni vd., 1995). Düşen blokların katı cisim (rigid body) dinamiği üzerinde topoğrafyadaki 3-boyutlu düzensizliklerin de en az blok şekli kadar etkisi bulunmaktadır. Öte yandan, kaya düşme hatlarının uzunluğunun artması ile bu etki daha da fazla olmaktadır.

Kaya düşmesi yuvarlanma hatlarının daha doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için 3-boyutlu analiz yöntemlerine ve dolayısıyla da 3-boyutlu detay yüzey modellerine ihtiyaç vardır. 3-boyutlu topoğrafyanın oluşturulabilmesi için çoğu zaman farklı ölçeklerdeki (1:25000-1:1000) topoğrafik haritalardan üretilen sayısal arazi modelinden yararlanılmaktadır. Ancak, topoğrafik haritalardan elde edilen yüzey modelleri, arazi detayını (örn. bina, ağaç vb.) yani sayısal yüzey modelini güncel olarak sunamamaktadır. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin gerçekçi sonuçlar verebilmesi için detay sayısal yüzey modelleri kullanılmalıdır. Topoğrafik etkilerin kaya düşme modellemelerinde dikkate alınması için özellikle son 20 yıl içerisinde 3-boyutlu kaya düşme analiz yazılımları geliştirilmiştir. Öte yandan gelişen teknoloji ile birlikte, yersel lazer tarama (TLS) yöntemi ile elde edilen 3-boyutlu koordinatlı nokta bulutları veya insansız hava araçları (İHA) ile alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen sayısal yüzey modelleri 3-boyutlu kaya düşme analizleri için en önemli ve doğru veriyi oluşturmaktadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşmelerinde kullanılacak sayısal yüzey modelinin belirtilen bu yöntemlerden elde edilen nokta bulutları yardımıyla oluşturulması tercih edilmelidir. Bundan dolayı bu çalışma insansız hava araçları (İHA) ile alınan fotogrametrik görüntülerden faydalanılarak 3-boyutlu sayısal arazi modeli oluşturulacaktır.

Oluşturulan sayısal arazi modeli kullanılarak 3-boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilecek olup, bu amaç için RocPro3D (2019) yazılımı kullanılacaktır. RocPro3D 3-boyutlu istatikselsel olarak kaya düşmesi riskleri taşıyan şevlerin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Program yardımıyla düşen blokların enerji, hız ve sıçrama yüksekliği şev boyunca belirlenebildiği gibi aynı zamanda çarpma noktaları ve bloğun durma noktası da belirlenebilmektedir.

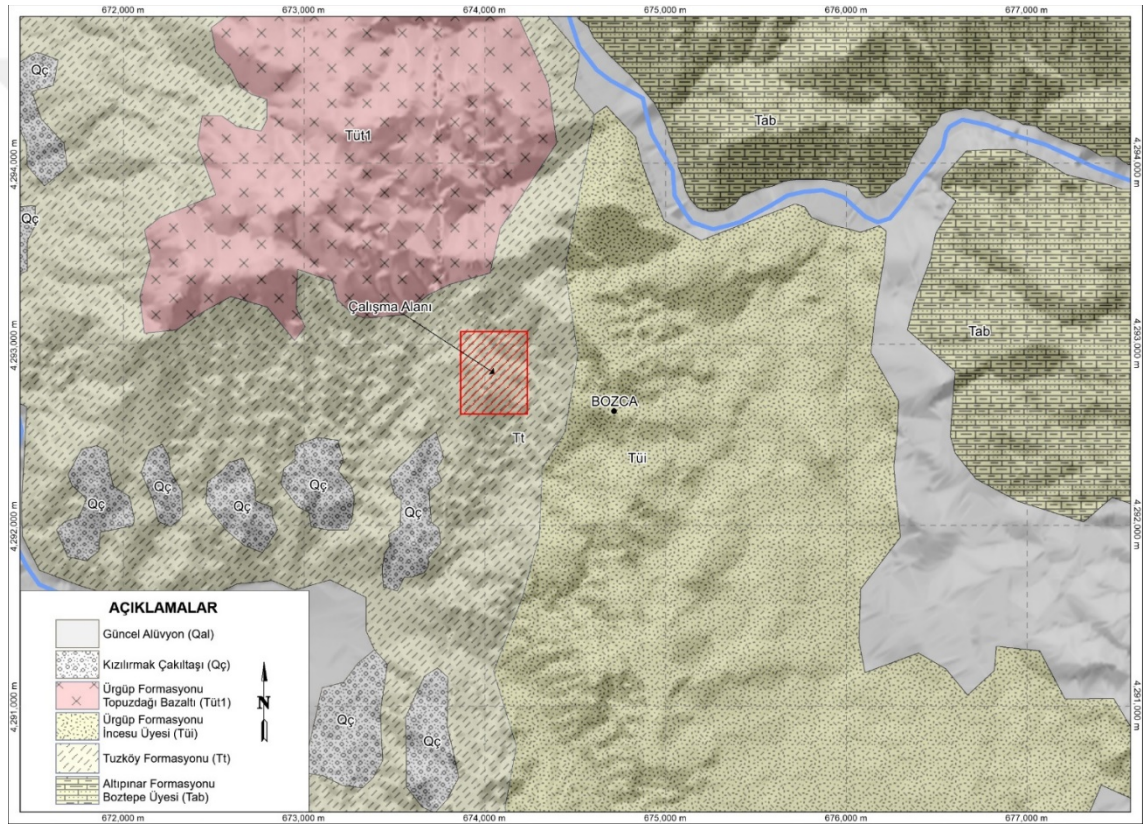


## 4.BÖLÜM

### BULGULAR

#### 4.1. Çalışma Alanının Jeolojisi

Tersiyer birimlerden meydana gelen sahamız ve yakın civarının jeolojisini Eosen yaşlı Altıpınar Formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Tuzköy formasyonu, Ürgüp formasyonunun İncesu ve Topuzdağ Bazaltı, Kızılırmak Çakıltası ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar oluşturmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Çalışma alanının ve civarının jeolojisi (Atabey, 1989).

#### 4.1.1. Altıpınar Formasyonu (Boztepe Üyesi)

Çalışma alanın kuzey doğusunda geniş bir mostra veren birim killi, kumlu sığ denizel kireçtaşları, kumtaşları ve marn seviyelerinden oluşan Altıpınar Formasyonu genelde filiş karakterdedir. Altıpınar formasyonunun üst kısımlarında bulunan ve genel olarak killi kireçtaşlarından meydana gelen seviyeyi Atabey (1988) üye olarak ayırt etmiş ve bu seviyeyi Boztepe Üyesi diye isimlendirmiştir.

Üye; kalınlığı 1-5 metre olan kumlu marn ve killi kireçtaşları ile 1-2 metre kalınlığında, orta-ince tabakalı fosilli kireçtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Marnlı yüzeyler sarımsı renkli ve bol *Lucina*'lıdır. Kireçtaşı tabakalarında fusiform ve silindirik şekilli *Alveolina*'lar görülebilir. Tabanda Altıpınar Formasyonunun kumtaşı ve şeylleri ile geçişlidir. Resifal karakterli olup, kalınlığı 50 metredir (Atabey, 1989).

#### 4.1.2. Tuzköy Formasyonu

Çalışılan bölgede geniş bir bölgede gözlenen Tuzköy Formasyonu Bozca köyünün batısında gözlenmektedir. Çakıltaşı, kumtaşı, kıltaşı ve tüfit ardalanmasıyla bilinen bu birim Atabey(1989) tarafından adlandırılmış olup, içinde bulunan kumtaşı ve kıltaşı sarımsı kahve renkli olup tuf ara düzeyleri ve pomza parçaları içermektedir. Çakıltaşının çimentosu gevşek olup 10-20 santimetre çapında (diyabaz, spilit, granit, andezit, granodiyorit, metamorfik kayaç) çakılları içerisinde gözlenmektedir. Bu birimin kalınlığı yer yer 100 metre civarını bulmaktadır. Birimin yaşı (Atabey, 1989) tarafından Üst Miyosen-Pliyosen olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Tuzköy formasyonunun genel görünümü (batıya bakış)



#### **4.1.3. Ürgüp Formasyonu (İncesu Üyesi)**

Bozca köyü ve doğusunun jeolojisini volkanik ara katkılı gösel kırıntılı kayalardan oluşan Ürgüp formasyonu oluşturmaktadır (Şekil 4.3). Birim çakıltası, kumtaşı, çamurtaşı, jips ve anhidrit ile kireçtaşı ve ignimbirit ara seviyelerinden oluşmaktadır. Çalışma alanında kiltası, kumtaşı ve çakıltası seviyeleri ile temsil edilen sedimanter seviye üstte doğru yerini ignimbirit seviyelerine bırakmaktadır. Uzakkale Tepe'nin en üst seviyesinde yine Ürgüp formasyonuna ait gösel kireçtaşları yer almaktadır. Kapladığı küçük mostradan dolayı jeoloji haritasında gösterilmemiştir.

Formasyon ilk kez Pasquaré (1968) tarafından adlandırılmıştır. Ürgüp ve civarında özellikle Akdağ, Zelve, Kışladağ, Sofular, Bozca, Akıllıdağ, Avladağ, Karlık, Yeşilöz, Mustafapaşa, Cemilköy, Taşkınpaşa da yaygın olarak yüzlek vermektedir. Formasyon ignimbirit, andezitik bazalt-bazalt, tüflerden oluşan volkanik-volkanoklastik ürünlerden, çamurtaşı, kumtaşı, çakıltası litojilerinden oluşan akarsu çökelleri ve marn, kireçtaşı, dolomitik ve killi kireçtaşı litojilerinden oluşan göl çökellerinden meydana gelmektedir.

(Atabey, 1989) tarafından İncesu İgnimbiritinin alt seviyesinin, gri ve beyaz renkli pomza içeren, üst kesimlere nazaran az kaynamış bir düzey oluşturduğu belirtilmiştir. Birimin üst kısmında çoğu zaman siyah renkli, iyi kaynaşmış, fiyammeli görümlü ignimbirit düzeyi gelmektedir. En üst kısımda ise yaygın gözlenen, kahve-gri-kırmızı renkli, yer yer sütunsal ve boşuklu yapıları bir seviye gözlenmektedir. Kalınlığı 60 m'dir (Atabey, 1989).

#### **4.1.4. Ürgüp Formasyonu (Topuzdağ Bazaltı)**

Bozca köyünün kuzey batısında gözlenen birim mafik bazaltik lav akıntısı şeklinde olup, alt seviyeleri olivinsiz, ojit ve hiperstence zengindir. Üst seviyeleri oluşturan olivin bazalt aa lavı türüdür. Bölgede Salur Üyesi çakıltası ile Kışladağ Üyesi arasında, İncesu İgnimbiritinin birkaç metre üzerinde yer almaktadır (Atabey, 1989).



Şekil 4.3. Tuzköy-İncesu ignimbiritlerin genel görünümü (kuzey doğuya bakış)

#### 4.1.5. Kızılırmak Çakıltası

Çakıl ve kum tane boyutlu, gevşek malzemelerle tutturulmuş kum taşı ve mil taşından oluşan bu birim Bozca köyünün güney batısında küçük mostralar şeklinde gözlenmektedir (Şekil 4.1). Teknesel çapraz tabakalanmanın bolca gözlendiği ve taban kısmında kil çökellerinin bulunduğu, matriksinde karbonatın olduğu, kalınlığı yer yer 12 m olan, alt kısımlarında bulunan bazaltlara göre yaşı muhtemelen Pleyistosendir (Atabey, 1989).

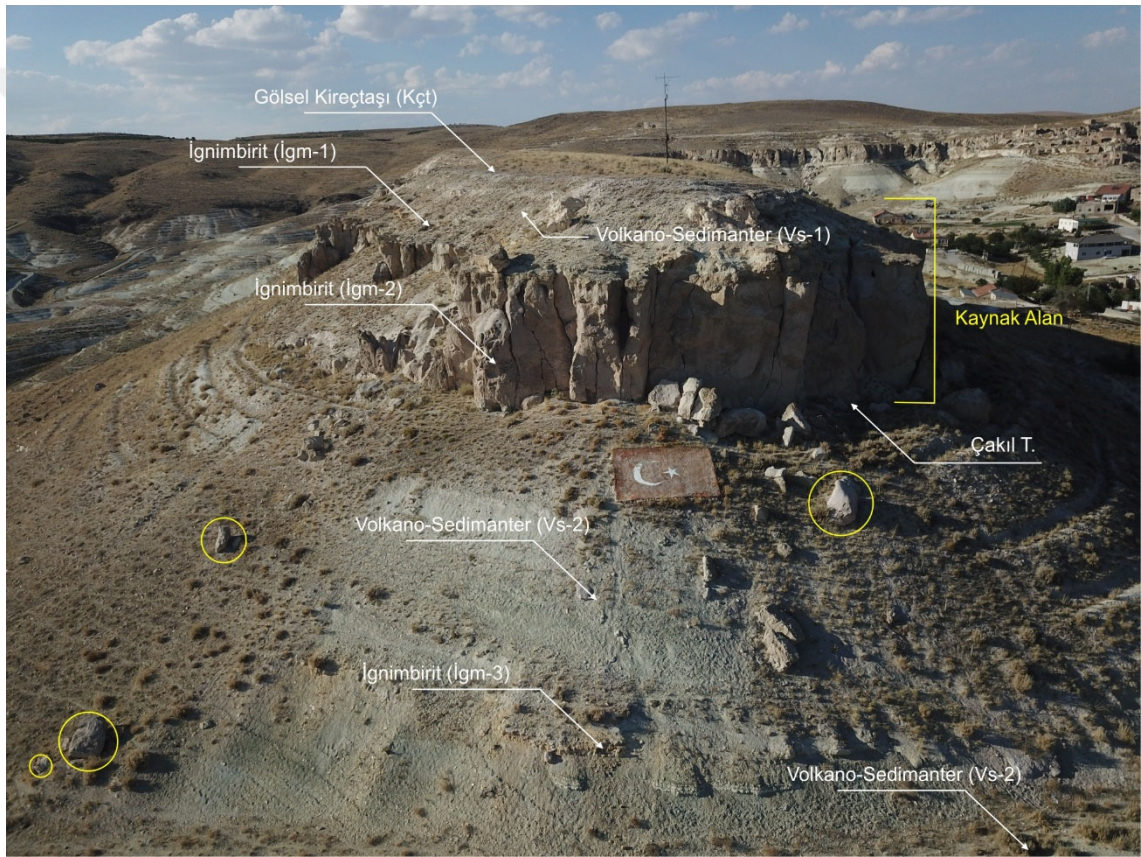
#### 4.1.6. Alüvyon

Alüvyonlar genel olarak vadi ve dere yataklarında akarsuların taşınmasıyla oluşan birimlerdir. Çalışma alanımızda da alüvyon birimimiz dere ve vadilerde gözlenmekte olup, içerisinde çakıl, kum, volkanik kayaç kırıntıları, mil ve toprak içermektedir. Birimin rengi açık kahve olup, organik madde içermez. Volcano sedimanter kökenli olan birim yüksek nem içeriğine sahiptir. Geçimlidir ve iyi tutturulmuş orta-ince taneli kum, kum-çakıl-blok ve bitkisel toprak içermektedir.

#### 4.2. Çalışma Alanının Mühendislik Jeolojisi

Çalışma alanı, Bozca köyünün kuzey doğusunda Uzakkale Tepe'nin doğu ve güney yamacında yer almakta olup, inceleme alanının deniz seviyesinden yüksekliği 1042 m ile

1126 m arasında değişmektedir. Çalışma sahasındaki kot farkı 84 m ve volkano-sedimanter bir istife ait birimler yamaç boyunca gözlenmektedir. Çalışma alanında mühendislik jeolojisi açısından Ürgüp formasyonunun farklı seviyelerini temsil eden 7 farklı birim belirlenmiştir (Şekil 4.2). Çalışma alanında Gölsel kireçtaşı, kumtaşı, ignimbirit (İgm-1), ignimbirit (İgm-2), çakıl taşı, kiltası-marn-kumtaşı (volkano sedimanter), ignimbirit (İgm-3) birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Çalışma alanının ve kaya kütle duraysızlıklarına neden olan kaya birimleri ve bu kaya birimlerinin diğer mühendislik özellikleri diğer bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştır.

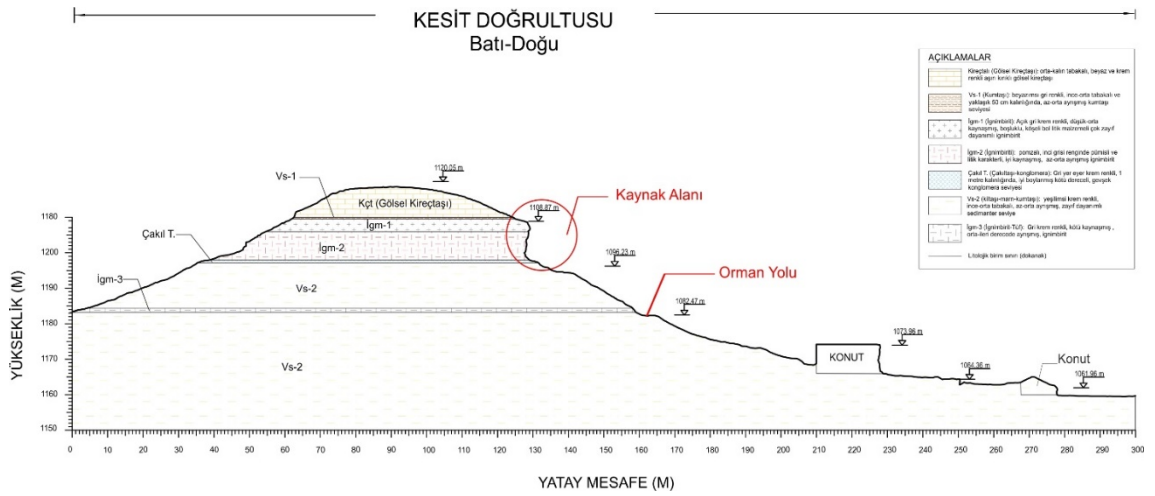


Şekil 4.4. Çalışma alanındaki birimlerin araziden genel görünümü

#### 4.2.1. Kireçtaşı (Gölsel Kireçtaşı)

Çalışma alanımızda gözlenen gölsel kireçtaşı birimimiz ince tabakalı, gri-bej renkte olup sert yapıdadır. Kalınlığı 2-3 m'dir. Taban kısımlarında kiltası, killi kireçtaşı seviyeleri gözlenmektedir. Gözenekli yapı hakimdir. Ürgüp civarlarında gözlenmekte olup alttaki ignimbirit kayası üstünde düzlük şeklinde yapılar oluşturur. Pasquare, tarafından Kışladağ üyesi olarak adlandırılmıştır.





Şekil 4.5. Çalışma alanı batı-doğu boyunca mühendislik jeolojisi kesiti

#### 4.2.2. Kumtaşı (Vs-1)

Çalışma alanımızda gözlenen bu birim gri-bej renkli olarak ve çok ince taneli olarak gözlemlenmiştir. Kaya düşmelerinde yuvarlanma zonunu oluşturmaktadır. Bu kumtaşı birimimiz ile birlikte diğer birim olan kıltaşı, kumtaşı, marn birimi yuvarlanma zonunu oluşturmaktadır. Birimin diğer birimlere göre yumuşak yapıda olması, düşen kaya bloğunun hızını yavaşlatmaktadır.

#### 4.2.3. İgnimbirit-1 (İgm-1)

Kaynak alanı oluşturan ignimbiritler gri, beyaz renkli pomza, andezit ve bazaltik kayaç parçaları içermektedir. İgm-1 üst seviyede yer almakta ve yaklaşık 2-3 metre kalınlıklar sunmaktadır. Görece düşük kaynaşma derecesine sahip İgm-1, boşluklu bir yapı sunmaktadır. Kaynak alanda süreksizlik ve ayrışma kontrollü başlayan duraysızlıklar sonucu oluşan ignimbirit blokları eğimli yamaç boyunca hareket etmeleriyle kaya düşmelerine sebebiyet vermektedir.

#### 4.2.4. İgnimbirit-2 (İgm-2)

Kaya düşmelerindeki kaynak zon olarak belirlenen, İgm-2 yamacın alt kotunu oluşturmakta ve yaklaşık 10.0 metrelik bir kalınlığa sahiptir. Orta-iyi kaynaşmış karakterde olan bu seviye düşey süreksizlikler ile sütunsal bir yapı kazanmıştır. Süreksizlik ve ayrışmalar sonucunda kaya düşmeleri gözlenmektedir.

#### **4.2.5. akıltaşı**

Dik yamacın topuğunda yaklaşık 1.00 metre kalınlığında çakıltaşı ve konglomera seviyesi görece çevresel koşullara daha düşük dirence ve yumuşak dokuya sahiptir. Bu birimdeki ayrışma topuk bölümünde boşalmaya ve sonucunda üst birimlerin tutunmasının zayıflamasıyla kaya düşmelerine sebebiyet vermektedir.

#### **4.2.6. Kıltaşı-Marn-Kumtaşı (Vs-2)**

Çalışma sahasında kıltaşı-kumtaşı ve marn yüzeyde ardalanmalı olarak görölmektedir. Bu birim koyu gri – gri renkli ve bazı yerleri beyaz renklidir. Tabakalanması ince olan sedimanter kayalardandır. Kaya düşmelerinde yuvarlanma bölgesinde gözlenmektedir ve yumuşak yapısından dolayı yuvarlanan kayacın hızını sönmlemektedir. Bu birimin yavaşlattığı bloklar evlere ulaşmadan durmaktadır.

#### **4.2.7. İgnimbirit-3 (İgm-3)**

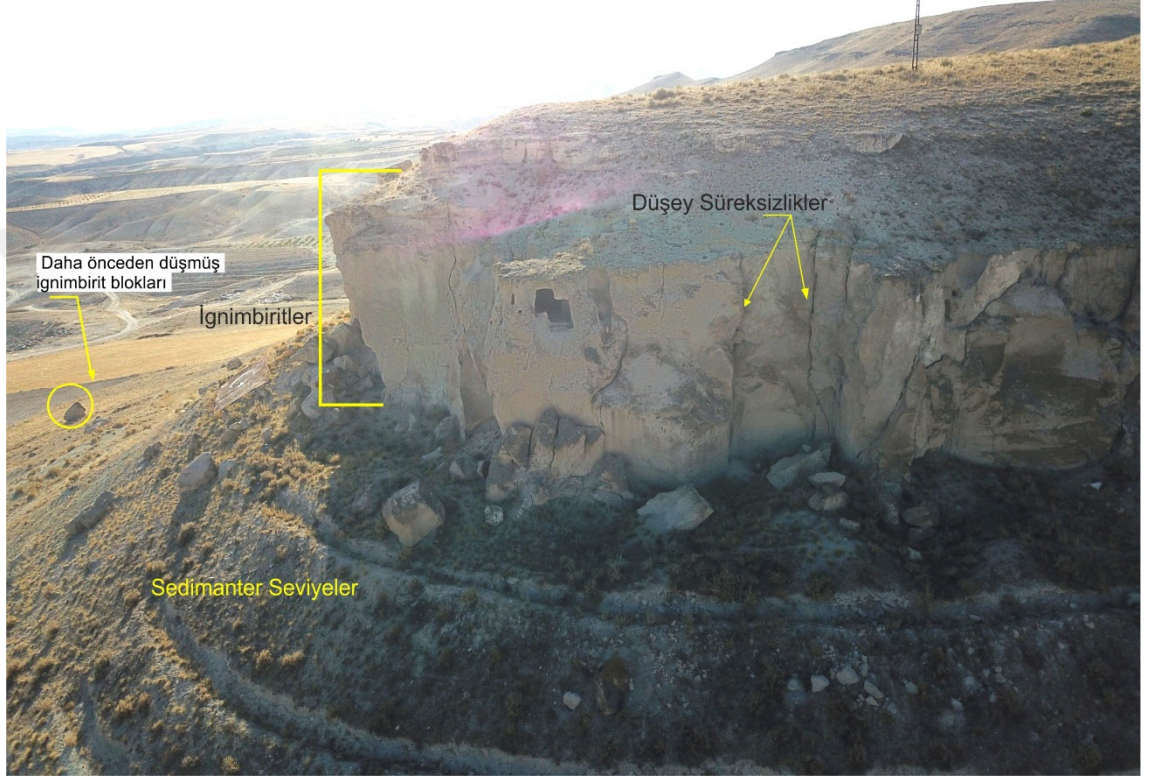
Gri renkli pomza, andezit ve bazalt parçaları içeren, İgm-2 ve İgm-3' e göre daha yumuşak yapıda ve yüzeysel olarak aşınmıştır. Kaya düşme olaylarının yuvarlanma bölgesinde bulunmaktadır ve yumuşak yapısından dolayı kaya düşmelerinde düşen bloğun hızını yavaşlatan konumdadır. Düşen blokların büyük bir bölümünün bu birim üzerinde durduğu gözlenmektedir.

### **4.3. Kaya Kütle Duraysızlıkları**

Çalışmanın konusunu oluşturan kaya düşmeleri, Bozca köyünün kuzey doğusunda Uzakkale Tepe doğu ve güney yamacında gözlenmekte olup, inceleme alanının deniz seviyesinden yüksekliği 1042 m ile 1126 m arasında değişmektedir. Çalışma sahasındaki kot farkı 84 m'dir. 1096 metre kotundan sonra görece çevresel etkilere karşı daha direçli ignimbirt seviyelerinin oluşturduğu ve en az 12.0 metre yüksekliğe sahip dik yamaçlar kaya kütle duraysızlıklarının oluşması için uygun morfolojik koşulları oluşturmaktadır (Şekil 4.6).

Şekil 4.6'dan görüleceği üzere söz konusu yamaçlar zayıf dayanımlı volkano-sedimanter seviyeler ve soğuma çatlaklarının oluşturduğu düşey süreksizlikler tarafından kesilmiş olan kaya kütleleri ile temsil edilmektedir. Buna bağılı olarak ayrışma ve süreksizlik

kontrollü farklı kaya kütle duraysızlıkları yoğun bir şekilde gözlenmektedir. Özellikle şev topoğunda yer alan zayıf seviyelerin ayrışması sonucu (Şekil 4.7) düşey süreksizlik boyunca ayrılmalar devrilme şeklinde duraysızlıkların gelişmesine neden olmaktadır. Arazide yapılan incelemelerde bu süreç sonucunda bir çok sütunsal bloğun riskli hale geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6. Kaya kütle duraysızlıklarının meydana geldiği topografyanın genel görünümü





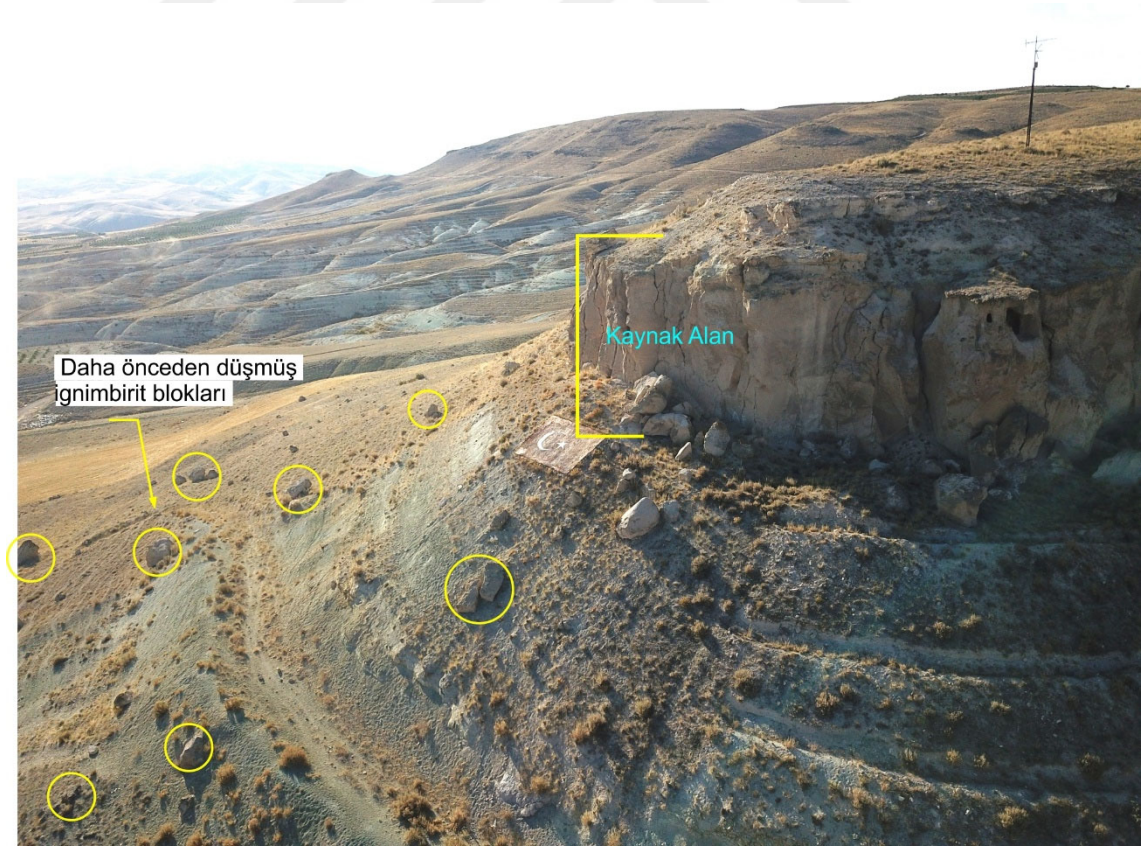
Şekil 4.7. Malzeme alımı ve ayrışma sonucu blokların asılı hale gelişinin görünümü



Şekil 4.8. Ana kayadan süreksizlik boyunca ayrılmış bloklar



Çalışma alanında gözlenen diğer önemli kaya kütle duraysızlığı ise kaya düşmeleridir. Yukarıda değinilen süreçler sonucu yamaçtan ayrılan blokların yamaç boyunca sıçrama, yuvarlanma gibi hareketler neticesinde yamaç aşağısında bulunan konut, yol vb. yapıları tehdit etmektedir (Şekil 4.9). 1096 kotundan başlayan dik topoğrafyada yer alan ve kaynak alanı oluşturan ignimbiritler gri, beyaz renkli pomza, andezit ve bazaltik kayaç parçaları içermektedir. İki farklı seviye şeklinde temsil edilen ignimbiritler; İgm-1 ve İgm-2 olarak tanımlanmıştır. İgm-1 üst seviyede yer almakta ve yaklaşık 2-3 metre kalınlıklar sunmaktadır. Görece düşük kaynaşma derecesine sahip İgm-1, boşluklu bir yapı sunmaktadır. İgm-2 yamacın alt kotunu oluşturmakta ve yaklaşık 10.0 metrelik bir kalınlığa sahiptir. Orta-iyi kaynaşmış karakterde olan bu seviye düşey süreksizlikler ile sütunsal bir yapı kazanmıştır. Dik yamacın topuğunda yaklaşık 1.00 metre kalınlığında Çakıltaşı ve konglomera seviyesi görece çevresel koşullara daha düşük dirence sahiptir. Söz konusu bu özelliğinden dolayı hızla ayrılarak, üzerinde yer alan ignimbiritlerin düşey süreksizlikler boyunca ayrılarak farklı kaya kütle yenilmelerine neden olabilmektedir.



Şekil 4.9. Kaynak alandaki kaya kütle duraysızlıkları ve düşmüş blokların görünümü



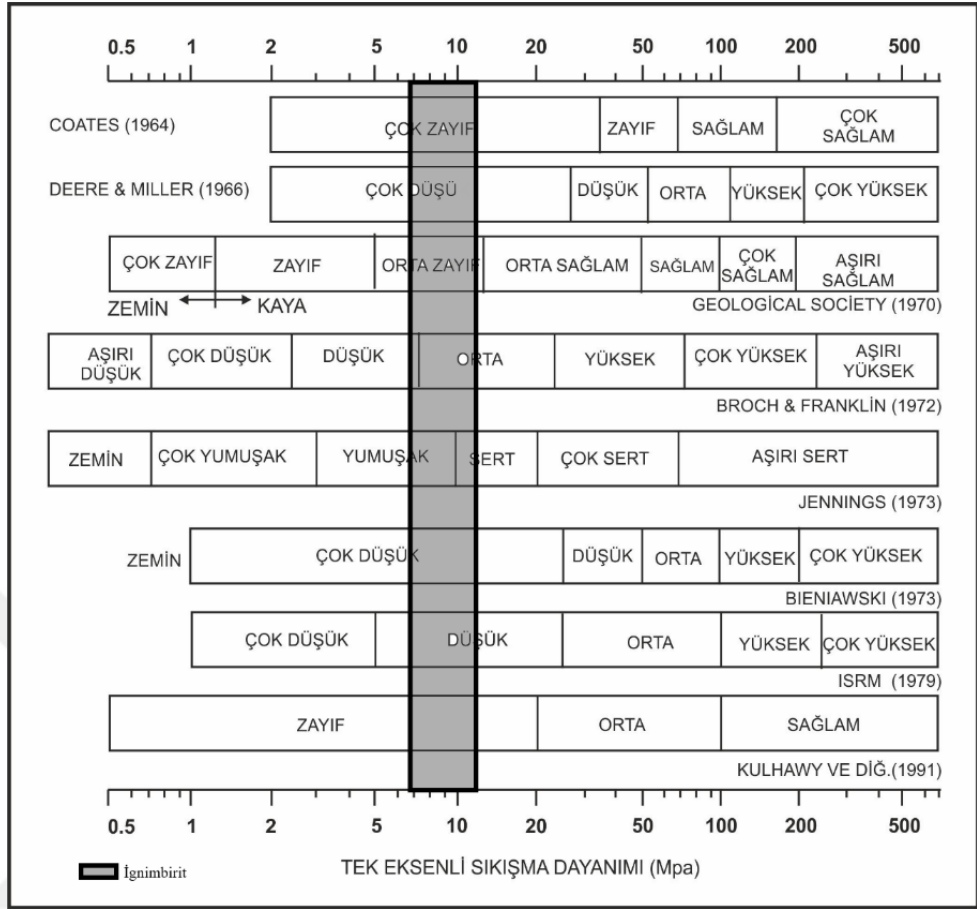
#### 4.4. Kaynak Alanın Malzeme ve Kaya Kütle Özellikleri

Çalışma alanında kaya düşmelerinin kaynak alanını oluşturan ignimbiritlere (İgm-2) ait malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik ISRM [19] önerileri doğrultusunda, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya ve Zemin Mekaniği laboratuvarında bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 4.1’de verilmiştir.

Buna göre kaynak alanda yer alan ignimbiritlerin ortalama birim hacim ağırlığı 15.62 kN/m<sup>3</sup>, ortalama doymun birim hacim ağırlığı 18.98 kN/m<sup>3</sup> belirlenmiş ve buna göre düşük birim hacim ağırlıklı kaya olarak tanımlanmıştır. İgnimbiritlerin ortalama görünür porozite değeri is 30.55 (%) olarak hesaplanmıştır. İgnimbiritlerin ortalama kuru tek eksenli sıkışma dayanımı ve doymun tek eksenli sıkışma dayanımı sırasıyla 10.53 MPa ve 7.65 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 4.1). Tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarına göre, kaynak zonu oluşturan ignimbiritlerin Deere ve Miller’a göre “çok düşük dayanımlı kayaç” olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.10).

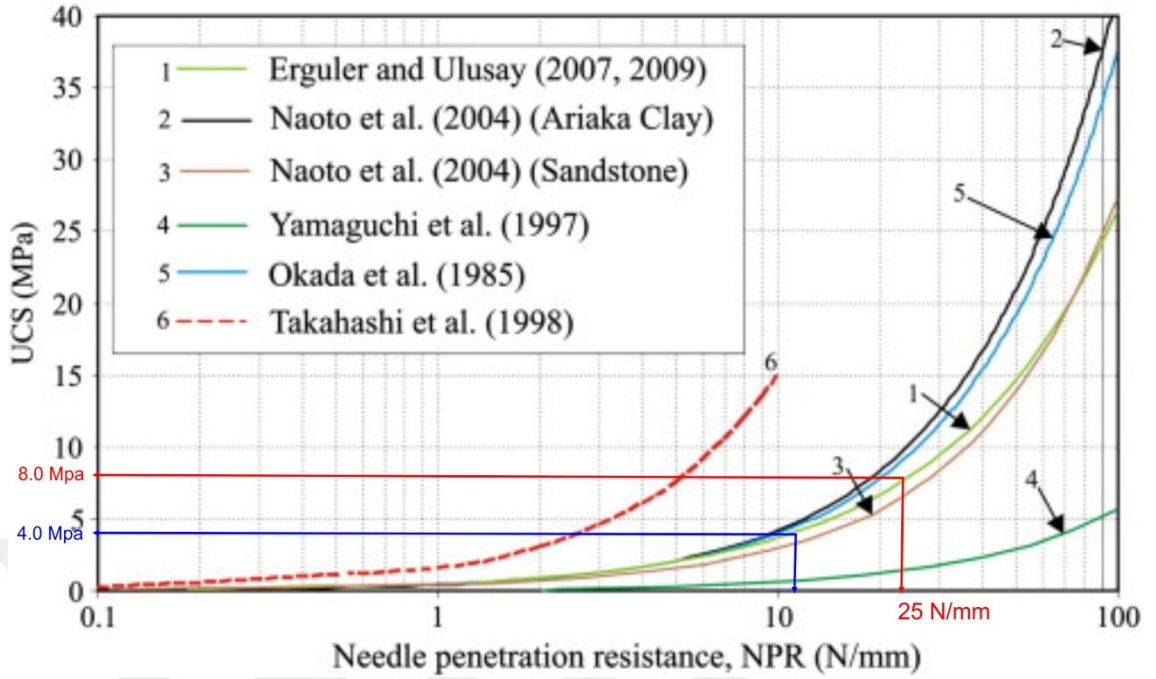
Tablo 4.1. Kaynak alanı oluşturan ignimbiritlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Minumum	Maksimum	Ortalama
Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	15.02	16.19	15.62
Islak Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18.60	19.26	18.98
Görünür Porozite (%)	29.63	31.38	30.55
Ağırlıkça Su Emme (%)	17.95	19.78	18.76
Schmidt Sertliği	20	20	20
Kuru Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	9.04	12.17	10.53
Doymun Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	6.78	8.51	7.65
İğne Penetrometresi Dayanımı (N/mm)	11	25	20



Şekil 4.10. Çalışma alanında gözlenen ignimbiritlerin farklı dayanım sınıflandırmalarındaki konumu

Bu tez kapsamında kaynak alandaki ignimbiritlerin dayanımlarını belirlemek üzere arazide iğne penetrometresi deneyi gerçekleştirilmiştir. İgnimbiritlerde iğne penetrometresi batma oranları (NPR) 11 ile 25 N/mm arasında değişmektedir ve ortalama değer 20 N/mm'dir. Ulusay ve Ergüler (2012) tarafından önerilen deneysel ilişki yardımıyla hesaplanan dayanım değerlerine bakıldığında, ignimbiritlerin ortalama tek eksenli basınç dayanımının 8.00 ile 4.00 MPa aralığında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.11). Bu sonuçlar laboratuvar elde ettiğimiz sonuçlarda kısmen düşük olup, genel olarak laboratuvar sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.11. İğne penetrometresi direncinden kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımının tahmin edilmesine yönelik grafik (Ulusay ve Ergüler, 2012).

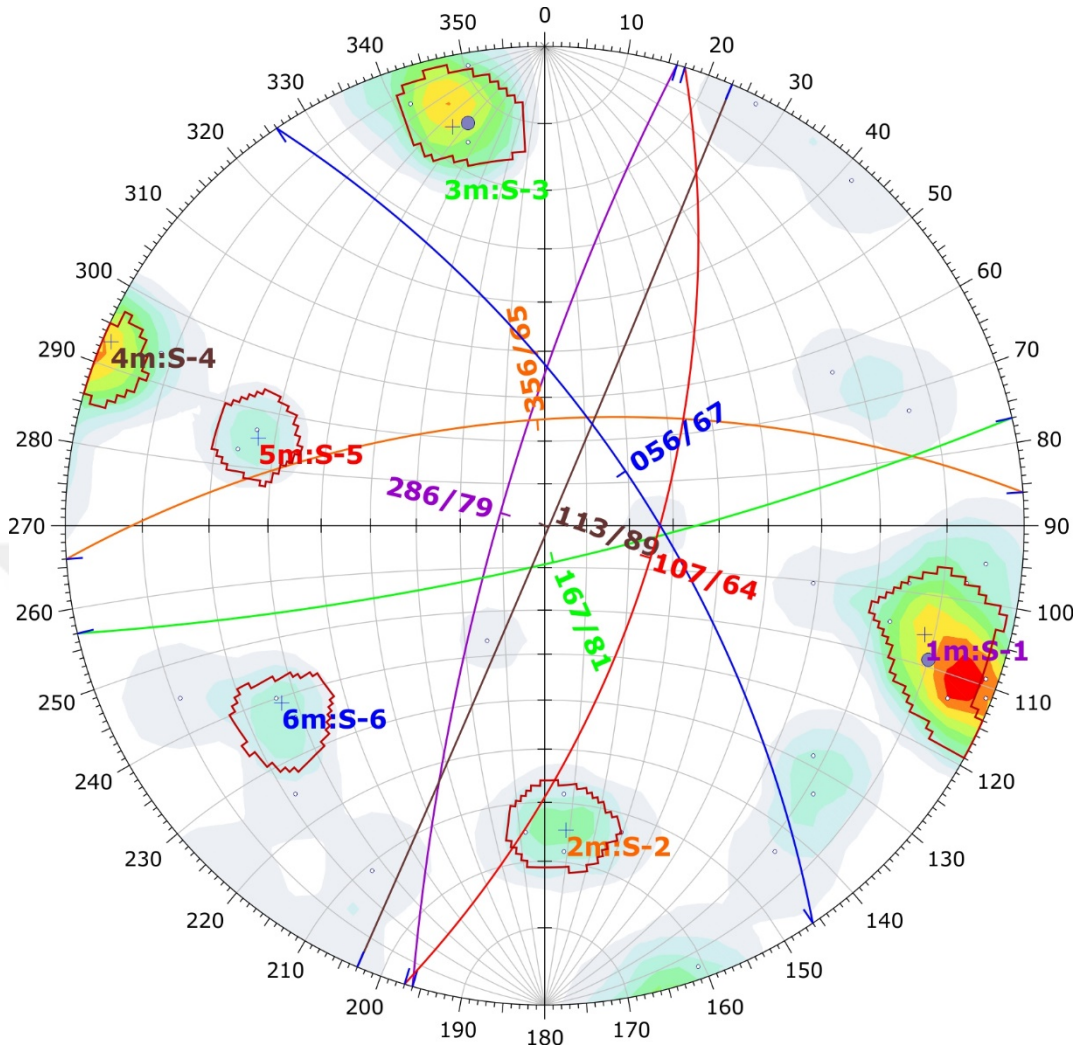
Kaynak alanda kaya kütle özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalarda süreksizliklerin nicel tanımlaması yapılmıştır. Ağırlıklı olarak soğuma çatlaklarının oluşturduğu süreksizlikler genel olarak dolgu içermemekle birlikte, yer yer az kil dolgulu, süreksizlik yüzeylerin küçük ölçekte düz ve büyük ölçekte az dalgalı-düzlemsel olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.12). Bunun yanında bunları kesen ikincil süreksizlik takımları da bulunmaktadır. Süreksizlikle az-orta bozunmuş ve arazi incelemelerinin gerçekleştirildiği dönemde süreksizlikler boyunca herhangi bir su izi gözlenmemiştir. İgnimbitlerdeki süreksizlikler genelde orta-geniş aralıklı olup, süreksizlikler çok geniş aralıklıdır. Süreksizlik devamlılıkları yüksektir ve ISRM (2007)'e göre orta-yüksek devamlı olarak sınıflandırılabilirler.

Çalışma alanında yaptığımız arazi çalışmaları sonucunda ölçümlerimizden yola çıkarak 286/79, 356/65, 167/81, 113/89, 107/64, 056/67 olmak üzere altı egemen süreksizlik takımı belirlenmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.12. Arazide düşey soğuma çatlakları ve süreksizliklerin genel görünümü

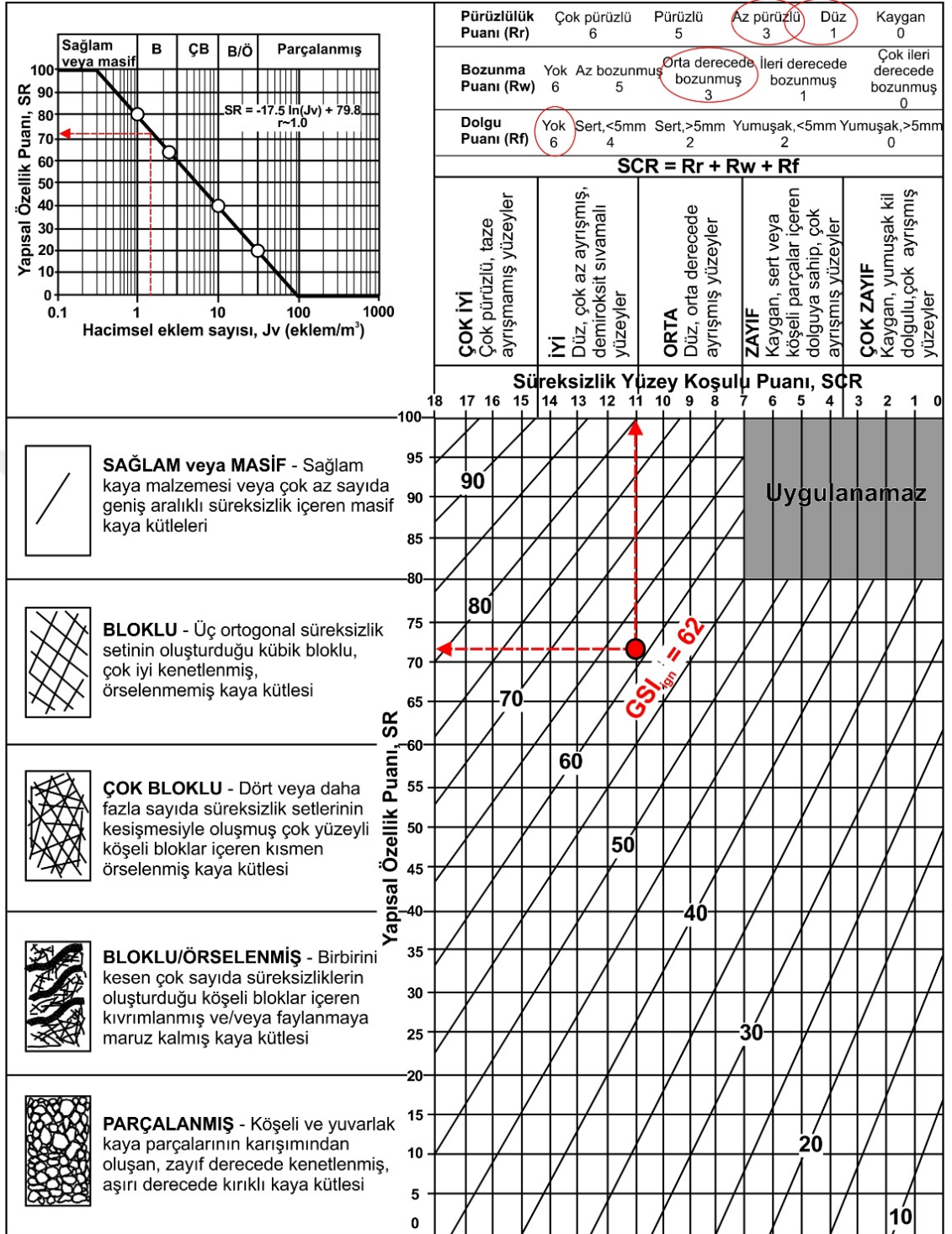
Kaynak alandaki ignimbiritlerin kaya kütle özellikleri ilk olarak 1990'lı yıllarda Hoek-Brown tarafından geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) yardımıyla da değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.13. Kaynak alandaki hakim süreksizlik takımları ve kontur diyagramları

GSI sisteminde kaya kütleleri, süreksizlik özellikleri ve kaya kütlelerinin özelliğini yansıtan yapısal özellik puanı yardımıyla sınıflanabilmektedir. Kaynak alanı oluşturan ignimbirit-2 seviyesindeki süreksizlik yüzeylerinin özellikleri ışığında ignimbirit-2 için süreksizlik yüzey koşulu (SCR) puanı 11 olarak saptanmıştır. Öte yandan, ignimbirit için hacimsel eklem sayıları ( $J_v$ ) 1.5'dir. Bu durumda, GSI sistemindeki yapısal özellik puanı (SR), ignimbirit için 72 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.14). Buna Şekil 9'daki abaktan da görülebileceği üzere, ignimbirit için GSI puanı 62'dir. GSI değerine göre çalışma alanında yer alan kaya birimleri "bloklı" kaya kütlelerini yansıtmaktadır.





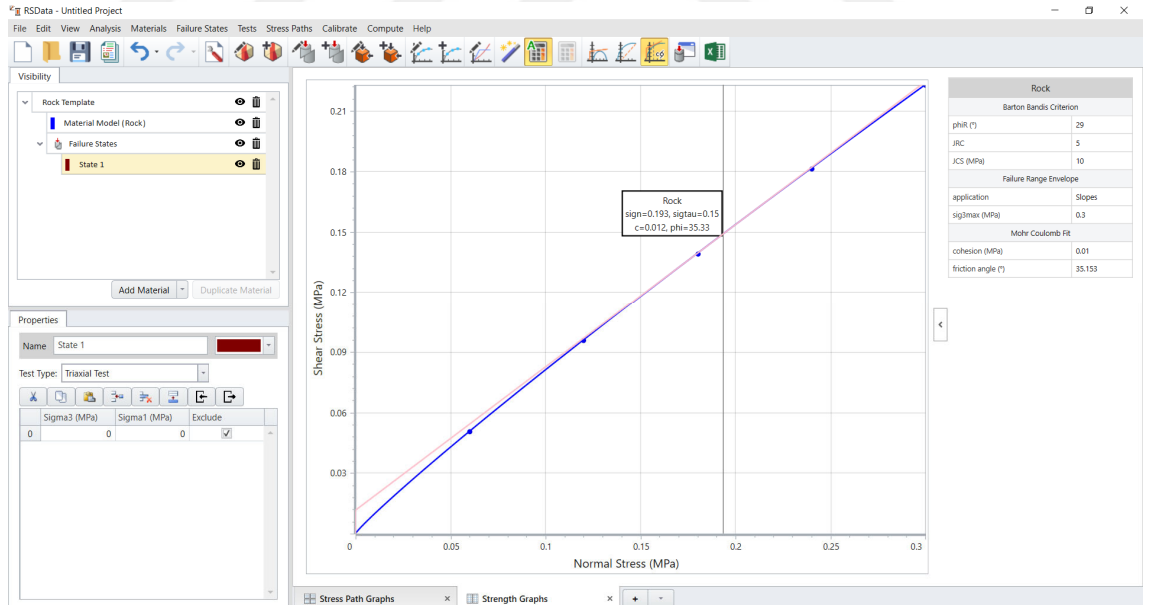
Şekil 4.14. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) abağında İğnimbirit-2 biriminin gösterimi (Sönmez ve Ulusay, 2002).

## 4.5. Kinematik Analiz Sonuçları

Süreksizlik kontrollü yenilmelerin değerlendirildiği kinematik analiz yöntemleri detaylı analizler öncesin şev ve yamaç stabilitesinin değerlendirildiği kullanışlı yöntemlerden biridir. Düzlemsel kayma, devrilme ve kama yenilmesi gibi süreksizlik kontrollü duraysızlıkların irdelendiği yöntemde süreksizlik ve yamaç yöneliminin yanı sıra süreksizlik düzlemlerinin içsel sürtünme açısı dikkate alınmaktadır.

### 4.5.1. Süreksizlik düzlemlerinin kayma dayanımı

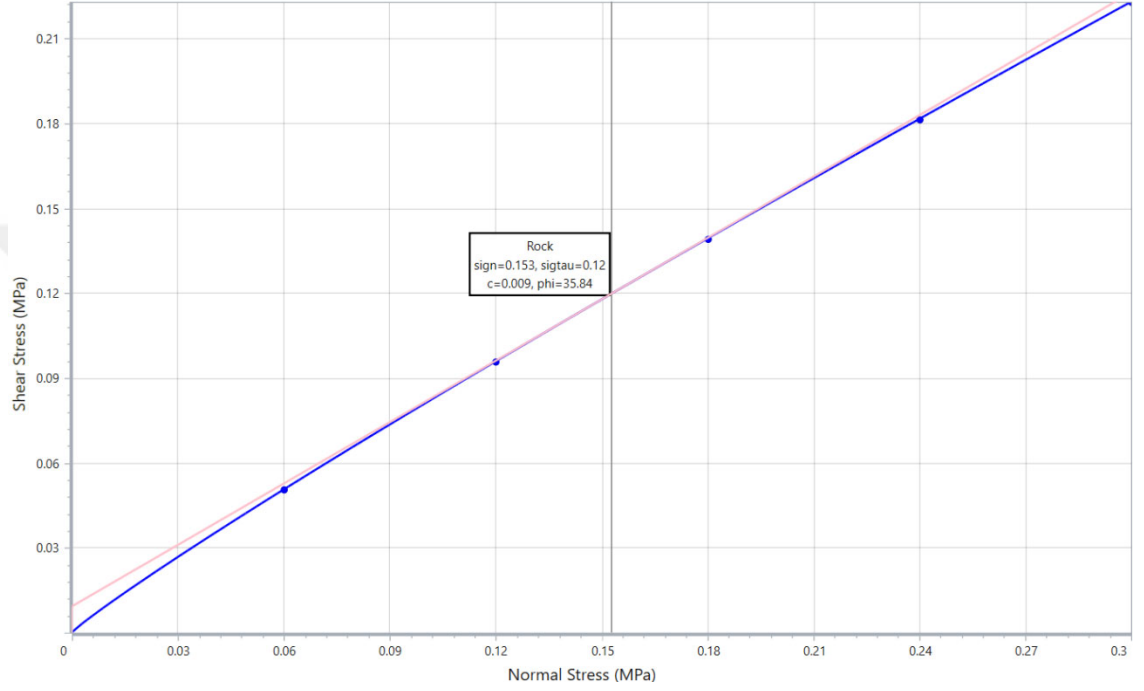
Kaya malzemesi ve süreksizliklerin birlikte oluşturduğu yapıyı kaya kütlesi olarak tanımlamakta olup, düşük gerilme koşullarındaki duraysızlıklar kayaç malzemesinden çok süreksizliklerin kayma dayanımı parametreleri tarafından kontrol edilirler. Bu çalışmada, Barton Bandis yenilme ölçütü, RS Data (Rocscience, 2023) yazılımı aracılığıyla süreksizlik makaslama dayanımının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. RS Data yazılımının ekran görüntüsü (Rocscience, 2023)

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kaynak alanı oluşturan ignimbiritlerin için temel sürtünme açısının ( $\phi_b$ ) ortalama 29 olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanında süreksizlik kontrollü yenilmeler gerçekleştirerek kaya düşmelerine neden olan ignimbiritler için süreksizlik pürüzlülük katsayısı (JRC), 5 olarak kabul edilmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin

duvar mukavemeti (JCS) laboratuvar ve arazi deneylerinden 10 MPa bulunmuştur. Bu parametrelere göre elde edilen süreksizlik yenilme zarfı (Barton ve Bandis, 1990) Şekil 4.16’de verilmiştir. Buna göre çalışma alanında kaya duraysızlıkları gösteren ignimbiritlerin süreksizlik düzlemleri için sürtünme açısı ( $\phi$ ) 35 derece olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Kaynak alanda yer alan ignimbiritler için belirlenen süreksizlik yenilme zarfı

Kaya şevlerinde süreksizlik kontrollü meydana gelen duraysızlıklar düzlemsel, kama ve devrilme şeklinde olmak üzere üç başlık altında materyal ve metod bölümünde detayları verilmiştir. Söz konusu kaya kütle yenilmelerini değerlendirmek için kaynak alanı 5 farklı tasarım sektörüne ayırılmıştır (Şekil 4.17). Ayrılma yapılırken şevlerin yönelimi gibi benzerlik gösteren yapısal unsurlar göz önünde bulundurulmuş ve kinematik analizlerde Dips 9.0 (Rocscience) programı kullanılmıştır. Tablo 4.2’de her bir sektörde etkili olan süreksizlik yönelimleri ve göz önünde bulundurulan diğer parametreler verilmiştir. Yapılan kinematik analiz sonuçları Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de her bir sektör için ayrı ayrı verilmiştir. Belirlenen sektörlere göre kinematik açıdan oluşabilecek duraysızlıkların dağılımı Tablo 4.3’de verilmiştir.





Şekil 4.17. Kaynak alanda kinematik analizler için ayrılan sektörler

Tablo 4.2. Kinematik analizlerde göz önünde bulundurulmuş şev parametreleri

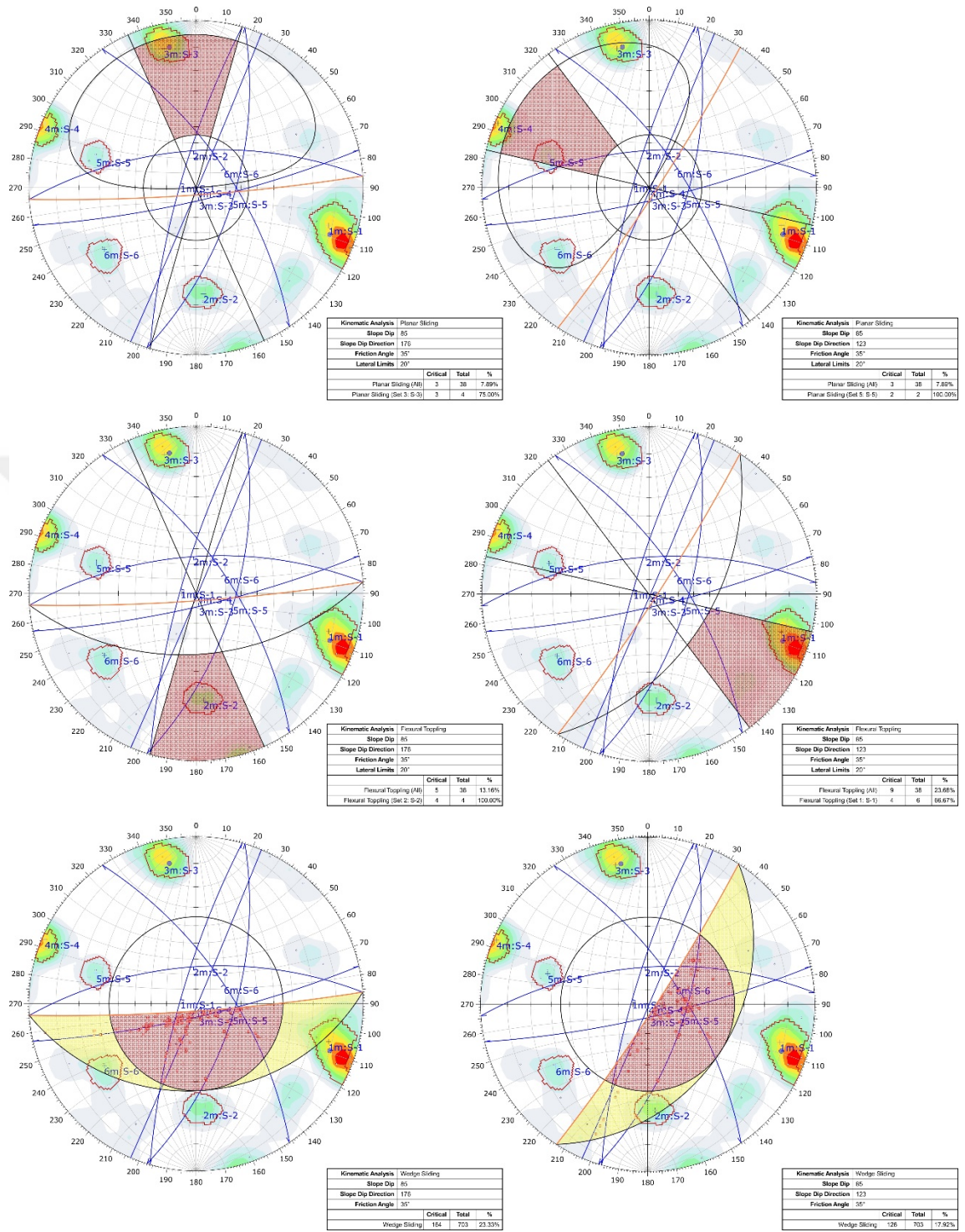
Sektör No	Şev yönelimi	Hâkim Süreksizlik Yönelimleri	Süreksizlik Yöneliminin içsel Sürtünme açısı ( $\phi_r$ )	Litoloji
01	176/85	286/79 - 356/65 - 167/81, 113/89 - 107/64 - 056/67	35°	ignimbirit
02	123/85	286/79 - 356/65 - 167/81, 113/89 - 107/64 - 056/67	35°	ignimbirit
03	090/85	286/79 - 356/65 - 167/81, 113/89 - 107/64 - 056/67	35°	ignimbirit
04	056/85	286/79 - 356/65 - 167/81, 113/89 - 107/64 - 056/67	35°	ignimbirit
05	082/85	286/79 - 356/65 - 167/81, 113/89 - 107/64 - 056/67	35°	ignimbirit

Gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçlarına tüm sektörlerde düzlemsel, kama ve devrilme türü yenilmelerin oluşması beklenmektedir. Düzlemsel türü yenilmelerin oluşması diğer yenilme türlerine göre daha düşük bir olasılığa sahiptir. Buna karşı kama türü yenilmelerin oluşmasını daha yaygın olarak beklenmektedir. Aynı şekilde devrilme türü yenilmelerin özellikle 2 ve 3 nolu sektörlerde daha fazla olması beklenmektedir. Söz konusu sektörler güneydoğuya ve doğuya eğimli şevler olması dikkat çekicidir. Şöyle ki kaynak alandan düşecek blokların tehdit ettiği konutlar kaynak alanın doğu ve güney doğusunda yer almaktadır. Arazi gözlemlerinde de daha önceden düşen blokların incelenen tepenin güney ve güney doğusunda daha yoğun yer alması kinematik analiz sonuçları doğrular niteliktedir. Her bir sektöre göre oluşabilecek yenilme türünün oransal dağılımı Tablo 4.3’de verilmiştir.

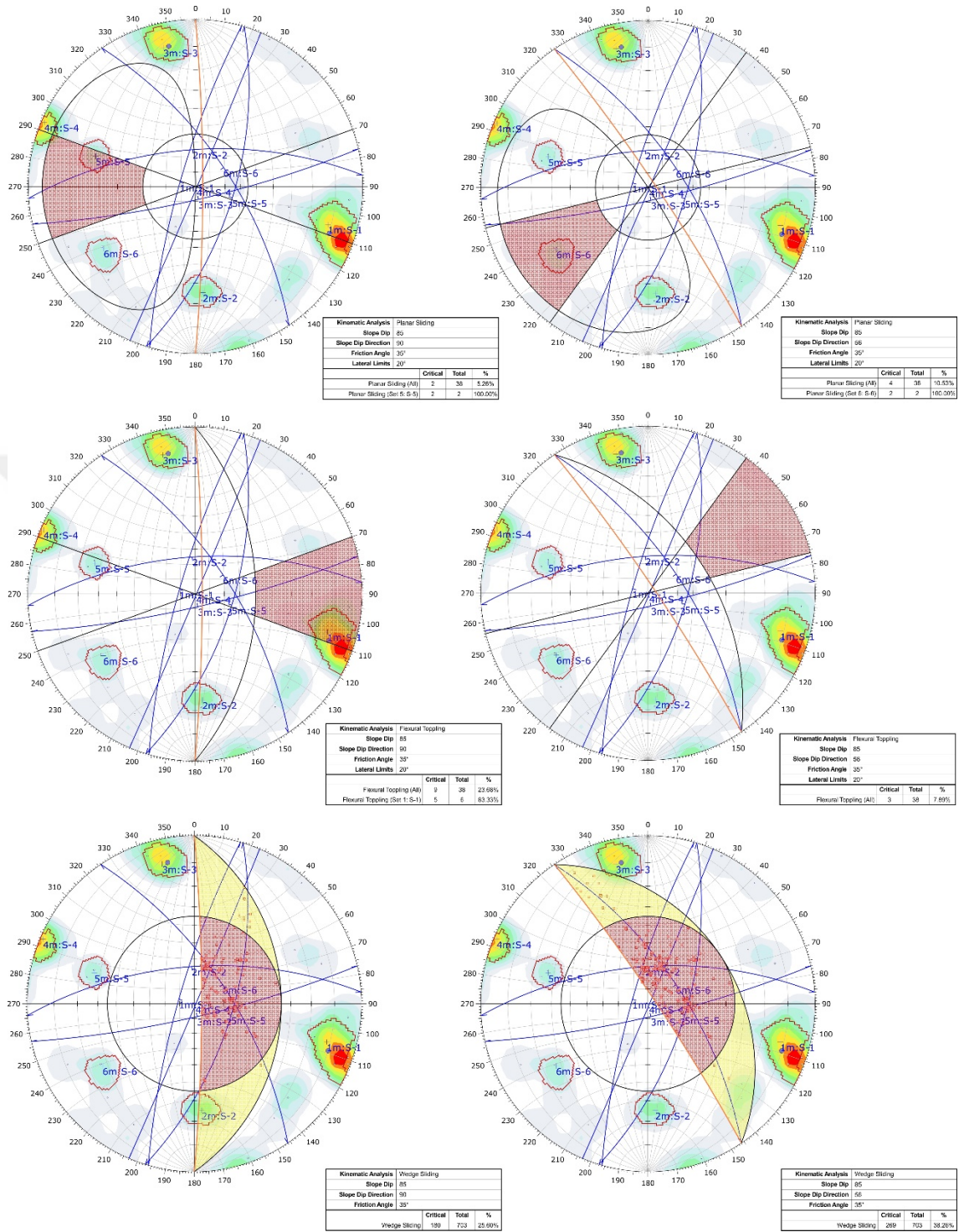
Tablo 4.3. Belirlenen sektörler için kinematik açıdan oluşabilecek duraysızlıkların oransal dağılımı

Sektör No	Düzlemsel kayma	Kama tipi duraysızlık	Devrilme tipi duraysızlık Flexural
01	7.89 (%)	23.33 (%)	13.16 (%)
02	7.89 (%)	17.92 (%)	23.68 (%)
03	5.26 (%)	25.60 (%)	23.68 (%)
04	10.53 (%)	38.26 (%)	7.89 (%)
05	2.63 (%)	27.60 (%)	13.16 (%)



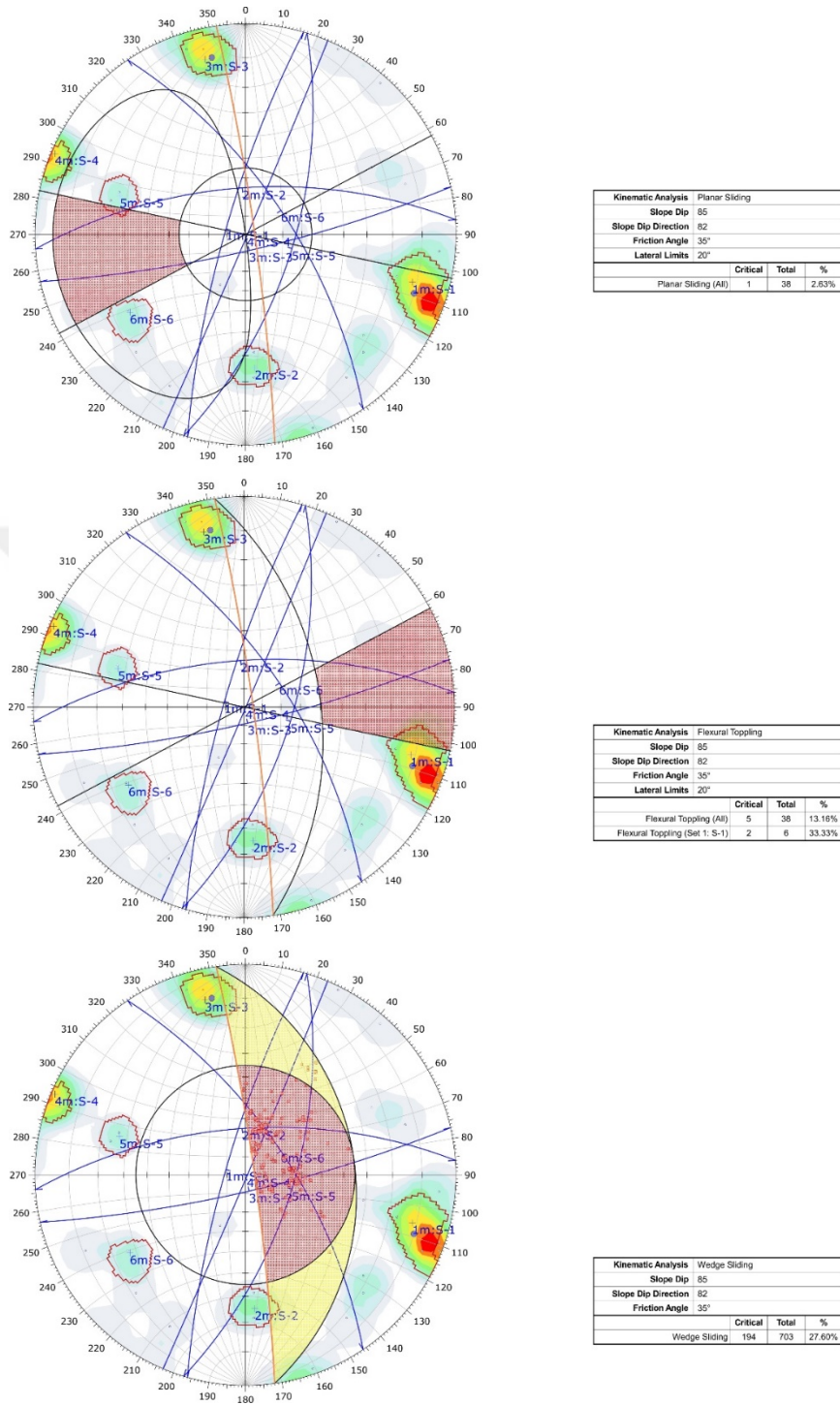


Şekil 4.18. Sektör 1 ve 2 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları



Şekil 4.19. Sektör 3 ve 4 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları

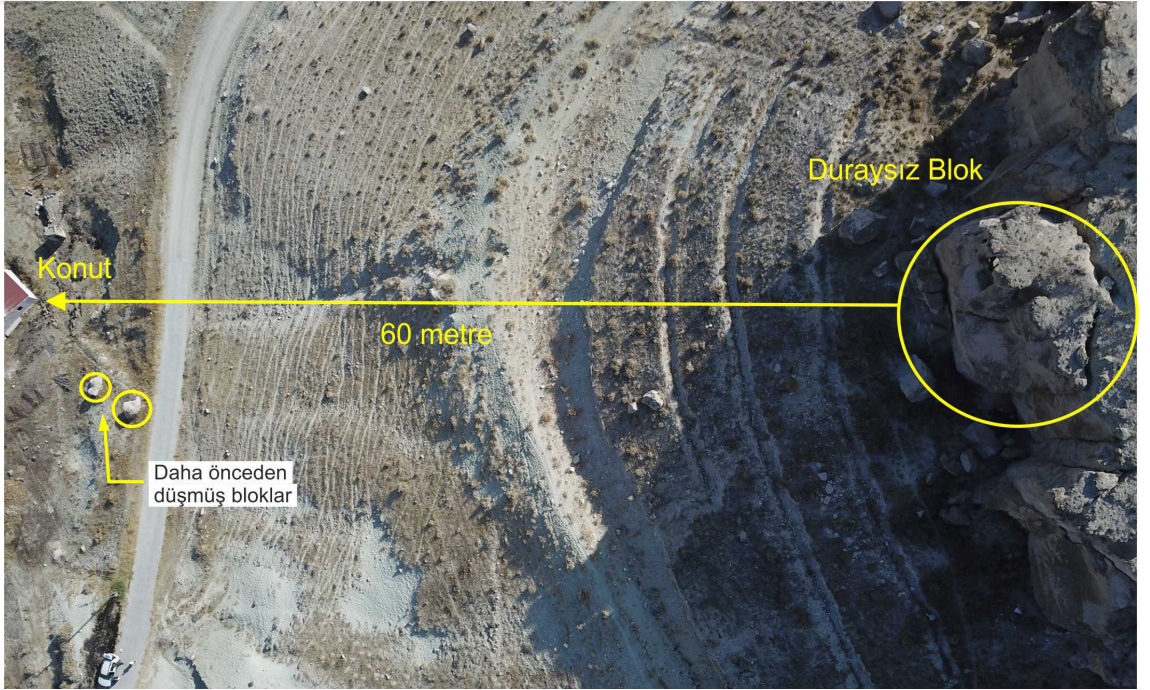




Şekil 4.20. Sektör 5 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları

#### 4.6. Kaya Düşme Analizleri

Sahada yapılan gözlemlerde dik yamaçın topuk kısmında yer alan ve yaklaşık 1.00 metre kalınlığında konglomera ve çakıltası seviyesinin farklı ayrışması ve/veya yerel halkın yamaç dip kısmından malzeme alması nedeniyle ignimbiritlerin alt seviyesinin boşaldığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak dik süreksizliklerin kontrol ettiği sütunsal bloklar asılı bir duruma gelmiştir. Bu durum kaynak alanı birçok kaya kütle duraysızlığı açısından riskli duruma getirmiştir (Şekil 4.21). Meydana gelen kaya kütle duraysızlıkları topoğrafyanın uygun olduğu yerlerde yamaç boyunca hareket ederek, yamaç aşağısında bulunan konutları tehdit etmektedir.



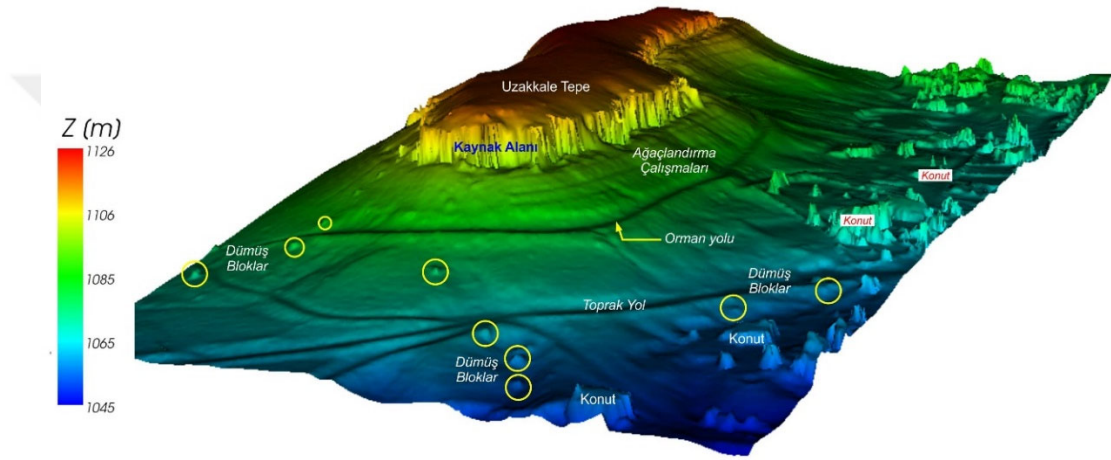
Şekil 4.21. Sektör 5 için gerçekleştirilen kinematik analiz sonuçları

Tez sahasındaki yamaç üzerinde gözlenebilecek kaya düşmelerinin değerlendirilmesinde 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden yararlanılmıştır. Bu analizler sonucunda inceleme sahasında düşmesi muhtemel blokların yuvarlanabileceği maksimum mesafe, sıçrama yüksekliği ve toplam kinetik enerji dağılımları 3 boyutlu sayısal yüzey modelleri üzerinde RocPro3D yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır.

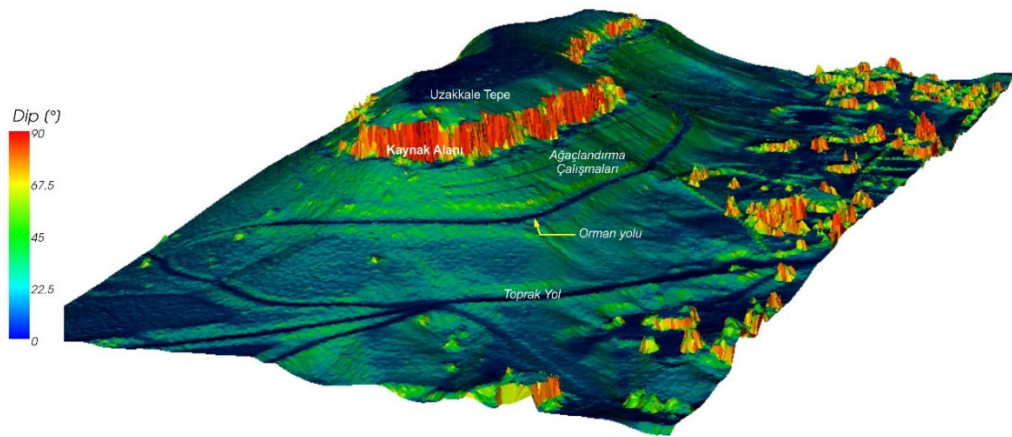
Bozca köyünün batısındaki Uzakkale Tepe'deki inceleme alanında 3-boyutlu kaya düşme analizleri, incelenen yamaçta insansız hava aracı (İHA) ile alınan gerçek ortofoto mozaïği



görüntülerinden fotogrametrik yöntemlerle elde edilen nokta bulutundan hazırlanan detay sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanı için İHA görüntüsünden elde edilen nokta bulutu yardımıyla RocPro3D yazılımında oluşturulan ve 3-boyutlu kaya düşme analizlerinin altlığını oluşturan sayısal yüzey modelinden üretilen düzensiz üçgen ağı (TIN) ve buna ait yükseklik modeli Şekil 4.22’de, arazi eğim modeli ise Şekil 4.23’de verilmiştir.



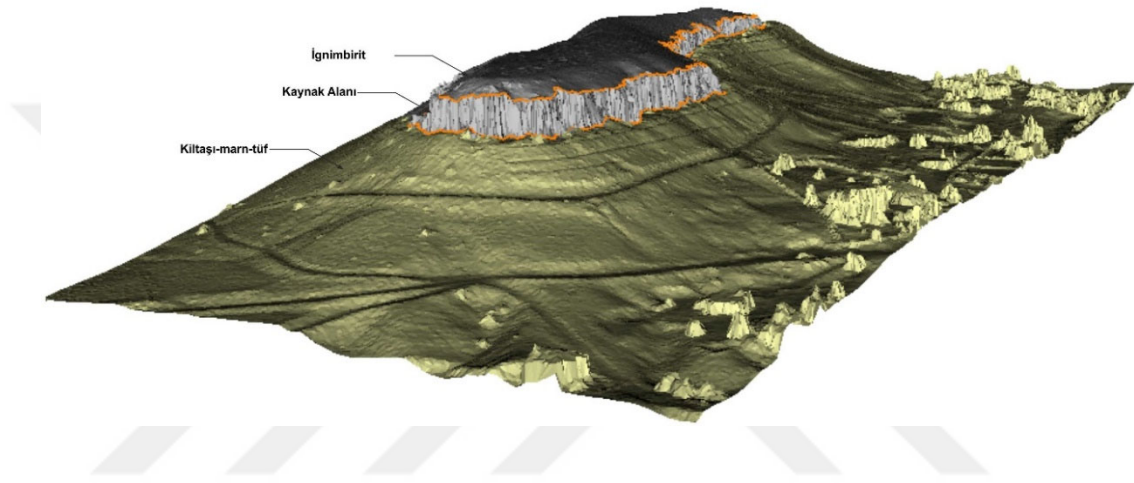
Şekil 4.22. Çalışma alanının sayısal yüzey modeli



Şekil 4.23. İnceleme alanının eğim modeli

Şekil 4.22’den görüleceği üzere inceleme alanındaki deniz seviyesinden yükseklik 1045 ile 1126 m arasında değişmektedir. Kaya düşme ana kaynak lokasyonunu oluşturan

176/85, 123/85, 090/85, 056/85 ve 082/85 yönelimli dik yamaçlar üzerinde çok sayıda düşme potansiyeli olan blok olduğu arazi çalışmalarında ve elde edilen ortofoto üzerinde açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle güney ve güneydoğuya bakan yamaç üzerinde daha önceki dönemlerde düşmüş çok sayıda blok da yer almaktadır. Bu nedenle 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, güney ve güney doğuya yönelimli dik yamaçlar alansal kaynak olarak modele dahil edilmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Kaya düşmesi kaynak alan ve litolojik ayrımlar

RocPro3D yazılımında kaya düşmesinin modelleneceği 3-boyutlu sayısal yüzey modeli üzerine farklı jeolojik birimler tanımlanabilmekte ve bu birimler için farklı geri verme katsayıları ( $R_n$  ve  $R_t$ ) ve sürtünme katsayıları atanabilmektedir. İnceleme alanında, kaya düşmelerinin gerçekleştiği yamaçta arazi gözlemlerine bağlı olarak iki farklı jeolojik birim belirlenmiştir. Buna göre, incelenen en üst seviyeden alta doğru dik yamaçları oluşturan İgnimbiritler ve görece eğimin azaldığı yerlerde ise volkano-sedimanter birim sınırları dikkate alınarak 3-boyutlu kaya düşme modelinde tanımlanmıştır (Şekil 4.24).

İncelenen yamaçta yapılan gözlemlerde özellikle güney yamaçta daha önceki dönemlerde düşen çok sayıda irili ufaklı blok tespit edilmiştir (Şekil 4.25). Güneye bakan yamaçlarda daha yoğun bloklar izlenirken, doğu ve özellikle kuzey doğuya gidildikçe bloklar varlığı azalmaktadır.

Bu blokların boyutları arazide ölçülerek kaynak zondan düşebilecek blok boyutu hakkında değerlendirmeler yapılmış olup, kaynak alanı için bir eksen uzunluğu 4.0 m olan silindir bloklar için 3-boyutlu kayda düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.

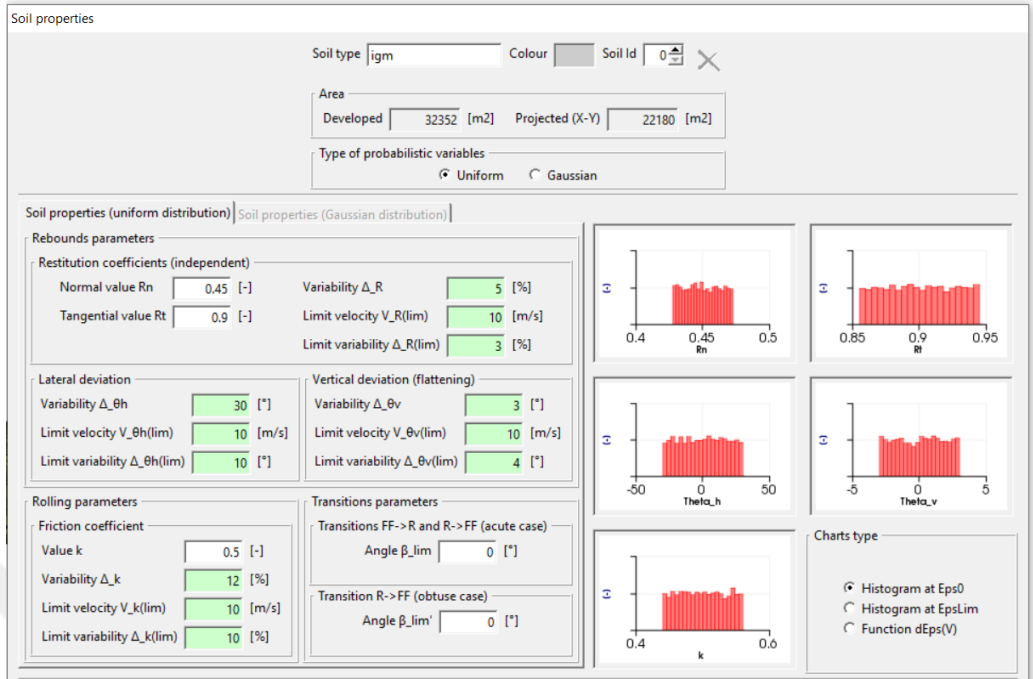


Şekil 4.25. Daha önceden düşmüş blokların genel görünüşleri

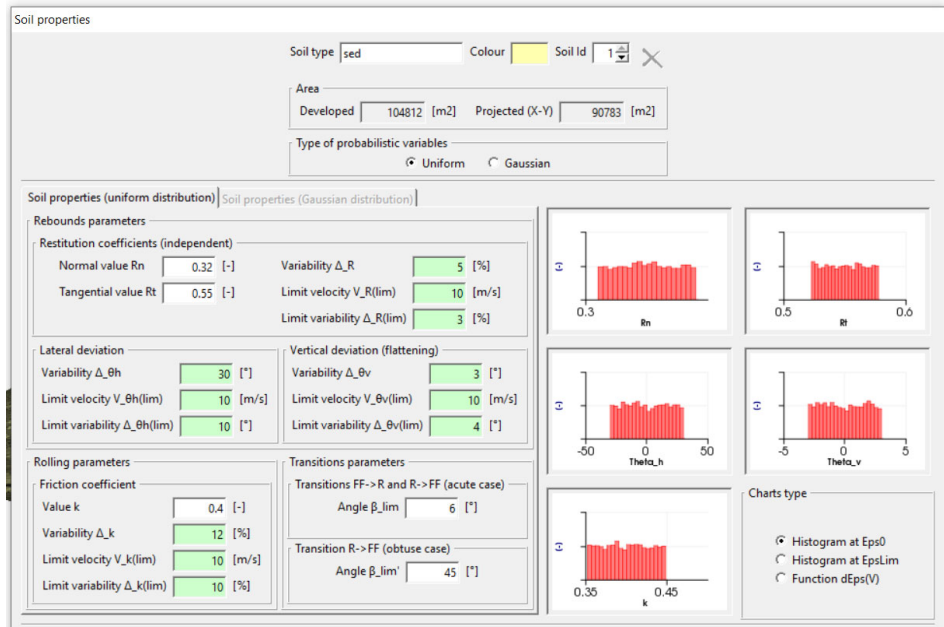
Bu çalışmada gerçekleştirilen 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme analizlerinde benzer topoğrafyada (Kapadokya Bölgesi) yapılan geri analizlere bağlı olarak belirlenen geri verme ve sürtünme katsayıları kullanılmıştır. Buna göre, incelenen yamaç için gerçekleştirilen 3-boyutlu olasılıksal kaya düşme analizlerinde farklı jeolojik birimler için kullanılan geri verme ve sürtünme katsayısı değerleri Tablo 4.3’de özetlenmiştir. Olasılıksal analizlerde geri verme katsayıları için  $\pm$  %5 değişkenlik oranı atanmıştır. Sürtünme katsayısı değişkenlik oranı ise %12 mertebesindedir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27).

Tablo 4.4. 3-B kaya düşme analizleri için kullanılan geri verme ve sürtünme katsayıları

Jeolojik Birim	Normal geri verme katsayısı (Rn)	Tanjant geri verme katsayısı (Rt)	Sürtünme katsayısı (k)
İgnimbiriti	0.45	0.90	0.50
Volkanosedimanter seviye	0.32	0.55	0.40



Şekil 4.26. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde blok dinamiğine (ignimbiriti için) ait parametreler ve değişkenlik aralıkları

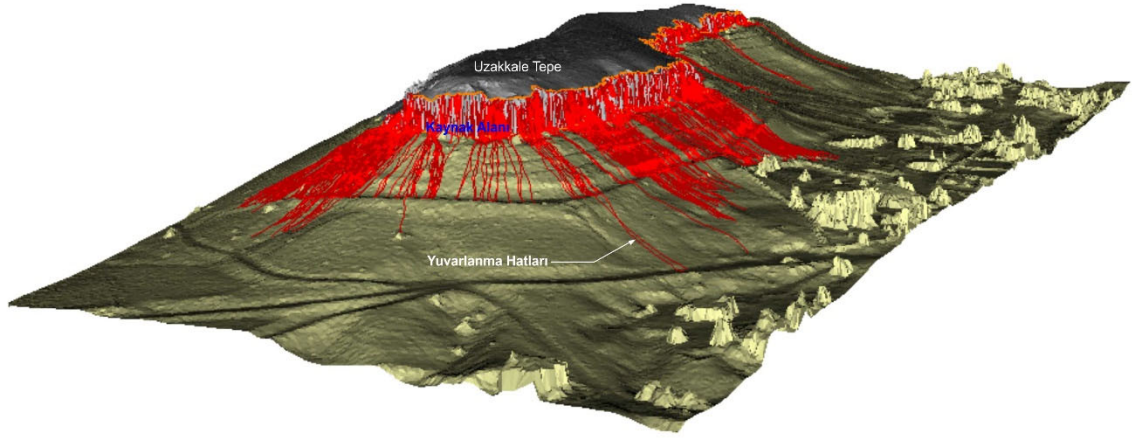


Şekil 4.27. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde blok dinamiğine (sedimanter seviye için) ait parametreler ve değişkenlik aralıkları



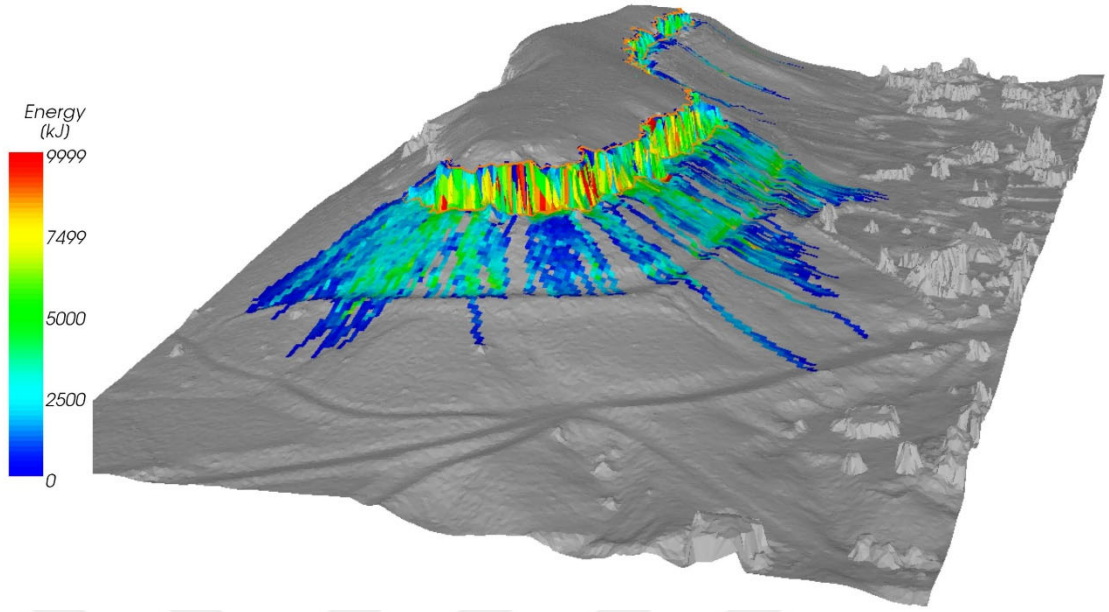
RocPro3D yazılımında inceleme alanı için sayısal yüzey modeli üzerinde gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, düşen blokların (ignimbirit) birim hacim ağırlığı, laboratuvar deney sonuçlarına göre 1581 kg/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir. Ayrıca kaynak alandan 3-boyutlu kaya düşme analizleri sırasında 10000 adet blok sayısal yüzey modeli üzerinde düşürülerek yuvarlanma mesafesi, sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji vb. gibi parametreler belirlenmiştir.

İHA'dan elde edilmiş sayısal yüzey modeli üzerinde 4 m blok boyutu ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda belirlenen kaya yuvarlanma hatları Şekil 4.28'de verilmiştir. Buna göre düşecek kaya bloklarının yamaç aşağısında yer alan konutların yakınına ve yollara kadar ulaşmaktadır. Fakat blokların önemli bir bölümü de ağaçlandırma çalışmaları sırasında açılan yol boyunca hareketlerini tamamlamaktadırlar. Bu durumda söz konusu yol tutma hendeği gibi davranmakta ve birçok bloğun daha uzak mesafelere ulaşması engellemektedir.



Şekil 4.28. 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatları

RocPro3D yazılımı ile gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde, 4 m'lik silindirik bloklar için toplam kinetik enerji değerleri de belirlenmiştir (Şekil 4.29). Şekil 4.29'da sunulan toplam kinetik enerji dağılım haritasına göre toplam kinetik enerji değerleri kaynak alanda 10000 kJ civarında iken, ağırlıklı olarak yamaç yüzeyinde 5000 kJ'un altındadır. Ayrıca ağaçlandırma çalışmaları için açılan yolu geçen blokların enerjilerinin oldukça düştüğü dikkati çekmektedir.

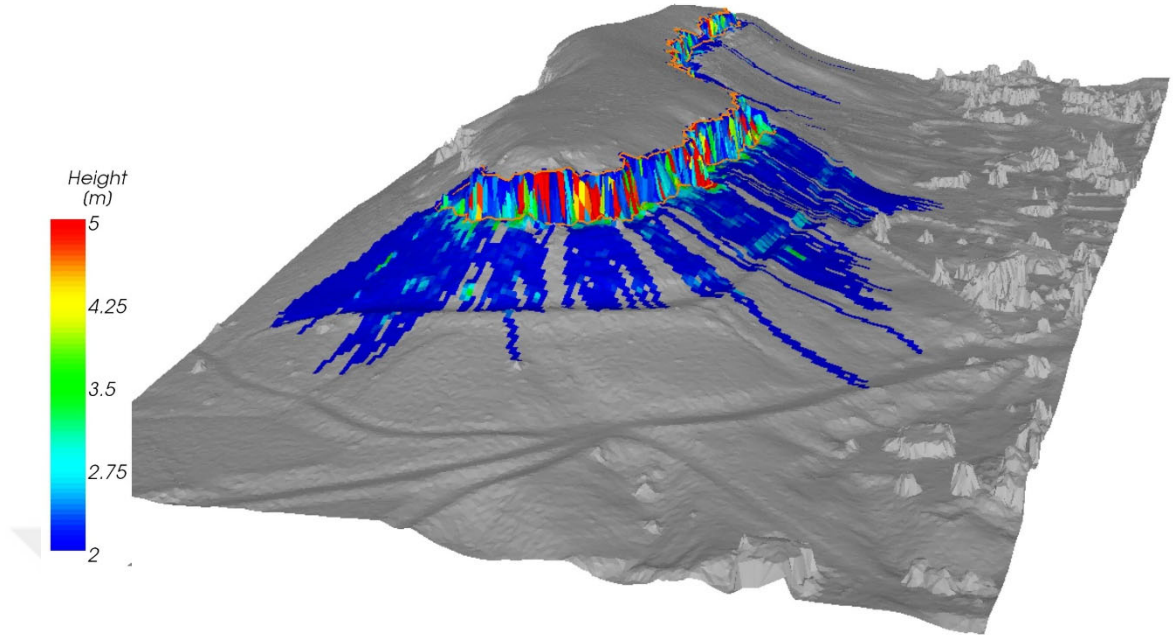


Şekil 4.29. 3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan toplam kinetik enerji modeli

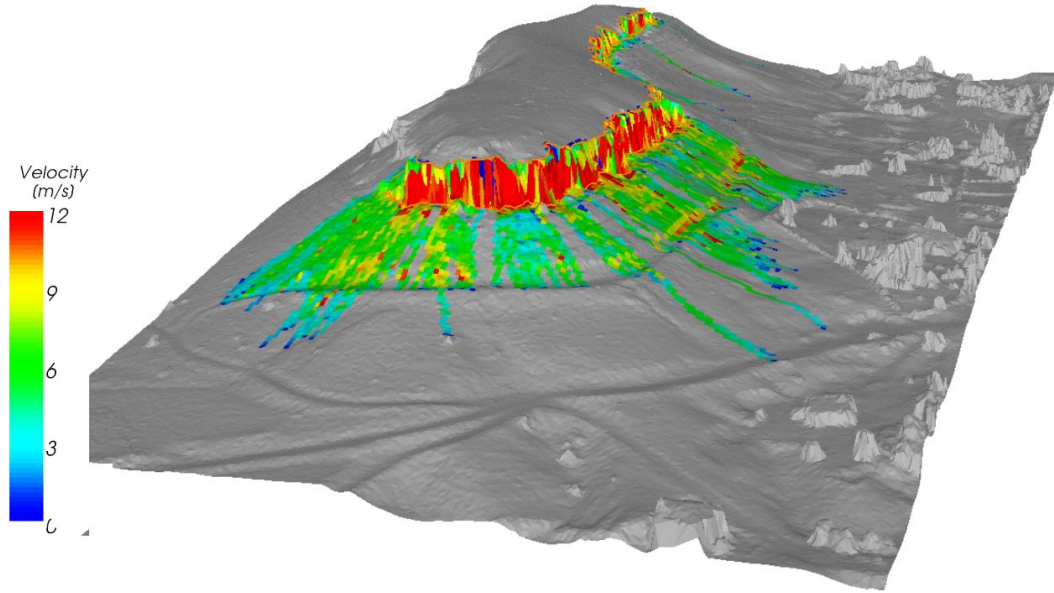
Şekil 4.30'da verilen model üzerinde yuvarlanan blokların topoğrafyaya çarpması sırasında oluşan sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, bloklardaki sıçrama yüksekliğinin yamaç eğiminin azaldığı kesimlerde çok yüksek olmadığı ve blokların çoğunlukla yuvarlanarak hareket ettiği göze çarpılmaktadır. Fakat kaynak alanda sıçrama yükseklikleri 5.0 metreye kadar ulaşmaktadır. Volcano-sedimanter yüzeylerde sıçrama yükseklikleri 2.0 metrenin altında gerçekleşmektedir.

Şekil 4.31'de 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucu hesaplanan ötelenme hızlarının arazi modeli üzerindeki dağılımı verilmiştir. Maksimum ötelenme hızı 12 m/s ulaşırken, blokların ortalama hızlarının 5-6 m/s civarında gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle ağaçlandırma çalışmaları için açılan yolu geçen blokların hızları 3 m/s kadar düşmektedir. Şekil 4.32'de blokların hareket süreleri gösterilmiş olup, buna göre en uzağa ulaşan bloğun hareket süresi 27.54 saniye olarak gerçekleşmektedir. Bunun yanında görece kaya tutma hendeği gibi çalışan yola bloklar ortalama 13 saniyeden daha kısa sürede ulaşmaktadır. Ayrıca kaynak alanda yapılan ağaçlandırma çalışmalarına ait teraslarda blokların hızlarını yavaşlatarak, doğu yamaçta güney yamaca göre aynı sürede daha kısa mesafelere ulaşmasına neden olmuştur.

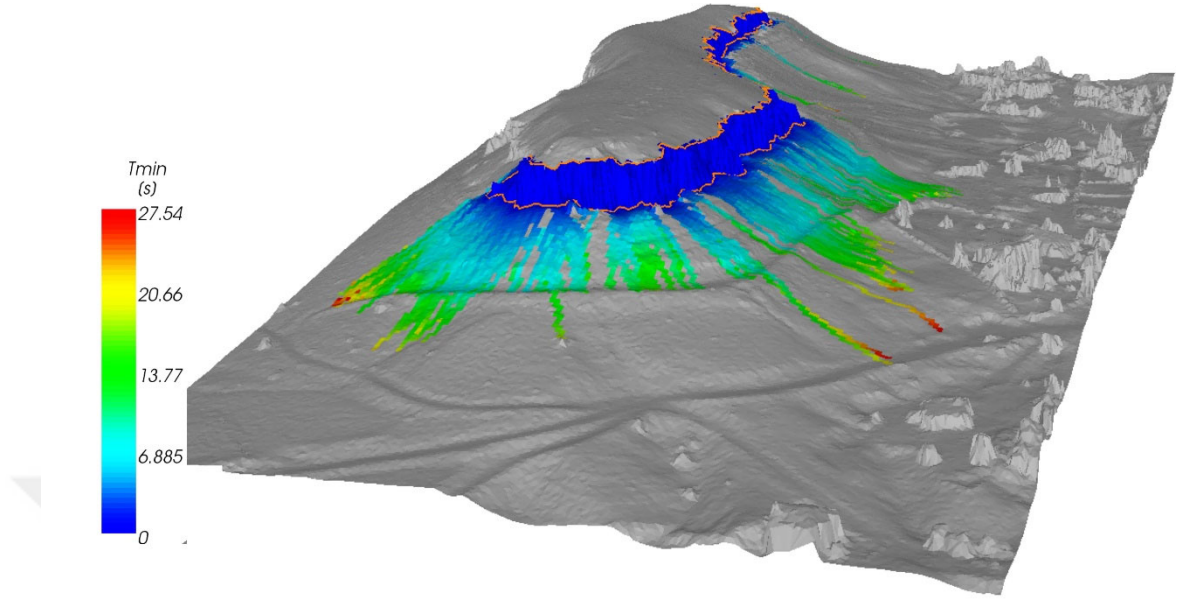




Şekil 4.30. 3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan sıçrama yükseklikleri



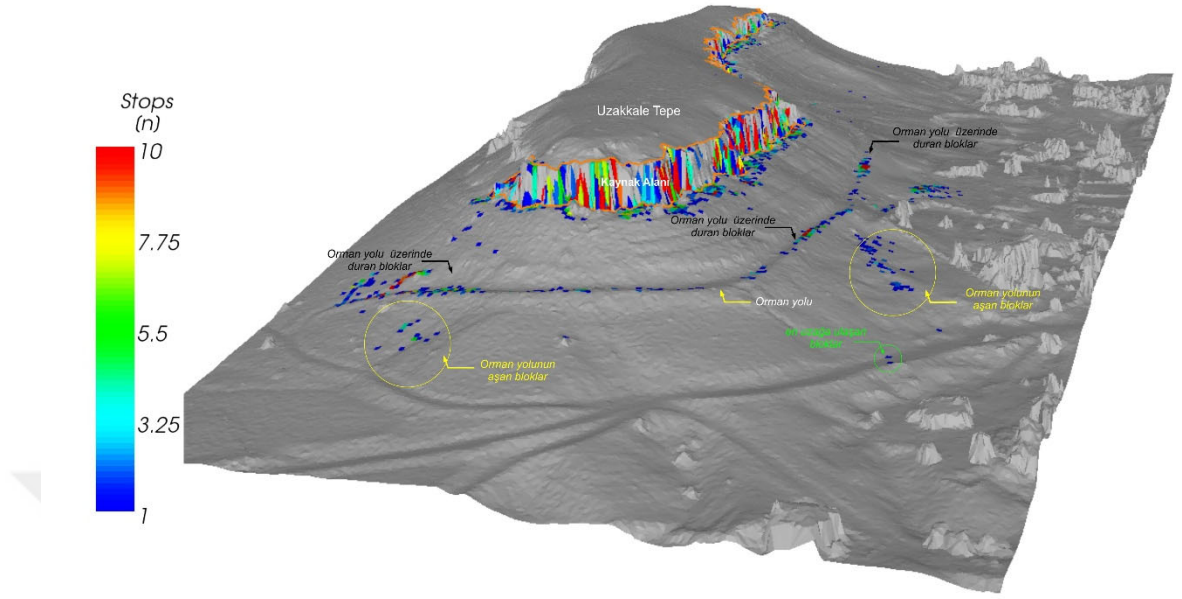
Şekil 4.31. 3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan blokların hareket hızları



Şekil 4.32. 3-B kaya düşme analizi ile hesaplanan blokların hareket süreleri

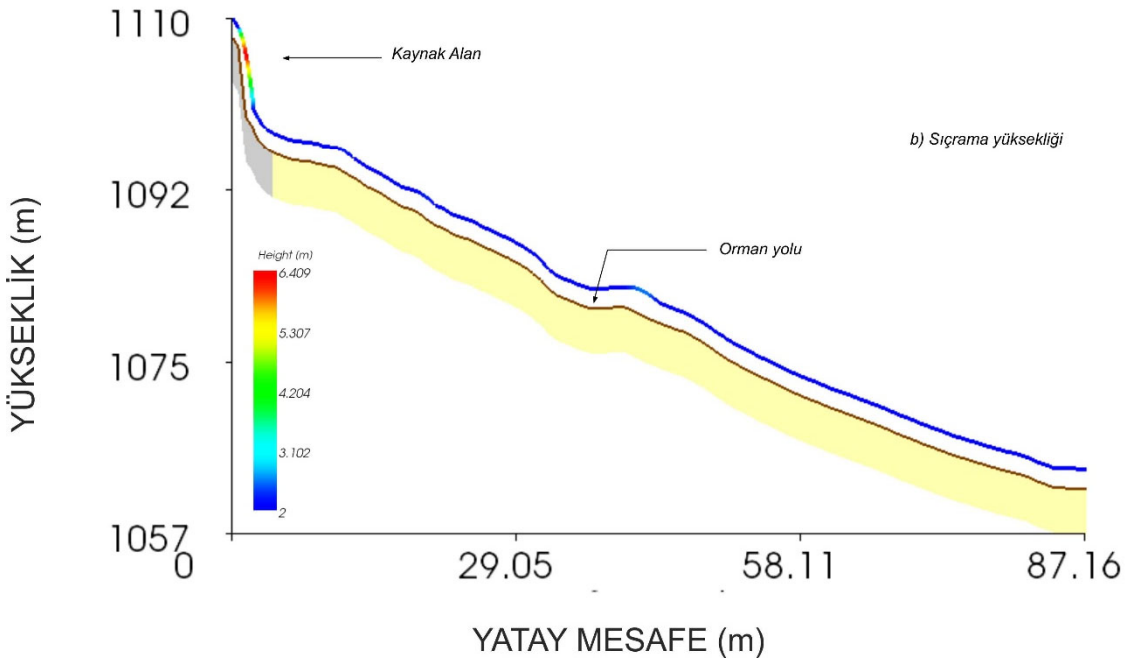
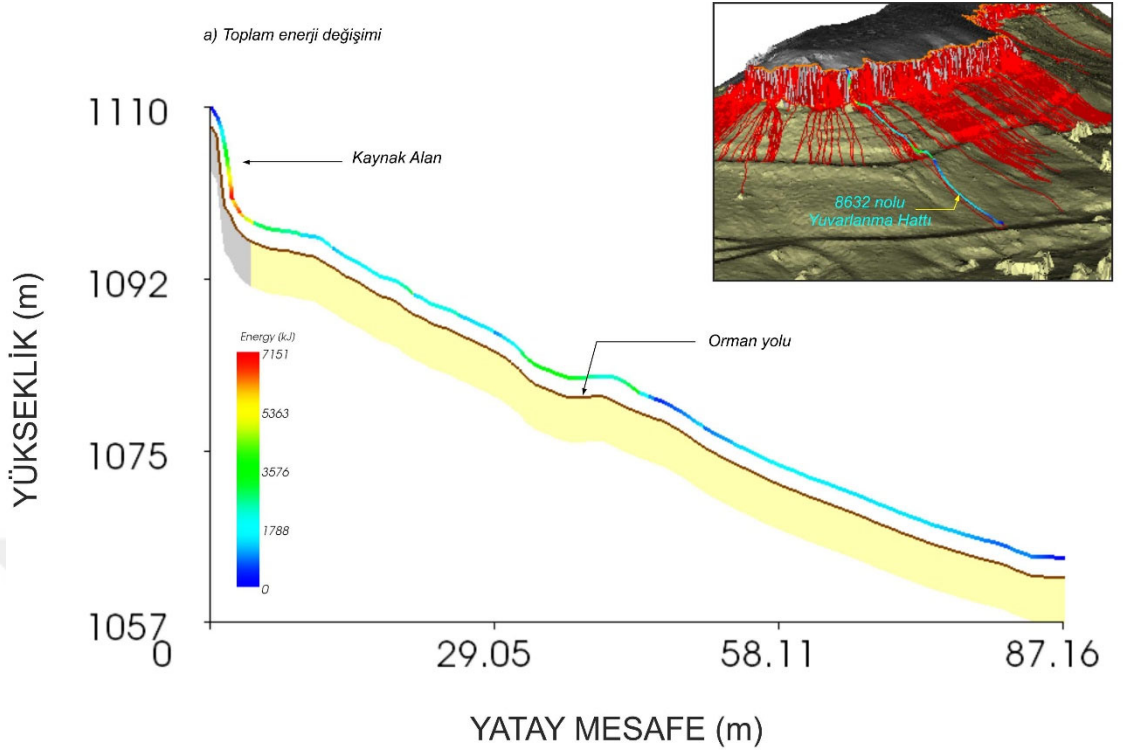
Şekil 4.33’de olasılıksal yöntemle gerçekleştirilen 3-boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda 4 m boyutundaki blokların durma noktalarının yoğunluğu gösterilmektedir. İncelenen yamacın güney kesimlerinde kaynak alandan ayrılan blokların önemli bir bölümünün alt kesimdeki orman yoluna ve daha alt kotlardaki toprak yola kadar ulaşabildiği gözlenmektedir (Şekil 4.33). Kaynak alanın kuzeyine doğru gidildikçe blokların çok uzağa ötelenmedikleri ve kaynak alana oldukça yakın konumlarda durdukları görülmektedir. Bu bölümde kaynak alanın bitiminde topoğrafya ani olarak düzleşmekte ve blokların hareketini sınırlandırmaktadır.

Daha öncede değinildiği üzere ağaçlandırma çalışmaları için açılan yolun, kaya tutma hendeği gibi çalıştığı ve blokların önemli bir bölümünün söz konusu yol boyunca durdukları ve çizgisel bir hat boyunca sıralandıkları Şekil 4.33’de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.33. 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen blokların durma noktaları

RocPro3D 3-boyutlu kaya düşme yazılımının en önemli avantajlarından biri de 3-boyutlu analizler ile belirlenen kaya düşme hatlarının 2-boyutlu kesitler üzerinde incelenmesine olanak sağlamasıdır. Bu kesitler üzerinde, yuvarlanan blokların hareketleri sırasındaki sıçrama yüksekliği, kinetik enerji, yuvarlanma hızı vb. gibi özelliklerindeki değişim mesafeye bağlı olarak değerlendirilebilmektedir. Şekil 4.34'te üst bölümdeki dik yamaçtan 1110 m kotundan koptuktan sonra yamaç eteğine kadar ulaşan 4 m'lik bir bloğa ait yuvarlanma hattı için toplam kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği değerlerinin 2-boyutlu kesit hattı boyunca değişimi sunulmuştur. Söz konusu blok ilk hareket noktasından itibaren 87.16 m uzağa ulaşmıştır. Bloğun 3-boyutlu model üzerindeki hareket rotası yine Şekil 4.34'de sağ üst köşede sunulmuştur. 8632 numaralı yuvarlanma hattında maksimum toplam kinetik enerji 7151 kJ'dur ve dik yamaçtan serbest düşme ile hareketine başlayan bloğun dik yamacın topuk kesiminde topoğrafyaya ilk çarpmasında kinetik enerjisi 3500 kJ'a yaklaşmıştır. İlk çarpmanın ardından sıçrayan blokta kinetik enerji artışı devam etmiş ve bloğun ikinci kez yamaca çarpması ile toplam kinetik enerji 70000 kJ mertebesine ulaşmıştır (Şekil 4.34). Blok sabit kinetik enerji ile yamaç üzerindeki hareketine devam etmiş ve durmaya yakın enerjisi ani şekilde azalmıştır.



Şekil 4.34. 8632 numaralı bloğun toplam kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği değerlerinin yuvarlanma hattı boyunca değişimi

4 m boyutlu bloğun yuvarlanma hattında genel olarak sıçrama yüksekliklerinin fazla olmadığı görülmektedir. Bloğun yamaca ilk çarpmasından sonra sıçrama yüksekliği 5-6 m'ye yaklaştırmıştır, ancak daha sonra düşük eğimli yamaç üzerine geldiğinde bloğun

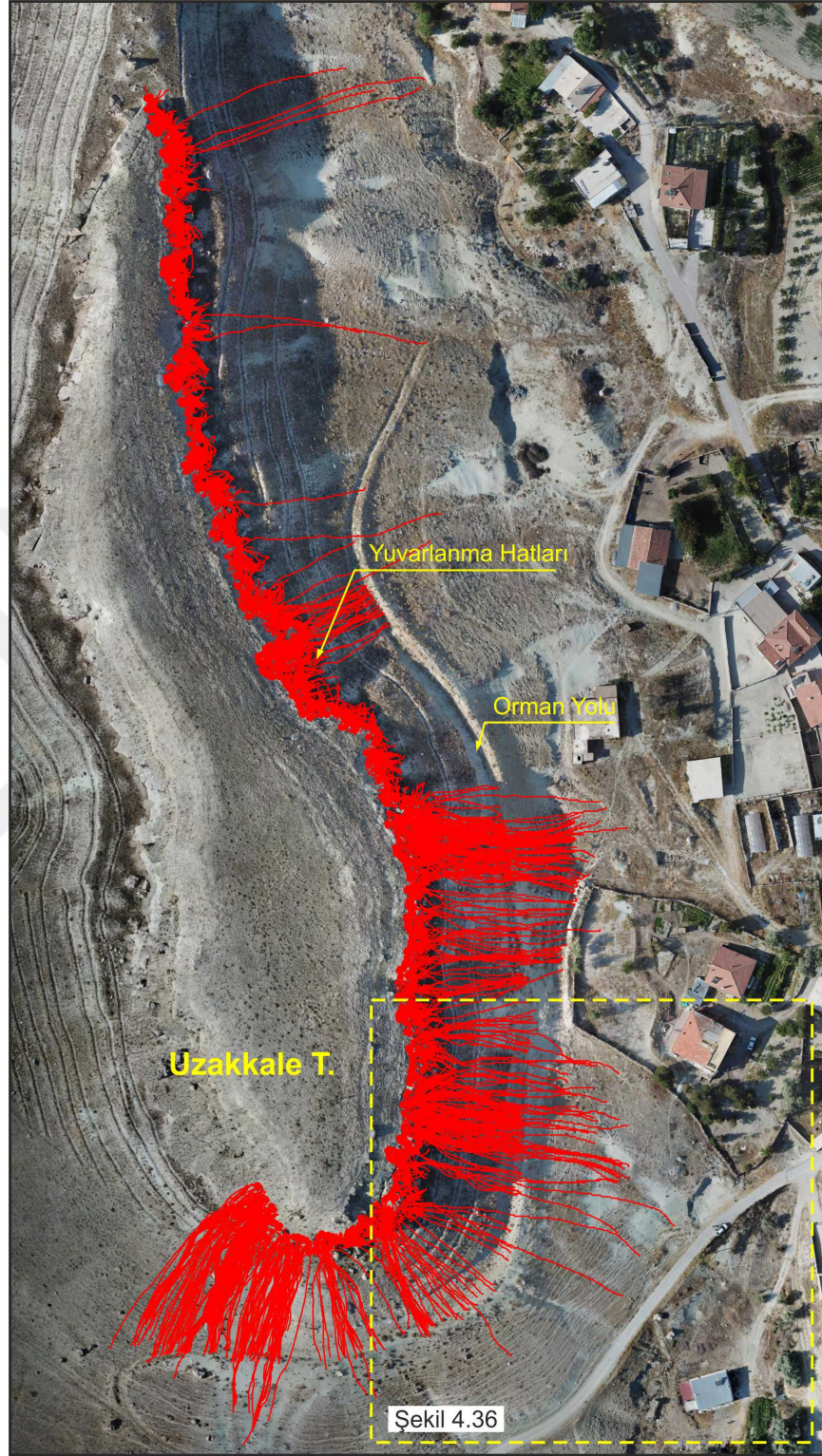
yamaca çok yakın mesafede hareket ettiği görülmektedir. Diğer bir ifade ile iri blok düşük eğimli yamaç üzerinde çoğunlukla yuvarlanmaktadır. Ağaçlandırma amacıyla açılan teraslar ve yol, bloğun hareketi esnasında yer yer küçük sıçramalara neden olabilmektedir (Şekil 4.34).

Şekil 4.35’de 3-boyutlu kaya düşme analizlerinden elde edilen yuvarlanma hatlarının (kırmızı hatlar) gerçek ortofoto mozağı üzerinde gösterilmiştir. Buna göre, yamaçtan yuvarlanabilecek blokların bir kısmı, kaynak alanın doğusunda bulunan konutların yakınına ve güneyinde bulunan yola kadar ulaşmaktadır. Uzaktepe’nin güney bölümünde kaynak alandan sonra yamaç eğiminin hemen devam etmesi, bu bölümde blokların daha uzak mesafelere ulaşmasını sağlamıştır.

Çalışma alanın bu bölümüne ait detaylı yuvarlanma hatları ortofoto üzerinde Şekil 4.36’de sunulmuştur. Şekilden görülmektedir ki, kaynak alanından ayrılan blokların büyük bölümünün yamaçta yapılan ağaçlandırma çalışmaları için açılan orman yolu üzerinde durdukları görülmektedir. Söz konusu yol yaklaşık 7.0 metre genişliğinde olup, çalışma alanın güneyindeki yoldan başlayıp kuzeye doğru açılmıştır. Yol kaynak alana en fazla 28.0 metre yaklaşmış olmakla birlikte, genel olarak kaynak alana bir paralellik sunmaktadır. Şekil 4.35’den görüleceğı üzere yamaca paralel olarak açılmış ağaçlandırma terasları ayrıca dikkati çekmektedir. Dolayısıyla yamaç üzerinde ağaçlandırma çalışmaları sırasında gerçekleştirilen bu kazılar yamaç topoğrafyasını değıştirmiştir. Bu değışim düşen blokların yamaç boyunca hareketini sınırlandırarak, tutma hendeğı gibi görev yaptığı görülmüştür (Şekil 4.36).

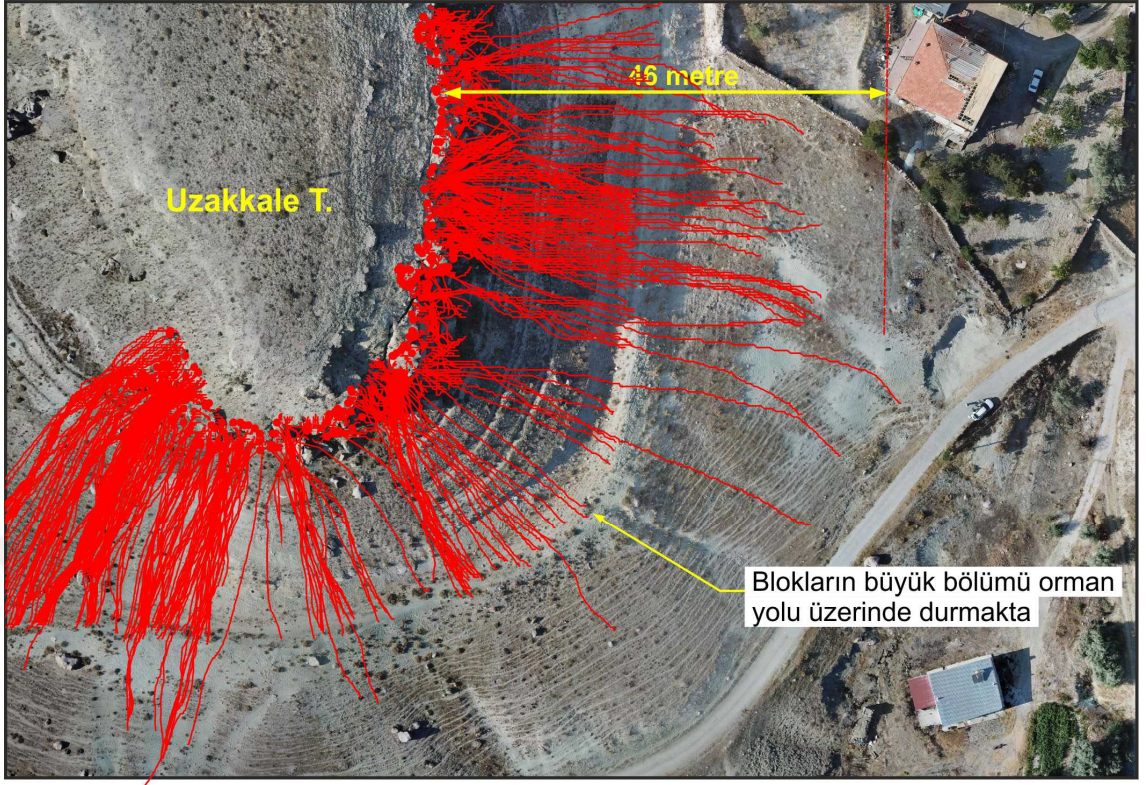
Ayrıca çalışma alanın kuzeyine doğru gidildikçe blokların uzak mesafelere ulaşmadığı kaynak alanının yakın noktalarında durdukları Şekil 4.35’den açık bir şekilde görülmektedir. Bu bölümde kaynak alandan sonra topoğrafya düzleşme ve yamaç eğimi kaynak alana belli bir uzaklıkta tekrar başlamaktadır (Şekil 4.37). Bu morfolojik yapı çalışma alanın kuzey bölümünde blokların hareketi sınırlandırmaktadır. Şekilde görüleceğı üzere çalışma alanının bu bölümün geçmiş dönemlerde doğal taş alımı için kullanıldığı ve bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucu kaynak alanın geriye doğru ötelendiğı düşünülmektedir. Bu faaliyetler sonucu kaynak alanın hemen bitiminde düz bir teras oluşmuş ve düşen blokların bu bölümde biriktiğı görülmektedir.





Şekil 4.35. 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatlarının ortofoto





Şekil 4.36. 3-B kaya düşme analizi ile belirlenen yuvarlanma hatlarının ortofoto üzerinde detay görünümü (Şekil 4.35’de ait olduğu alan gösterilmiştir)



Şekil 4.37. Çalışma alanının kuzeyinde kaynak alan ve topoğrafik düzlük

## 5.BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Avanos İlçesinin Bozca Köyü'nün batısında yer alan Uzakkale Tepe'de kaya düşme riskini ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışma alanının jeolojisi Eosen yaşlı Altıpınar Formasyonu, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Tuzköy formasyonu, Ürgüp formasyonun İncesu ve Topuzdağ Bazaltı, Kızlırmak Çakıltası ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar oluşturmaktadır. Bununla birlikte mühendislik jeolojisi açısından Uzakkale Tepe incelendiğinde volkano-sedimanter bir istifli oluşturan kıltaşı-marn-kumtaşı, İgnimbirit-3, Çakıltası, İgnimbirit-2, İgnimbirit-1 ve Kireçtaşı olarak adlandırılan yeni farklı birim ayırt edilmiştir. Bunlardan gri, beyaz renkli pomza, andezit ve bazaltik kaya parçaları içeren İgnimbirit-2 olarak adlandırılan orta-iyi kaynaşmış seviye kaya düşme kaynak alanı oluşturmaktadır.

Kaynak alanda yer alan ignimbiritlerin ortalama birim hacim ağırlığı 15.62 kN/m<sup>3</sup>, ortalama doymun birim hacim ağırlığı 18.98 kN/m<sup>3</sup> belirlenmiş ve buna göre düşük birim hacim ağırlıklı kaya olarak tanımlanmıştır. İgnimbiritlerin ortalama görünür porozite değeri is 30.55 (%) olarak hesaplanmıştır. İgnimbiritlerin ortalama kuru tek eksenli sıkışma dayanımı ve doymun tek eksenli sıkışma dayanımı sırasıyla 10.53 MPa ve 7.65 MPa olarak belirlenmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı sonuçlarına göre “çok düşük dayanımlı kayaç” olarak tanımlanmıştır.

Çalışma alanında soğuma çatlarının oluşturduğu süreksizlikler genel olarak dolgu içermemekle birlikte, yer yer az kil dolgulu, süreksizlik yüzeylerin küçük ölçekte düz ve büyük ölçekte az dalgalı-düzlemsel olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında bunları kesen ikincil süreksizlik takımları da bulunmaktadır. Süreksizlikle az-orta bozunmuş ve arazi incelemelerinin gerçekleştirildiği dönemde süreksizlikler boyunca herhangi bir su izi gözlenmemiştir. İgnimbiritlerdeki süreksizlikler genelde orta-geniş aralıklı olup, yüksek devamlılık göstermektedirler. Hâkim süreksizlik yönelimleri (eğim yönü/eğim) ise 286/79, 356/65, 167/81, 113/89, 107/64, 056/67 olarak belirlenmiştir. Kaynak alanı oluşturan ignimbirit için GSI puanı 62 olup, buna göre “bloklı” kaya kütlesi özelliklerini yansıtmaktadır. İgnimbirit-2 için eklem yüzey pürüzlülük katsayısı (JRC) 5, süreksizlik yüzey mukavemeti 10 MPa olarak tanımlanmıştır. İgnimbiritlerin süreksizlik düzlemleri

için içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) 35 derece olarak belirlenmiştir. Kinematik şev stabilitesi analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, devrilme ve kama türü duraysızlığın çalışma alanında hâkim yenilme tipi olduğu görülmüştür. Buna karşın düzlemsel yenilmelerin oldukça sınırlı olduğu gözlenmiştir.

Kaynak alanda süreksizlik ve ayrışma kontrollü başlayan duraysızlıklar sonucu oluşan ignimbirit blokları eğimli yamaç boyunca hareket ederek, daha alt kotlarda bulunan konut ve yolları tehdit etmektedir. Kaynak alan yaklaşık 15.0 metre yüksekliğinde dik bir yamaçtan oluşmaktadır. Orta-iyi kaynaşmış karakterdeki ignimbirit seviyesi düşey süreksizlikler ile sütunsal bir yapı kazanmıştır. Dik yamacın topuğunda ve yaklaşık 1.00 metre kalınlığında Çakıltaş ve konglomera seviyesi görece çevresel koşullara daha düşük dirence sahiptir. Söz konusu bu özelliğinden dolayı hızla ayrılarak, topuğun oyulmasına ve üzerinde yer alan ignimbiritlerin düşey süreksizlikler boyunca ayrılarak farklı kaya kütle yenilmelerine neden olabilmektedir. Süreç sonucunda oluşan bloklar topoğrafya bağlı olarak sıçrama ve yuvarlanma hareketleri neticesinde daha alt kotlara ulaşabilmektedir.

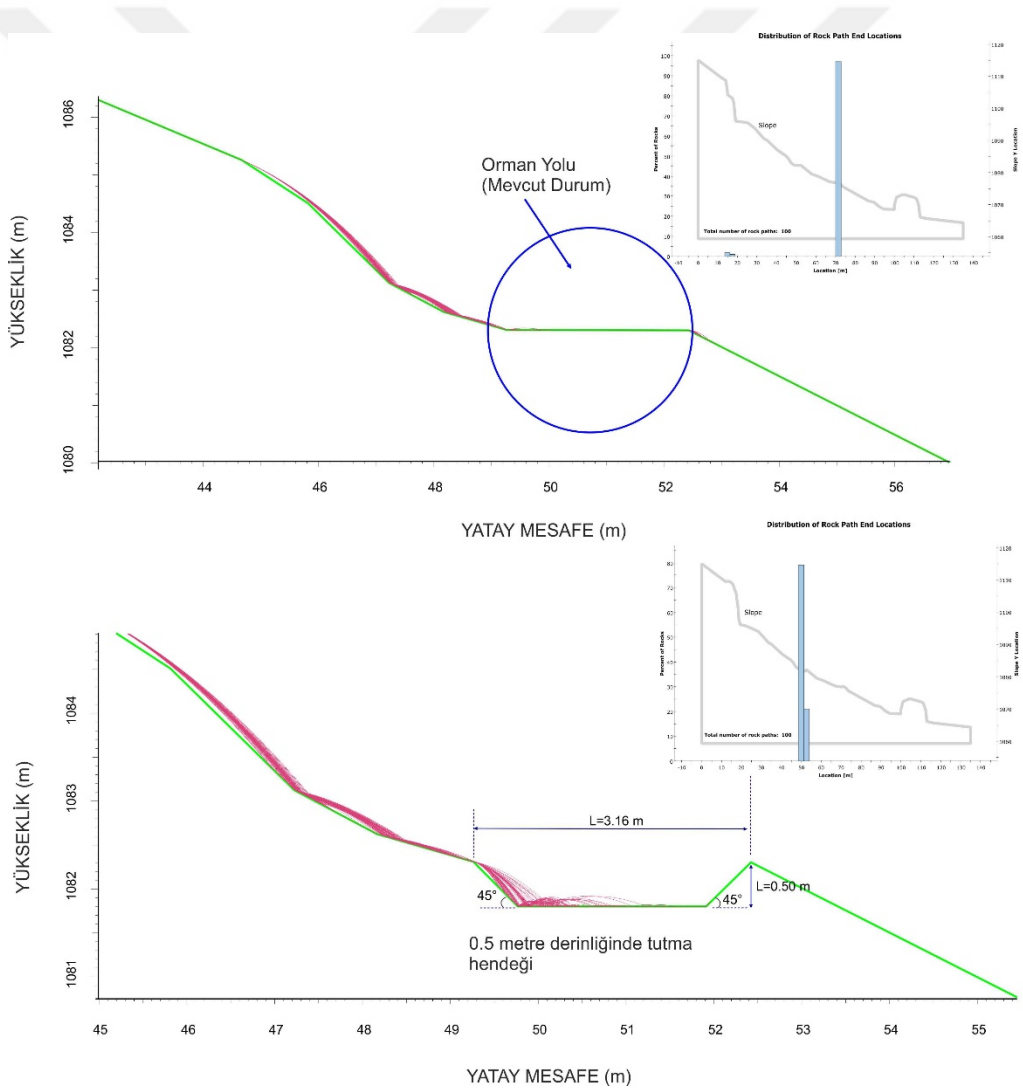
Söz konusu blokların olası hareketini değerlendirmek üzere yapılan 3-boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiş olup, blokların kaynak alandan maksimum 87.0 metre uzağa ulaştıkları görülmüştür. 3-boyutlu kaya düşme analizlerine göre yuvarlanan blokların toplam kinetik enerji değerleri kaynak alanda 10000 kJ civarında iken, ağırlıklı olarak yamaç yüzeyinde 5000 kJ'un altında olduğu görülmüştür. Bloklardaki sıçrama yüksekliğinin yamaç eğiminin azaldığı kesimlerde çok yüksek olmadığı ve blokların çoğunlukla yuvarlanarak hareket ettiği göze çarpmaktadır. Fakat kaynak alanda sıçrama yükseklikleri 5.0 metreye kadar ulaşırken, sedimanter yüzeylerde sıçrama yükseklikleri 2.0 metrenin altına düşmüştür. Blokların maksimum ötelenme hızı 12 m/s ulaşırken, blokların ortalama hızlarının 5-6 m/s civarında gerçekleştiği görülmektedir.

Blokların büyük bölümünün ağaçlandırma çalışmaları için açılan teraslar ve orman yolu üzerinde durdukları görülmüştür. Özellikle ağaçlandırma çalışmaları için açılan yolu geçen blokların hızları 3 m/s kadar düştüğü gözlenmiştir. Ağaçlandırma çalışmaları sırasında açılan 7.0 metre genişliğindeki yol ve yine yamaca paralel olarak açılmış ağaçlandırma kanalları yamaç topoğrafyasını değiştirmiştir. Bu değişim düşen blokların yamaç boyunca hareketini sınırlandırarak, tutma hendeği gibi görev yaptığı görülmüştür.



Ağaçlandırma çalışmaları kapsamında oluşturulan teraslar ve özellikle toprak yol blokların enerjini sönmüleyen bir koruma yapısı gibi etkili olmaktadır. Dolayısıyla mevcut yol boyunca açılacak olan kaya tutma hendeği, kaynak alanın alt kotlarında yer alan tüm konutları koruyacağı düşünülmektedir.

Bu amaçla mevcut yol boyunca 0.5 metre derinliğinde açılan tutma hendeğinin performansı iki boyutlu kaya düşme analizleri ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.38). Şekilden görüldüğü üzere mevcut durumda blokların önemli bölümü yolu geçtikten sonra daha alt kotlarda durmaktadır. Ancak mevcut yol üzerinde oluşturulacak 0.5 metre derinliğindeki hendeğin tüm blokları durdurduğu görülmektedir.



Şekil 5.1.Mevcut yol boyunca açılacak kaya tutma hendeğinin performansı



## KAYNAKLAR

- Agliardi, F., ve Crosta, G, B., “High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40, 455-471, 2003.
- Akın, M., İ. Dinçer, A. Orhan, A. Ok, ve T. Topal, “Evaluation of the Performance of a Rockfall Ditch by 3-Dimensional Rockfall Analyses: Akköy (Ürgüp) Case”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 211-232, 2019.
- Akın, M., İ. Dinçer, ve A. Orhan, “Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz”, *AFAD TC İçişleri Bakanl. Afet Ve Acil Durum Önetimi Başkanl.* 1-147, 2020.
- Akın, M., I. Dinçer, A. Ö. Ok, A. Orhan, M. K. Akin, ve T. Topal, “Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing”, *Eng. Geol.*, 283, 10, 2021.
- Atabey, E., “1/100000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Kayseri-H19 paftası”, *MTA*, Ankara, 1989.
- Aydan, Ö., Tano, H., Watanabe, H., Ulusay, R., ve Tuncay, E., “A rock mechanics evaluation of antique and modern rock structures in Cappadocia Region of Turkey”, içinde *Proceedings of the symposium on the geology of Cappadocia*, 13-23, 2007.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tano, H., ve Yüzer, E., “Studies on Derinkuyu antique underground city and its implications in geo-engineering”, *First Collaborative Symposium of Turk-Japan Civil Engineers*, 75-91, 2008.
- Aydin, A., Köse, N., Akkemik, Ü., ve Yurtseven, H., “Assessment and analysis of rockfall-caused tree injuries in a Turkish fir stand: A case study from Kastamonu-Turkey”, *J. Mt. Sci.*, 9, 137-146, 2012.
- Barton, N., ve Bandis, S., “Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice”, *Rock Joints-Proceeding of a regional conference of the International Society for Rock Mechanics.*, 603-610, 1990.

- Dinçer, İ., A. Orhan, P. Frattini, ve G. B. Crosta, "Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey)", *Nat. Hazards*, 82, 1075-1098, 2016.
- Dinçer, İ., Akin, M., Orhan, A., Duru, C., "Kapadokya Bölgesi'ndeki Kaya Oyma Depoların Tasarım Ölçütlerinin Sayısal Yöntemlerle Değerlendirilmesi" *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 131-156, 2020.
- Dirik, K., Göncüoğlu M. C., "Neotectonic characteristics of central anatolia" *International Geology Review*, 38, 806-817, 2016.
- Doğan, U., Şenkul, Ç., Yeşilyurt, S., "First paleo-fairy chimney findings in the cappadocia region, Turkey: a possible geomorphosite", *Geoheritage*, 1-12, 2018.
- E. ISRM, "Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggested methods", *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*, 3-52, 1981.
- Evans, S., Hungr, O., "The assesment of rockfall hazard at the base of talus slopes", *Can Geotech J*, 30, 620-636, 1993.
- Fanos, A.M., Pradhan, B., "Laser scanning systems and techniques in rockfall source identification and risk assesment: a critical review", *Earth Systems and Environment*, 1-3, 2018.
- G. Lu vd., "Modelling rockfall impact with scarring in compactable soils", *Landslides*, 16, 2353-2367, 2019.
- Gökçe, O., Özden, Ş., ve Demir, A., "Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri" *Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü*, 3-4, 2008.
- Göncüoğlu, C. (1986). Orta anadolu masifinin güney ucunda jeokronolojik yaş bulguları. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 105-106, 26-28.
- Göncüoğlu, C. M., Toprak, V., "Neogene and Quaternary volcanism of Central Anatolia: A volcano-structurel evaluation", *Bull.de la Sect.de Volcanol Soc.Geol.de France*, 26, 1-6, 1992.

- Gürel, A., Kadir, S. “Geology, mineralogy and origin of clay minerals of the pliocene fluvial-lacustrine deposits in the cappadocian volcanic province, central Anatolia, Turkey”, *Clays and Clay Minerals*, 54 (5), 554-570, 2006.
- Hoek, E., Bray, J.W. “Rock Slope Engineering”, *The Institute of Mining and Metallurgy, London*, 4-6, 1977.
- Kaya, Y., ve Topal, T., “Evaluation of rock slope stability for a touristic coastal area near Kusadasi, Aydin (Turkey)”, *Environ. Earth Sci.*, 74(5), 4187-4199, 2015.
- Lepetit, P. “Kohlenstoff-Isotopie Miozäner Calcretes in Kappadokien (Turkei), Dissertation (Dr. ret. nat) ”, *Friedrich-Schiller-Universität*, 123, 2010.
- Leine, R, I., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt,P., ve Gerber, W., “Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape”, *Multibody Syst. Dyn.*, 32, 241-271, 2014.
- Öztürk, M, Z., Utlu, M., ve Şimşek, M., “Kaya düşmesi tehlikesinin belirlenmesi ve önlenmesinde İHA tabanlı 3B modelleme çalışmaları: Murtaza Köyü örneği (Niğde)”, *Yerbilimleri*, 43, 1-2, 2022.
- RocPro3D, “RocPro3D software”. 2014. Erişim adresi: [http://www.rocpro3d.com/rocpro3d\\_en.php](http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php).
- Sari, M., “Evaluating rockfalls at a historical settlement in the Ihlara Valley (Cappadocia, Turkey) using kinematic, numerical, 2D trajectory, and risk rating methods”, *Journal of Mountain Science* 19(12), 6, 2022.
- Taga, H., ve Zorlu, K., “Assessment of rockfall hazard on the steep-high slopes: Ermenek (Karaman, Turkey)”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 1-32, 2016.
- Topal, T., ve Doyuran, V., “Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff”, *Eng. Geol.*, 47(1), 175-187, 1997.
- Topal, T., ve Doyuran, V., “Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey”, *Environ. Geol.*, 34, 5-20, 1998.
- Topal, T., Akın, M., ve Ozden, U, A., “Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey”, *Environ. Geol.*, 53(1), 191-200, 2007.

- Tunusluoglu, M, C., ve Zorlu, K., “Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey)”, *Environ. Geol.*, 56(5), 963-972, 2009.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Topal, T., Sönmez, H., Tuncay, E., Ergüler, Z.A. ve Kaşmer, Ö., “Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey”, *Environmental Geology*, 50, 473-494, 2006.
- Ulusay, R., Aydan, Ö., Geniş, M., “Stability Assessment of Avanos Underground Congress Centre (Cappadocia, Turkey) in Soft Tuffs Through an Integrated Scheme of Rock Engineering Methods”, *Springer-Verlag*, 1319-1320, 2013.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K:A., Gerber, W., Jaboyedoff, “M., Rockfall characterization and structural protection-a review”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2617-2651, 2011.
- Yang W., Zhang Q., Ranjith P. G., Yu R., Luo G., Huang C. ve Wang G., “Adamage mechanical model applied to analysis of mechanical properties of jointed rock masses”, *Tunneling and Underground Space Technology*, 84, 113-128, 2019.
- Zorlu, K., Tunusluoglu, M.C., Gorum, T., Nefeslioglu, H.A., Yalcin, A., Turer, D., Gokceoglu, C., “Landform effect on rockfall and hazard mapping in Cappadocia (Turkey)”, *Environmental Earth Sciences*. 62(8), 1685-1693, 2011.