

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ARKEOLOJİK SİT ALANLARINDAKİ (SİLLE-KONYA) POTANSİYEL KAYA  
DÜŞME ALANLARININ BELİRLENMESİ VE OPTİMUM ISLAH  
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mohammad Manzoor NASERY**

**ŞUBAT-2025**  
**GÜMÜŞHANE**



**T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ARKEOLOJİK SİT ALANLARINDAKİ (SİLLE-KONYA) POTANSİYEL KAYA  
DÜŞME ALANLARININ BELİRLENMESİ VE OPTİMUM ISLAH  
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**IDENTIFICATION OF POTENTIAL ROCKFALL AREAS AND  
DEVELOPMENT OF OPTIMAL REMEDIATION METHODS IN  
ARCHAEOLOGICAL SITES (SİLLE-KONYA)**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mohammad Manzoor NASERY**

**ŞUBAT-2025  
GÜMÜŞHANE**



**T.C.  
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ARKEOLOJİK SİT ALANLARINDAKİ (SİLLE-KONYA) POTANSİYEL KAYA  
DÜŞME ALANLARININ BELİRLENMESİ VE OPTİMUM ISLAH  
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**IDENTIFICATION OF POTENTIAL ROCKFALL AREAS AND  
DEVELOPMENT OF OPTIMAL REMEDIATION METHODS IN  
ARCHAEOLOGICAL SITES (SİLLE-KONYA)**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mohammad Manzoor NASERY**

**Danışman: Prof. Dr. Selçuk ALEMDAĞ**

**ŞUBAT-2025  
GÜMÜŞHANE**

## KABUL VE ONAY

Dr. T. GÜNEK (Bilgi)

Prof. Dr. EMDAĞ (Onay)

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI**

**Yüksek Lisans Tezi** olarak hazırlamış olduğum “**Arkeolojik Sit Alanlarındaki (Sille-Konya) Potansiyel Kaya Düşme Alanlarının Belirlenmesi ve Optimum Islah Yöntemlerinin Geliştirilmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

**24/02/2025**

.....  
**Mohammad Manzoor NASERY**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak yol gösteren ve her zaman destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk ALEMDAĞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının değerlendirilmesi sürecinde, yapıcı eleştirileri ve değerli katkılarıyla çalışmamın bilimsel niteliğini artıran jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK ve Sayın Doç. Dr. Serhat DAĞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte yanımda olan ve yardım ile katkılarını esirgemeyen, Dynamica Mühendislik ekibine ve kıymetli mesai arkadaşlarım Yüksek İnşaat Mühendisi Mohammad Saber SADID, Yüksek İnşaat Mühendisi Mohammad Bilal JALALI, İnşaat Mühendisi Habibullah MOHAMMADI'ye teşekkür ederim. Ayrıca, desteklerini esirgemeyen Selçuklu Belediyesi personeline ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren kıymetli dostlarım Dr. Öğr. Üyesi Muhammed ÇELİK, Doç. Dr. Elif AĞCAKOCA, Doç. Dr. Zeynep YAMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Bayram Ali TEMEL'e şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan babamı ve bugün aramızda bulunmayan rahmetli annemi minnetle anıyorum. Tez çalışmam süresince sabır ve özveriyle yanımda duran, tüm zorlukları benimle paylaşan sevgili eşim Morsal NASERY'e, prenses kızım Yusra NASERY'e, kıymetli oğlum Talha NASERY'e ve tüm aileme gönülden teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, tarihi sit alanlarında gerçekleştirilecek kaya ıslahı araştırma ve projelerine rehberlik etmesini ve atalarımızdan miras kalan tarihi eserlerimizin kalitesiz projelerden korunarak gelecek nesillere aktarılmasına katkı sağlamasını temenni ederim.

**Mohammad Manzoor NASERY**

**GÜMÜŞHANE – 2025**

## ÖZET

Bu çalışmada, 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı'ndaki kaya düşme riskinin belirlenmesi ve minimum müdahale ile maksimum güvenliğin sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, potansiyel kaya düşme bölgeleri detaylı şekilde belirlenmiş, dijital oblik fotogrametri yöntemi ile arazinin 3D hassas modeli oluşturulmuştur. Ardından saha çalışmaları kapsamında jeolojik yapı analizleri, jeomekanik özelliklerin laboratuvar testleri ve sismik ERT ile sismik kırılma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerle kayaç ve zemin dinamik parametreleri ve tabakalanma özellikleri incelenmiştir. Riskli bloklar hacim ve konumlarıyla 3D sayısal modele aktarılmış, risk derecelendirmesi yapılmıştır. Stabilite analizlerinde, blok hareketleri kinematik analiz ve limit denge analizleri ile statik ve sismik koşullarda değerlendirilmiştir. Riskli blokların düşmesi durumunda etkilerini belirlemek amacıyla 2D ve 3D kaya düşme analizleri yapılmış; sıçrama yüksekliği, hız, kinetik enerji ve maksimum ulaşabilecekleri mesafeler tespit edilmiştir. Toplamda 52 kesitte, 5200 adet 2D ve 500 adet 3D kaya düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Risk analizleri sonrasında, bölgedeki tescilli yapıların darbe altındaki davranışlarını incelemek için ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Çay Camii minaresi, Kuran Kursu ve bir yığma konuk evi modellenerek, her birinin üç farklı kaya bloğu darbesi altında hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, yapıların korunma düzeyleri değerlendirilmiş ve ıslah yöntemlerinin etkinliği analiz edilmiştir. Son aşamada, elde edilen risk parametrelerine göre her bölge için alternatif ıslah yöntemleri sayısal olarak analiz edilmiş, koruma ve müdahale yöntemlerinin belirlenmesine yönelik kriterler ortaya konmuştur. Ayrıca, koruma yapılarına ait yeterlilik ve kapasite analizleri yapılarak optimum ıslah yöntemi ve boyutları belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma sit alanlarında kaya düşmesi riskinin belirlenmesi ve uygun müdahale yöntemlerinin seçilmesi konusunda araştırmacı ve tasarımcılara rehber niteliğinde bir kaynak sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Abaqus, Arkeolojik sit alanları, Dijital fotogrametri, Hasar analizleri, Kaya düşmesi, Kaya ıslahı, 2B ve 3B kaya düşmesi analizleri

## SUMMARY

This study aims to identify rockfall risks in the 1st Degree Archaeological Site and ensure maximum safety with minimal intervention. In the initial phase of the study, potential rockfall zones were identified in detail, and a 3D high-precision terrain model was created using the digital oblique photogrammetry method. Subsequently, geological structure analyses, laboratory tests of geomechanical properties, and seismic ERT and seismic refraction measurements were carried out during fieldwork. The obtained data were used to analyze dynamic soil parameters and stratification characteristics. Risky blocks were modeled in a 3D digital environment, with their volumes and precise locations identified and risk levels assessed. Stability analyses were conducted to evaluate block movements under static and seismic conditions using kinematic and limit equilibrium analyses. To predict the impacts of potential rockfalls, 2D and 3D rockfall analyses were performed, determining bounce height, velocity, kinetic energy, and maximum run-out distances. A total of 5,200 2D and 500 probabilistic 3D analyses across 52 cross-sections were conducted. Following the risk analyses, the behavior of registered historical structures under potential rockfall impacts was examined using the ABAQUS finite element software. The Minaret of the Çay Mosque, Quran school, and one masonry structure were modeled and analyzed under impacts from three different rock blocks each. At this stage, the failure modes of these structures were evaluated, and the effectiveness of mitigation methods was analyzed. In the final phase, alternative mitigation methods were numerically analyzed based on the obtained risk parameters, and criteria for selecting intervention and protection methods in archaeological sites were established. Additionally, the adequacy and capacity of protective structures were analyzed to determine the optimal mitigation method and dimensions. In conclusion, this study serves as a reference guide for researchers and designers, providing insights into identifying rockfall risks and selecting appropriate mitigation methods in archaeological sites.

**Keywords:** Abaqus, Archaeological sites, Digital photogrammetry, Damage analyses, Rockfall, Rock remediation, 2D and 3D rockfall analyses

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY .....	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY .....	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XXIV
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Kaya Düşmesi Mekanizması.....	3
1.4. Kırsalda Yaşanan Kaya Düşmesi .....	6
1.5. İl ve İlçe Merkezlerinde (Yoğun İnsan Nüfusunun Bulunduğu Alanlarda) Kaya Düşmesi.....	8
1.6. Mühendislik Yapılarına Kaya Düşmesi .....	9
1.7. Sit Alanlarında Kaya Düşmesi .....	10
1.8. Kaya Islahı Önlem Yapıları .....	16
1.8.1. Kaya Islahı Çalışmalarında Aktif Koruma ve Müdahale Yöntemleri.....	17
1.8.1.1. Kontrollü Kırım ve İstifleme.....	17
1.8.1.2. Çelik Ağlar ile Yüzeyin Kaplanması .....	19
1.8.1.3. Güçlendirilmiş Kombine Ağlar ile Kaya Sabitlenmesi.....	21
1.8.2. Kaya Islahı Çalışmalarında Pasif Koruma ve Müdahale Yöntemleri .....	22
1.8.2.1. Enerji Sönümleyici Bariyer Sistemleri (Esnek Bariyer).....	23
1.8.2.2. Oluk Bariyer (Statik Bariyer).....	25
1.8.2.3. Yüze Dik Sabitlenmeyen Tel Ağ ile Yüzey Örtülmesi .....	26
1.8.2.4. Kaya Tutucu Toprak Bariyerler-İstinat Yapıları.....	27
1.8.3. Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Koruma ve Müdahale Yöntemleri .....	29
2. POTANSİYEL KAYA DÜŞMESİ ALANLARININ BELİRLENMESİ.....	31
2.1. Arazinin 3D Sayısal Modelinin Oluşturulması.....	31
2.1.1. Yer Kontrol Noktalarının Belirlenmesi ve Ölçümleri.....	32
2.1.2. Fotogrametrik Veri Alımı .....	34
2.1.3. Veri İşleme .....	35
2.1.4. Nokta Bulutunun Oluşturulması .....	37

2.1.5. Üç Boyutlu sayısal Yüzey Modelin Oluşturulması.....	38
2.1.6. Sayısal Yükseklik Modelin Oluşturulması .....	39
2.1.7. Halihazır Haritanın Oluşturulması .....	39
2.2. Jeolojik-Geoteknik Çalışmalar.....	40
2.2.1. Genel Jeoloji.....	40
2.2.1.1. Sulutas Volkanik Kompleksi .....	40
2.2.2. Yapısal Jeoloji ve Tektonik.....	43
2.2.3. Doğal Afet Tehlikeleri .....	44
2.2.4. Kaya Malzemelerinin Jeomekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	46
2.2.5. Süreksizliklerin Mühendislik Özellikleri .....	48
2.2.5.1. Süreksizliklerin Yönelimi .....	48
2.2.5.2. Süreksizliklerin Makaslama Dayanımı .....	51
2.3. Jeofizik Çalışmalar.....	56
2.3.1. Çoklu Elektrik Rezestivite Tomografisi Ölçümleri .....	57
2.3.2. Sismik Kırılma Yöntemi ile Yapılan Ölçümler .....	60
2.4. Gözlemsel Yüzey İncelemesi ve Riskli Blokların Tespit Çalışması.....	63
2.4.1. Riskli Blokların Değerlendirme Yöntemi ve Kriterleri .....	67
2.4.1.1. Her An Düşmeye Hazır Bloklar (1. Dereceden Riskli).....	68
2.4.1.2. Düşme Süreci Kestirilemeyen Bloklar (2. Dereceden Riskli) .....	69
2.4.1.3. Bağlantıları Zayıflamış ve Güvenilir Olmayan Bloklar (3. Dereceden Riskli).....	70
2.4.1.4. Düşme Riski Nispeten Düşük Olan Bloklar (4. Dereceden Riskli) .....	70
2.4.1.5. Düşme Riski Çok Az veya Kısmı Olan Bloklar (5. Dereceden Riskli) ....	71
2.4.2. Blokların Şekilleri .....	71
2.5. Duraylılık Analizleri (Şev Stability Analizleri) .....	74
2.5.1. Kinematik Analiz Yöntemi ile Duraylılık Analizlerinin Değerlendirilmesi	74
2.5.2. Limit Denge Analiz Yöntemi ile Duraylılık Analizlerinin Değerlendirilmesi	80
2.5.2. Yamaçların Sayısal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi .....	87
3. KAYA DÜŞME ANALİZLERİ .....	92
3.1. Kaya Düşme Analizlerine Genel Bakış.....	92
3.2. 2D Kaya Düşme Analizleri .....	93
3.2.1. 2D Kaya Düşme Analizlerinde Parametrelerin Tanımlanması .....	94
3.2.2. 2D Kaya Düşme Analizlerin Detayları ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	96
3.3. 3D Kaya Düşme Analizleri .....	100

3.2.1. 3D Kaya Düşme Analizlerinde Parametrelerin Tanımlanması.....	102
3.3.2. 3D Kaya Düşme Analizlerinin Detayları ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	105
4. KAYA DÜŞMESİ SONUCU OLUŞAN HASARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE SAYISAL ANALİZLERİ.....	112
4.1. Tescilli Yapıların Kaya Düşmesine Karşı Hasar Analizi.....	112
4.2. Lineer ve Lineer Olmayan Elastik Malzeme Modeli.....	113
4.2.1. Viskoelastik ve Viskoplastik Malzeme Modeli.....	114
4.2.2. Elastoplastik Malzeme Modeli.....	114
4.2.3. Mekanik Hasar Malzeme Modeli.....	115
4.2.3.1. Malzeme Modellerinin Özellikleri.....	115
4.3. Modellemede Kullanılan Eleman Tipleri.....	117
4.4. Tescilli Yapıların Sonlu Elemanlar ile Geometrik Modellenmesi.....	118
4.5. Doğrulama Çalışması.....	124
4.6. Farklı Kaya Bloklarına Göre Çay Cami Minaresinin Hasar Analizleri.....	126
4.7. Farklı Kaya Bloklarına Göre Konuk Evinin Hasar Analizleri.....	129
4.8. Farklı Kaya Bloklarına Göre Kur'an Kursu Binasının Hasar Analizleri.....	131
4.9. Kaya Düşmesi Sonucu Oluşan Hasarların Yapısal ve Güvenlik Açısından Değerlendirilmesi.....	134
5. OPTİMUM KAYA ISLAHI YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	136
5.1. Andezitik Tüf Birimindeki Çok Riskli Bloklara Kırım Uygulaması.....	137
5.2. Andezitik Tüf Bölgelerin Güçlendirilmiş Kombine Ağ ile Sabitlenmesi.....	140
5.4. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyer.....	141
5.4.1. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Yeterlilik Analizi.....	142
5.4.2. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Kapasite Analizi.....	146
5.4.2.1. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Sonlu Eleman Modeli.....	146
5.4.2.2. (E=3000 kJ) Enerjiye Göre Bariyerin Analiz ve Boyutlandırılması.....	149
5.4.2.3. (E=5000 kJ) Enerjiye Göre Bariyerin Analiz ve Boyutlandırılması.....	151
5.5. Oluk Bariyerlerin Yapılması.....	154
5.5.1. Oluk Bariyerlerin Yeterlilik Analizi.....	155
5.6. Enerji Sönümleyici Bariyerin Boyutlandırılması.....	157
5.6.1. 5000 kJ Kapasiteli Enerji Sönümleyici Bariyerin Yeterlilik Analizi.....	158
5.6.2. 1000 kJ Kapasiteli Enerji Sönümleyici Bariyerin Yeterlilik Analizi.....	161
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165

KAYNAKÇA.....	169
ÖZGEÇMİŞ .....	176



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Ölçülen yer kontrol noktalarının 3 derecelik dilimde GRS80 Elipsoidi üzerinde ITRF96 datumundaki koordinatları. ....	33
Tablo 2. Elde edilen model ile yer kontrol noktaları arasındaki ortalama sapma değerleri. ....	37
Tablo 3. İnceleme alanındaki birimlerin jeomekanik özellikleri. ....	46
Tablo 4. Andezitik tüf kaya kütleindeki bölgelendirmelere ait süreksizlik setleri. ....	51
Tablo 5. Dasitik breş kaya kütleindeki eklem setleri.....	51
Tablo 6. Andezitik tüflere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri (1. ve 2. Bölge). ....	52
Tablo 7. Andezitik tüflere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri (3. ve 4. Bölge).....	53
Tablo 8. Dasitik breşlere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri.....	53
Tablo 9. Sismik-1, Sismik-2 ve Sismik-3 hatlarında yapılan Sismik Kırılma yöntemi ölçümleriyle elde edilen arazi dinamik parametreleri.....	62
Tablo 10. Sismik-4, Sismik-5 ve Sismik-36 hatlarında yapılan Sismik Kırılma yöntemi ölçümleriyle elde edilen arazi dinamik parametreleri.....	62
Tablo 11. Riskli kaya blokları ve özet önlem önerileri. ....	73
Tablo 12. Güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerindeki maksimum sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji vev maksimum hızı değerleri.....	100
Tablo 13. 3D kaya düşme analizinde kullanılan parametreler (Kara, 2020). ....	102
Tablo 14. Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	119
Tablo 15. Sonlu eleman modellerinde kullanılan eleman tipi ve büyüklükleri. ....	121
Tablo 16. Farklı yapılar için kaya düşmesi sonlu elemanlar analiz matrisi. ....	123
Tablo 17. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu Çay Cami minaresinde oluşan hasar dağılımı. ....	128
Tablo 18. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu konuk evinde oluşan hasar dağılımı.....	131
Tablo 19. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu Kur'an Kursu binasında oluşan hasar dağılımı ....	134
Tablo 20. 12 güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri.....	146

Tablo 21. Toprakarme bariyeri için sonlu eleman modellemesinde kullanılan malzeme özellikleri ( Ronco vd., 2009). .....	147
Tablo 22. 6 güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri.....	161
Tablo 23. 12 güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri.....	164



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kaya düşme hareketi ile yüzey eğimi arasındaki ilişki (Ritchie 1963; Fanos ve Pradhan, 2018; Akın vd., 2020).....	5
Şekil 2. Kırsal alanda yaşanan kaya düşmelerine ait görüntüler.....	7
Şekil 3. İlçe merkezinde konuta ve imar alanına düşen kaya blokların görünümüleri .....	8
Şekil 4. Yoğun konutların bulunduğu alana düşen kaya blokların görünümüleri.....	9
Şekil 5. Farklı mühendislik yapılarına düşen kaya bloklarının görünümüleri: (a) istinat duvarı, (b) demir yolu (URL-1) ve (c) demir yolu tünel (GTÜ, 2023) .....	10
Şekil 6. Türkiye'nin önde gelen arkeolojik sit alanlarında meydana gelen kaya düşmelerine ait görünümüleri: (a) Assos Antik Limanı (Nasery vd., 2024), (b) Silifke Kalesi, (c) Niğde Gümüşler Manastırı, (d) Gaziantep Dülük Antik Kenti'ndeki Mithras Tapınağı, (e) Ihlara Vadisi ve (f) Sille Vadisi (URL-3).12	
Şekil 7. Assos Antik Liman kaya ıslahı çalışmalarında tam kontrollü kaya kırım uygulamasına ait görseller (Nasery vd., 2024a) .....	19
Şekil 8. Sümela Manastırı ıslah çalışmalarında sıçrama kontrollü kaya kırım uygulaması (Nasery vd., 2023) .....	19
Şekil 9. Kaya ıslahı çalışmalarında yapılan kırım ve istiflenme görünümüleri .....	19
Şekil 10. Halka ağ sistemiyle yamaç kaplanması (URL-4) .....	21
Şekil 11. Güçlendirilmiş kombine ağ ile kaya sabitlemesi örnek görseli .....	22
Şekil 12. Enerji sönmüleyici çelik bariyer görünümüleri .....	25
Şekil 13. Sahada uygulanmış oluk bariyer görünümü .....	26
Şekil 14. Çelik tel ağ ile örtüleme örneği.....	27
Şekil 15. Kaya tutucu toprakarme bariyer görünümü .....	29
Şekil 16. Yamaçta pasif koruma yapısı olarak çelik tel ağ ve alt kotunda bariyer imalatı (Nasery ve Çelik 2020).....	30
Şekil 17. Birleşik koruma yönetimlerin uygulandığı kaya ıslahı projesi (Nasery vd., 2024).....	30
Şekil 18. Çalışma alanının Google Earth üzerindeki görünümü (URL-5).....	32
Şekil 19. Yer kontrol noktalarının arazi üzerindeki dağılımı.....	32
Şekil 20. Yer kontrol noktalarının arazideki işaretlemeleri .....	33
Şekil 21. CORS (SATLAB SI500) GNSS alıcısı cihazı ve YKN ölçümleri .....	33
Şekil 22. Deneme uçuşu ve fotogrametrik uçuş planı.....	34
Şekil 23. Phantom 4 PRO tipi Dynamica insansız hava aracı kamerası .....	35

Şekil 24. 4 pervaneli Phantom 4 Pro tipi Dynamica insansız hava aracı ile fotogrametrik çekim .....	35
Şekil 25. Çekilen fotoğrafların arazide konumları ve bindirme oranları .....	36
Şekil 26. Modellenen arazinin (a) (b) (c) ve (d) nokta bulut modeli .....	37
Şekil 27. Texture kaplanmış 3 boyutlu arazi modelinin genel perspektif görünüşü .....	38
Şekil 28. 2.89 cm/pix hassasiyetinde oluşturulan ortofoto .....	38
Şekil 29. Arazinin sayısal yükseklik modelleri .....	39
Şekil 30. Çalışma alanına ait hazırlanan sayısallaştırılmış ve halihazır haritalar .....	39
Şekil 31. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeolojik haritası (Keller vd., 1977; Eren 1993; 1996; Özkan, 1998; MTA, 2002 ve Gündüz, 2017) .....	41
Şekil 32. Çalışma alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş dikme kesiti (Gündüz, 2017) .....	42
Şekil 33. İnceleme alanında yayılım gösteren volkanik kayalar (a) andezitik tüf, (b) dasitik breş ve (c) dasitik tüf .....	43
Şekil 34. İnceleme alanındaki düşmüş ve düşme olasılığı yüksek bloklar. ....	43
Şekil 35. Türkiye'nin tektonik birlikleri (Okay ve Tüysüz, 1999) .....	44
Şekil 36. Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen Sille (Konya) bölgesine ait harita (URL-6) .....	45
Şekil 37. Türkiye deprem tehlikesi haritası (URL-6) .....	45
Şekil 38. İnceleme alanından derlenen blok örneklerinin laboratuvarında deney standartlarında hazırlanması ve bazı jeomekanik deneyler .....	47
Şekil 39. İnceleme alanında hat etüdü çalışmaları ve süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi .....	48
Şekil 40. İnceleme alanında Andezitik tüflerin bölgelendirilmesi .....	49
Şekil 41. Andezitik tüf kaya kütlelerinde 1. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı .....	49
Şekil 42. Andezitik tüf kaya kütlelerinde 2. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı .....	50
Şekil 43. Andezitik tüf kaya kütlelerinde 3. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı .....	50
Şekil 44. Andezitik tüf kaya kütlelerinde 4. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı .....	50
Şekil 45. Dasitik breş kaya kütlelerinde eklem setlerinin dağılımı .....	51
Şekil 46. Süreksizliklerin makaslama dayanımı için hazırlanmış örnekler .....	52
Şekil 47. Andezitik tüflerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği .....	53
Şekil 48. Andezitik tüflerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği .....	53
Şekil 49. Dasitik breşlerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği .....	54
Şekil 50. Andezitik tüflerin (1. ve 2. Bölge) normal gerilme-kesme gerilmesi grafikleri .....	55

Şekil 51. Andezitik tüflerin (3. ve 4. Bölge) Normal gerilme-Kesme gerilmesi grafikleri .....	55
Şekil 52. Dasitik breşlerin normal gerilme-kesme gerilmesi grafikleri .....	56
Şekil 53. Çalışma alanında gerçekleştirilen ERT ve sismik kırılma ölçümlerine ait arazi ölçüm hatları .....	57
Şekil 54. ERT-1 ölçüm sonucu kesitinin Ohm.m değerlerine göre kontur diyagramı....	58
Şekil 55. ERT-2 ölçüm sonucu kesitinin Ohm.m değerlerine göre kontur diyagramı....	59
Şekil 56. Soldan sağa doğru Sismik-1, Sismik-2 ve Sismik-3 hatlarında gerçekleştirilen sismik kırılma yöntemi ölçümleri ile elde edilen arazi kesitleri.....	61
Şekil 57. Soldan sağa doğru Sismik-4, Sismik-5 ve Sismik-6 hatlarında gerçekleştirilen sismik kırılma yöntemi ölçümleri ile elde edilen arazi kesitleri.....	63
Şekil 58. Gözlemsel yüzey incelemesi ve riskli blok tespit çalışmalarına ait bazı görünümler. ....	64
Şekil 59. Birbirine bağlı ve birlikte hareket etme riski taşıyan blokların görünümü.....	65
Şekil 60. Düşme riski olan yamaçta serbest duran küçük blokların görüntüsü .....	66
Şekil 61. Mostra veren blokların üzerinde yer alan riskli blokların durumu .....	66
Şekil 62. Bloğun oturduğu yerin eğimi, ana kayaya tutunma düzeyi ve konumu .....	67
Şekil 63. Her an düşmeye hazır iki blok görüntüsü .....	69
Şekil 64. Düşme süreci kestirilemez durumdaki blokların görüntüleri .....	69
Şekil 65. Bağlantıları zayıflamış ve güvenilmez durumdaki bir bloğun görüntüsü.....	70
Şekil 66. Düşme riski nispeten düşük bir bloğun görüntüsü.....	70
Şekil 67. Düşme riski çok az olan kaya blokların görüntüleri .....	71
Şekil 68. Arazide işaretlenmiş olan yassı geometrili blok görüntüsü .....	72
Şekil 69. Gözlemsel inceleme ve riskli blok tespit çalışması için arazinin bölgeleme şeması .....	73
Şekil 70. Andezitik tüf'e ait 1. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık .....	75
Şekil 71. Andezitik tüf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve düzlemsel tip duraysızlık .....	75
Şekil 72. Andezitik tüf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık .....	76
Şekil 73. Andezitik tüf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık .....	76
Şekil 74. Andezitik tüf'e ait 3. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık .....	77

Şekil 75. Andezitik tüf'e ait 3. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık .....	77
Şekil 76. Andezitik tüf'e ait 4. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık .....	78
Şekil 77. Andezitik tüf'e ait 4. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık .....	78
Şekil 78. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve düzlemsel kayma türü duraysızlık .....	79
Şekil 79. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık .....	79
Şekil 80. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık .....	79
Şekil 81. İnceleme alanında dasitik breşlerin gözlemlendiği olası duraysızlık alanlarının görünümü.....	81
Şekil 82. Dasitik breşlerin kaya kütle özellikleri .....	82
Şekil 83. Dasitik breşler için limit denge analizinde kullanılan parametreler .....	82
Şekil 84. Dasitik breşlerin düzlemsel kayma mekanizması .....	83
Şekil 85. Dasitik breşlerin düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde).....	83
Şekil 86. Dasitik breşlerin 3 D düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde) .....	83
Şekil 87. Dasitik tüflerin kaya kütle özellikleri .....	84
Şekil 88. Limit denge analizlerinde kullanılan dayanım ve geometri parametreleri ve analiz edilen kütle.....	85
Şekil 89. Dasitik tüflerin düzlemsel kayma mekanizması .....	86
Şekil 90. Dasitik tüflerin düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde).....	86
Şekil 91. Dasitik tüflerin 3 D düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde) .....	86
Şekil 92. İnceleme alanını karakterize eden kesit hatları .....	87
Şekil 93. Sayısal analizde kullanılan parametreler .....	87
Şekil 94. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait maksimum kesme gerilmesi analizi (7 Nolu Kesit hattı) .....	88
Şekil 95. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait deformasyon analizi (7 Nolu Kesit hattı)....	88
Şekil 96. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait maksimum kesme gerilmesi analizi (Sismik yüklü).....	89
Şekil 97. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait deformasyon analizi (Sismik yüklü).....	89
Şekil 98. 3D model üzerinde yamaçta belirlenen kritik kaya düşme güzergâhları .....	93
Şekil 99. (a) Andezitik tüf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	95

Şekil 100. (a) Dasitik breş yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	95
Şekil 101. (a) Dasitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	95
Şekil 102. Düşebilecek kaya blokları için güzergâh boyunca kaya düşme sırasında oluşabilecek senaryolar .....	98
Şekil 103. Kaya düşme analizleri sonucu elde edilen toplam kinetik enerji değerleri (kJ) .....	99
Şekil 104. Kaya düşme analizleri sonucu elde edilen yatay hız değerleri (kJ) .....	99
Şekil 105. 3D kaya düşme analizi için oluşturulan sayısal modelin bileşenleri .....	101
Şekil 106. (a) Andezitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	104
Şekil 107. (a) Dasitik breş yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	104
Şekil 108. (a) Dasitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri.....	104
Şekil 109. Arazi parametrelerinin tanımlandığı 3D katı ve tekstür kaplanmış modelleri .....	105
Şekil 110. Potansiyel kaya düşmesi kaynak alanların bölgelendirilmesi.....	106
Şekil 111. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri.....	106
Şekil 112. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri .....	106
Şekil 113. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri.....	107
Şekil 114. 2.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri.....	107
Şekil 115. 2. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri .....	107
Şekil 116. 2. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri.....	108
Şekil 117. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri.....	108
Şekil 118. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri .....	108
Şekil 119. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri.....	109

Şekil 120. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri.....	109
Şekil 121. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri .....	109
Şekil 122. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri.....	110
Şekil 123. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri.....	110
Şekil 124. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri	110
Şekil 125. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri .....	111
Şekil 126. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan çarpma sayısı değerleri.....	111
Şekil 127. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan minimum durma süresi değerleri .....	111
Şekil 128. Elastik ve Lineer olmayan elastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....	114
Şekil 129. Viskoelastik ve viskoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri .....	114
Şekil 130. Elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....	115
Şekil 131. Eksenel (a) çekme ve (b) basınç yüklemesinde, betonun idealleştirilmiş gerilme-birim şekildeğiştirme eğrisi (Coşğun, 2014).....	116
Şekil 132. Rijitlik azalımı parametresi (dc)-elastik olmayan şekildeğiştirme eğrisi (Nasery, 2019) .....	117
Şekil 133. Rijitlik azalımı parametresi (dt)-elastik olmayan şekildeğiştirme eğrisi (Nasery, 2019) .....	117
Şekil 134. (a) C3D8R, (b) C3D10M ve (c) R3D4 eleman tipi .....	118
Şekil 135. (a) 5m <sup>3</sup> , (b) 1m <sup>3</sup> ve (c) 0,1m <sup>3</sup> 'lük kaya parçasının temsile edecek blok geometrisi .....	119
Şekil 136. Sonlu eleman 3D modelleri üzerinde gösterilen geometri özellikleri ve ağ sıklığı (mesh) (a) doğrulama çalışması için modellenen ev , (b) Çay Camii minaresi, (c) Kuran kursu ve (d) ise Tescilli konuk evi .....	121
Şekil 137. Yığma yapı modelleme teknikleri (Nasery vd., 2023).....	122
Şekil 138. Sonlu eleman modeli sınır şartları ve kaya çarpma konumları.....	123
Şekil 139. Şubat 2020, Konya Sille'de gerçekleşen 10 ton ağırlığındaki kaya düşmesi (URL-3) .....	124

Şekil 140. Sonlu elemanlar yöntemiyle kaya düşmesi hasar analizi için yapılan doğrulama çalışmasına ait analiz sonuçları .....	125
Şekil 141. Çay Cami minaresinin (5-1-0,1)m <sup>3</sup> 'lük kaya bloklarının düşmesi durumundaki 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri .....	126
Şekil 142. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapılarda oluşan hasar modu .....	127
Şekil 143. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı .....	127
Şekil 144. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı .....	128
Şekil 145. Konut evinin (5-1-0,1)m <sup>3</sup> kaya bloklarının düşmesi durumundaki 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri .....	129
Şekil 146. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu.....	130
Şekil 147. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı .....	130
Şekil 148. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı .....	130
Şekil 149. Kur'an kursunun (5-1-0,1)m <sup>3</sup> kaya bloklarının düşmesi durumundaki 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri .....	132
Şekil 150. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu.....	132
Şekil 151. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı .....	133
Şekil 152. (5-1-0,1) m <sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı .....	133
Şekil 153. Kontrollü kaya kırımı uygulaması kapsamında kırılarak yamaçtan uzaklaştırılacak riskli blokların görünüşleri.....	139
Şekil 154. Andezitik tüf biriminde bulunan kontrollü kırım uygulaması önerilen bölgelerin sınırları .....	139
Şekil 155. Andezitik tüf biriminde güçlendirilmiş kombine ağ uygulaması önerilen bölgeler .....	141
Şekil 156. Kaya tutucu toprakarme bariyerin 3D model üzerindeki şematik görünümü .....	142
Şekil 157. 3D model üzerinde yamaçta belirlenen kritik kaya düşme güzergâhları .....	143

Şekil 158. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizi ile hesaplanan düşme senaryoları .....	144
Şekil 159. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen sıçrama yüksekliği değerleri .....	144
Şekil 160. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen yatay hız değerleri.....	144
Şekil 161. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen toplam kinetik enerji değerleri.....	145
Şekil 162. (a) 11,2m <sup>3</sup> ve (b) ise 7m <sup>3</sup> 'lük kaya parçasını temsile edecek blok geometrisi .....	147
Şekil 163. Toprakarme duvarın tabakalı sonlu eleman modelin enkesit, 3D görüntüsü ve ağsıklığı (Mesh).....	148
Şekil 164. Sonlu eleman modellerine yer çekim ivmesinin tanımlanması (mm/s) ve sınır şartlarının uygulanması .....	148
Şekil 165. Gabion telli sonlu eleman modeli .....	149
Şekil 166. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan yer değiştirme diyagramları (mm) .....	150
Şekil 167. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan yer değiştirme diyagramları (mm) .....	150
Şekil 168. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan gerilme dağılımları (MPa).....	150
Şekil 169. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan gerilme dağılımları (MPa).....	151
Şekil 170. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu mesnette oluşan yük-zaman eğrisi.....	151
Şekil 171. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyer tarafından zamana bağlı-tüketilen kinetik enerji miktarı .....	151
Şekil 172. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan yer değiştirme diyagramları (mm) .....	152

Şekil 173. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan yer değiştirme diyagramları (mm) .....	152
Şekil 174. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan gerilme dağılımları (MPa).....	152
Şekil 175. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan gerilme dağılımları (MPa).....	153
Şekil 176. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu mesnette oluşan yük-zaman eğrisi.....	153
Şekil 177. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyer tarafından zamana bağlı-tüketilen kinetik enerji miktarı .....	153
Şekil 178. Oluk Bariyer yapılacak bölgelerin şematik görünümü .....	155
Şekil 179. Oluk Bariyer örnek görünümü ve tip çizimi .....	155
Şekil 180. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen sıçrama yüksekliği değerleri .....	156
Şekil 181. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen hız değerleri.....	156
Şekil 182. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen toplam kinetik enerji değerleri .....	156
Şekil 183. Enerji sönümleyici çelik bariyerin ve kesitlerin 3D model üzerindeki şematik görünümü.....	157
Şekil 184. Enerji sönümleyici çelik bariyerin ve kritik kesitlerin ortofoto üzerindeki görünümü.....	158
Şekil 185. 5000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizlerine ait düşme rotaları.....	159
Şekil 186. 5000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait sıçrama yüksekliği değerleri.....	160
Şekil 187. 5000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait yatay hız değerleri .....	160
Şekil 188. 5000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait toplam kinetik enerji değerleri .....	160
Şekil 189. 1000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizlerine ait düşme rotaları.....	163

Şekil 190. 5000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait sıçrama yüksekliği değerleri.....	163
Şekil 191. 1000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait yatay hız değerleri .....	164
Şekil 192. 1000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait toplam kinetik enerji değerleri .....	164



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2D	: 2 Boyutlu
3D	: 3 Boyutlu
a	: İvme
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AMB	: Afete maruz bölge
BÖHHBÜY	: Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
C3D10M	: 3 Boyutlu Dört Yüzlü Eleman (On Düğüm Noktalı)
C3D8R	: 3 Boyutlu Sürekli Katı Eleman Tipi (Sekiz Düğüm Noktalı)
CANMET	: Kanada Mineral ve Enerji Teknolojileri Merkezi (Canada Centre for Mineral and Energy Technology)
CDP	: Beton plastikleşme hasar modeli (Concrete Damage Plasticity Model)
CMOS	: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor(Tamamlayıcı Metal-Oksit-Yarıiletken)
CORS	: Sürekli Hizmet Veren Referans İstasyonları (Continuously Operating Reference Stations)
d	: Yoğunluk
dc	: Basınç Hasar Parametresi
DD2	: Deprem Yer Hareketi Düzeyi
DJI	: Da-Jiang Yenilikçilik Bilim ve Teknoloji Şirketi(Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd.)
DSM	: Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model)
dt	: Çekme Hasar Parametresi
E	: Etkilenme sınıfı
E	: Elastisite Modülü
Ek	: Kinetik Enerji
EPSG	: Avrupa Petrol Araştırma Grubu (European Petroleum Survey Group)
ERT	:Çok Kanallı Elektrik Rezistivite Tomografi (Multichannel Electrical Resistivity Tomography)
fb0	: İki Eksenli Gerilme Durumunda Akma Gerilmesi
fc0	: Eksenel Basınç Gerilmesi Altında Akma Gerilmesi
G	: Kayma Modülü
GNSS	: Küresel Konumlama Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System)

GRS	: Jeodezik Referans Sistemi (Geodetic Reference System)
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
H	: Sıçrama yüksekliği
H	: Kalınlık
ITRF	: Uluslararası Yersel Referans Sistemi (International Terrestrial Reference Frame)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
JCS	: Süreksizlik yüzeyinin dayanımı
JRC	: Süreksizlik pürüzlülük katsayısı
k	: Sürtünme Katsayısı
K	: Bulk Modülü
Kc	: Akma Yüzeyinin Çeklini Belirleyen Parametre (CDP)
kg	: Kilogram
kJ	: Kilo Joule
km	: Kilometre
kN	: Kilo Newton
m	: Metre
M	: Kütle
m <sup>2</sup>	: Metrekare
mm	: Milimetre
N	: Normal kuvvet
PRO	: Profesyonel
R	: Bozunmuş yüzeyin Schmidt geri sıçrama sertlik değeri
R	: Taze yüzeyin Schmidt geri sıçrama sertlik değeri
R3D4	: 3 Boyutlu Rijit Yüzey Elemanı (Dört Düğüm Noktalı)
Rn	: Normal geri verme katsayısı
Rt	: Teğetsel geri verme katsayısı
S4R	: 4 Düğümlü Kabuk Elemanı
SAM	: Sayısal arazi modeli
sn	: Saniye
SVK	: Sulutaş Volkanik Kompleksi
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
T	: Düşey kuvvet
TUSAGA	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu

$v$	: Hız
v.d.	: Ve diğlerleri
vb.	: Ve benzeri
$V_p$	: Sıkışma dalga Hızı
$V_s$	: Kayma dalga Hızı
YKN	: Yer Kontrol Noktalarının
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$e$	: Dışmerkezlik
$\phi$	: İçsel sürtünme açısı
$\phi_b$	: Süreksizliklerin temel sürtünme açısı
Rad	: Radyan
$X^\circ$	: Açısal derece
$\alpha$	: Kritik eğim açısı değeri
$\gamma$	: Birim hacim ağırlığı
$\theta$	: Dönme Açısı
$\nu$	: Poisson Oranı
$\Psi$	: Dilatasyon açısı
$\phi_r$	: Rezidüel sürtünme açısıdır
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_n$	: Süreksizlik düzlemine etki eden normal gerilme
$\tau$	: Makaslama gerilmesi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Türkiye’de ve dünyada gelişen, kolaylaşan ve maliyetleri düşen ulaşım imkanları nedeniyle turizme katılan insan sayısı her geçen gün artmaktadır. 1950’li yıllarda yıllık 25 milyon insanın turizm amaçlı yolculuk yaptığı dünyada bugün 1,5 milyarın üzerinde insan turizm nedeniyle seyahat etmektedir (Kaygısız, 2019). Turizm amaçlı hareketin önemli bir payını tarihi/arkeolojik alanların ziyareti oluşturmaktadır. Öte yandan yapıldıkları dönemin asgari şartlarını sağlayan ve nispeten düşük nüfus oranlarına hizmet için inşa edilen tarihi yapılar günümüze gelene kadar birçok dış etkiden etkilenmiştir. Tarihi yapıların yüzyıllarca maruz kaldığı yükler, kullanılan malzemelerde oluşan deformasyonlar ve çevresinde gelişen dünyanın oluşturduğu çeşitli olumsuz durumlar bu yapılarda yıkılma, göçme, kayma, çökme gibi riskleri gündeme getirmektedir. Günümüzde turizm nedeniyle yoğun insan hareketine ev sahipliği yapan bu alanlarda oluşabilecek afetler, insan hayatı için büyük riskler oluşturmaktadır. Bu noktada insanlığın ortak mirası olan bu yapıların yıkılmadan ayakta tutulması ve insanların bu yapıları güvenle ziyaret edebilmeleri için risklerin önceden tespiti ve müdahalesi oldukça büyük önem arz etmektedir.

Tarihi yapıların bulunduğu alanlarda deprem, heyelan, kaya düşmesi, yangın ve sel gibi farklı afet türlerine rastlanılmaktadır. Kaya düşmesi afeti de tarihi turistik alanlarda oldukça sık rastlanan afet türlerinden birini oluşturmaktadır. Örneğin Türkiye’de Sümela Manastırı, Gümüşler Manastırı, Assos Antik Limanı, Mardin, Gaziantep, Kastamonu ve Siverek Kaleleri, Sille ve Ihlara Vadileri gibi tarihi yapıların bulunduğu alanlarda kaya düşmesi riski tespit edilmiştir. Eski insanların barınma, güvenlik, depo vb. amaçlarla kayalık alanları tercih etmiş ve buralarda yapılar inşa etmiş olmaları bu alanlarda günümüzde hem tarihi yapıların varlığına hem de kaya düşmesi afeti riskinin oluşmasına neden olmuştur. İnsanlığın ortak mirası olan bu yapıları gelecek nesillere aktarabilme ve ekonomiye katkı sağlayacak turizm faaliyetlerini yürütebilmek için bu alanların tamamında kaya ıslahı çalışmaları yürütülmüştür. Ancak alanların özel statüsü gereği çalışmalarda oldukça büyük zorluklarla karşılaşmıştır. Örneğin alanların 1.derece arkeolojik sit alanı olması nedeniyle kaya ıslahı çalışmalarında kullanılan bazı uygulamalar tarihi alanlarda kullanılamamıştır. Kaya ıslahı projelendirme çalışmaları genellikle jeoloji, inşaat, jeofizik ve harita mühendislerinin ortak çalışması ile

oluşturulan disiplinler arası çalışmalardır. Ancak tarihi alanlarda yapılan bu çalışmaların karar mekanizmalarına tarihçiler, sanat tarihçileri, arkeologlar, şehir bölge planlama ekipleri ve turizm sektöründen insanlar da katılmaktadır. Bu da çalışmaları daha kompleks hale getirmektedir. Bu noktada en iyi çözüm önerisi ise arkeolojik kalıntılara zarar vermeyecek şekilde yürütülecek olan kaya ıslahı projelerinin birkaç alternatif ile hazırlanması, çeşitli meslek gruplarından oluşan tarih veya koruma kurulu gibi kurullara sunulmasıdır. Kurullara sunulacak projelerde afet nedeniyle oluşabilecek tüm risk senaryolarının belirlenmesi, değerlendirilmesi ve en uygun kaya ıslahı yöntemi/yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Akabinde proje müellifleri ile kurul üyelerinin proje detaylarını tartışması ve gerekli gördükleri yerlerde müdahaleler yaparak projenin hassasiyetinin artırılması da gerekmektedir. Böylelikle tarihi yapıların korunması, tarihi dokunun bozulmaması ve gelecekte gün yüzüne çıkabilecek arkeolojik kalıntıların gözetilerek riskin bertarafı sağlanabilir.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu çalışma kapsamında tarihi ve turistik bir alan olan Sille Vadisinde arkeolojik kalıntılara zarar verilmeden alternatif kaya ıslahı projeleri hazırlanması amaçlanmıştır. Böylelikle benzer şekilde tarihi bir alanda kaya ıslahı projelendirme çalışmalarında nelere dikkat edilmesi gerektiği ve nasıl çalışılacağı hakkında literatüre detaylı bir bilgi kazandırılacaktır. Hazırlanacak alternatif projelerde şu hususlara dikkat edilmesi hedeflenmiştir;

- Sille Vadisinin kendisine özgü doğal dokusunun bozulmamasına
- Tarihi kalıntılara zarar verebilecek detayların gerek projeye gerekse imalatlara koyulmamasına
- Düşme riski bulunan kayaların tümünde riskin bertaraf edilmiş olmasına
- Kaya düşme riskinin yoğun bulunduğu tarihi kaya oyma alanlarının bozulmamasına
- Turizm açısından en yüksek verimin alınabileceği şekilde alanın değerlendirilmesine.

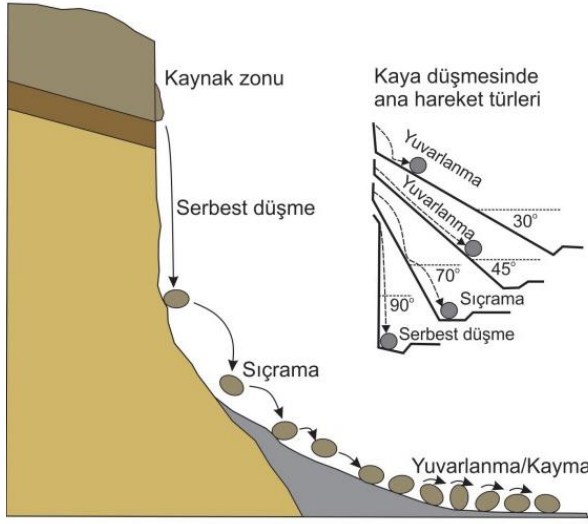
Bu hedefler kapsamında alternatif projeler için çalışmalar yürütülmüş ve aşamaları bu tez kapsamında detaylıca değerlendirilmiştir. Kaya düşmesine karşı alınan önlem yapılarında çok sık kullanılan, süreksizlik derinliğinde kazı, ankraj gibi zemin altı çalışmaların yapılmamasına karar verilmiştir. Ayrıca projelendirme çalışmalarında kullanılan sondaj yöntemi yerine jeofizik yöntemler kullanılmış, sondajlar ise tarihi alanın dışındaki en yakın alanlarda yapılarak jeofizik yöntemlerin verilerini

doğrulmaları sağlanmıştır. Hazırlanan alternatif projelerde özellikle kaya ıslahı yapılarının elemanlarında bölgenin doğal tonlarında kaplamalar kullanılmasına da ayrıca dikkat edilmiştir. Çalışma genel olarak hassas haritalandırma çalışması, yakın inceleme, potansiyel risk bölgelerinin belirlenmesi, jeolojik ve jeofizik inceleme, önlem yapıları için analizlerin yapılması, alternatif projelendirme çalışmalarının hazırlanması ve kurul ile fikir alışverişinin yapılması şeklinde yürütülmüştür.

### **1.3. Kaya Düşmesi Mekanizması**

Yerküre, iç ve dış kuvvetler altında sürekli değişim halindedir. Bu değişimin neticesinde su ve kaya döngüsü gibi çeşitli döngüler oluşmaktadır. Kaya döngüsü, oluşum nedeniyle farklı türdeki kayaların iç ve dış kuvvetler, basınç ve sıcaklık gibi etkilerle birbiri arasındaki dönüşümüdür. Yerküre üzerinde bulunan bazı kayalar bu döngü kapsamında çeşitli nedenlerden dolayı süreksizliklere sahip olmaktadır (Ünsal 2001). Süreksizlik artarak derin çatlak veya kırıklara dönüştüğünde kayalar yarı serbest veya serbest pozisyona dolayısıyla riskli duruma geçmektedir. Bu risk özellikle eğimli arazilerde daha çok artmaktadır. Kayalar buldukları şevin eğimi, hareketi başlatan ilk kuvvet gibi etkenlere de sahip olduğunda düşme yönünde harekete geçmektedir. Kaya düşmesi denilen bu hareketin literatürde bulunan kaynaklarda tanımı; Yüksek eğimli arazilerde, üst kotlarda (kaynak alanlarda) bulunan eklemli kaya bloklarının stabilitelerini kaybederek eğim aşağıya doğru hız ve enerji kazanarak harekete geçtiği bir yamaç duraysızlığı olarak verilmiştir (Varnes 1958; Hutchinson 1988; Akın vd., 2020). Tanımlardan anlaşılacağı gibi kaya bloklarını harekete geçebilmesi için birçok faktör etkili olmakla beraber 3 önemli faktör öne çıkmaktadır. Birinci faktör kaynak kayalıklarda oluşacak süreksizliklerdir. Jeolojik zaman dilimleri içerisinde uzun vadede oluşabilen süreksizlikler, sismik hareket gibi aniden gelişen durumlarda da oluşabilir. Bu yüzden kaya düşmesi riski için incelenen kaynak kayalıkların etkileyebilecek kuvvetlerin de irdelenmesi, tespit edilen süreksizliklerin tabiri caizse yaşayan bir yapı olduğu ve gelişmeye devam ettiğini unutmamak gerekir. Başka bir ifadeyle, süreksizlikler milyonlarca yılda da oluşabilecekleri gibi birkaç sene hatta saniye içerisinde oluşabileceği bilinmelidir. İkinci faktör eğimli yüzeydir. Bu faktör kendi içinde de ikiye ayrılmaktadır. Birincisi kayanın bulunduğu yüzeyin eğimidir. Eğim kayanın yer çekimi kuvveti etkisiyle harekete geçebilmesi için bileşke kuvveti etkilemekte, şev eğimi arttıkça kütlelerin kosinüs bileşeni olan eğim yönüne paralel bileşenin değeri de artmaktadır. Bu durumun genel bir anlatımını 1963 yılında Ritchie düzenlemiş ve eğim arttıkça düşen kayanın hareketi ile ilgili bilgi vermiştir (Şekil 1). Buna göre hareketin başlama ihtimalinin artması için şevin

30° seviyesinde olması gerektiği, 30°-45° açığa sahip şevlerde kayaların yuvarlanma hareketi yapacağı, 45°-60° aralığında kayanın zıplayarak yuvarlanacağı, 60°-90° aralığında ise kayanın serbest düşme hareketi yapacağını ifade etmiştir (Ritchie, 1963). Eğimli yüzey etkisinin ikinci detayı ise sürtünme kuvvetidir. Kütlelerin yüzeye dik yöndeki bileşeninin yüzey ile kaya arasındaki sürtünme kuvveti de kayanın düşme ihtimalini artırabilir veya azaltabilir. Bu noktada şevlerin morfolojisi yani hangi malzemeden oluştuğu nasıl bir geometriye sahip olduğu veya ne ile kaplı olduğu önemli bir detaydır (Crosta ve Agliardi, 2004). Son önemli faktör olarak ise kayaların harekete geçiren ilk kuvvetten bahsetmek gerekmektedir. Arazi incelemelerinde kayaların hareket geçmesinde birçok etken tespit edilmiştir. Harekete geçiren kuvvetlerden bazıları şunlardır; kaya bloklarının altındaki malzemenin yağmur, çığ, yüzey akması gibi nedenlerden dolayı boşalarak kayaların ağırlıklarının oluşturduğu yatay bileşen etkisi ile harekete geçmesi, donma çözülme sırasında oluşan kuvvetler, bitki köklerinin kaya süreksizliklerinde büyürken oluşturdukları itme kuvveti veya yüksek ağaçların köklerine ve gövdesine yakın bulunan kayaların gövdeyi etki eden rüzgar nedeniyle mancınık gibi kayaları harekete geçirmesi, hayvanların doğal yaşam alanlarındaki hareketleri, yıldırım düşmesi, madencilik veya yapı imalatı faaliyetleri sırasında patlatılan dinamitlerin titreşimleri gibi onlarca neden sayılabilir (Admassu vd., 2012; Yılmaz vd., 2008). Son olarak Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi sonrasında kayaların sismik aktivite nedeniyle harekete geçtiğinin 5000'den fazla örneği tespit edilmiştir (Görüm vd., 2023). Literatürde, yüksek kotlarda yağış miktarının fazla olduğu, donma-çözülme çevrimlerinin ve sismik hareketliğin yoğun olduğu bölgelerde kaya düşmelerinin daha sık gözlemlendiği belirtilmiştir (Wyllie, 2015). Sonuç olarak süreksizlik seviyesi artmış kaya bloklarının fiziksel ve kimyasal etkiler nedeniyle eğimli arazilerde her zaman risk oluşturabileceği, düşme hareketine geçerek altındaki alanlarda tehlike yaratabileceği düşünülmelidir. Ayrıca kaya düşmeleri tam olarak tespit edilmesi zor olan duraysızlık türü olması nedeniyle, yıllarca kaynak kayalıkta olağan stabilitesi ile duran kaya bloklarının etmenler oluştuğunda aniden harekete geçeceği yani afetin kendisinin ne zaman oluşacağı bilinmeyen, anlık oluşan bir afet olduğu unutulmamalıdır (Wyllie ve Mah, 2002; Akın vd., 2020).



Şekil 1. Kaya düşme hareketi ile yüzey eğimi arasındaki ilişki (Ritchie 1963; Fanos ve Pradhan, 2018; Akın vd., 2020)

Kaya düşmesi hareketi yaşandığı yerler genellikle engebeli araziler veya madencilik çalışmaları, yapı (karayolu, baraj vb.) imatları gibi nedenlerle doğal yamacın bozularak şev haline getirildiği bölgelerdir (Volkwein vd., 2011). Bu noktada kaya düşmesinin ardından etkilenme hadisesi önem arz etmektedir. Buna göre insanı doğrudan veya dolaylı olarak etkilediğinde afet kapsamında değerlendirilmektedir. Doğrudan etkileme insanların yaşadığı alanlarda kaya düşmesi afeti yaşanması durumu kastetmektedir. Bu durumda düşen kayalar insanları yaralama, can ve mal kaybı yaşanma riskini oluşturmaktadır. Dolaylı olarak etkileme ise, baraj, karayolu, altyapı elemanları gibi yapılara düşmesi durumunda hasara neden olması veya koruma alanlarına, tarihi yapılara düşerek gelecek nesillere aktarılması gereken ortak mirasın veya yetiştirilmesi zor türde ağaçlar gibi canlıların yok olmasına neden olduğu durumları kastetmektedir. Nihayetinde kaya düşme olayının insan hayatı üzerinde etkisi olduğunda kaya düşmesi afeti olarak tanımlanmaktadır. Kaya düşme afetinin yaşanma riski bulunan yerlerde, arazinin detaylıca incelenerek riskin boyutunun tespiti, kayaların düşerken yaratabilecekleri zararın belirlenmesi ve riskin bertarafı için yapılacak çalışmaların mümkünse alternatiflerle belirlenmesi gerekmektedir. Düşme riski bulunan kayaların tehlike yaratmayacak şekilde bertaraf edilmesi işlemine kaya ıslahı denilmektedir. Kaya ıslahı çalışmalarında birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; enerji sönmeyici bariyerler, dayanma yapıları, hendekler, tepeler, çelik ağlar ile kaplama, kontrollü düşürmeler olarak sıralanabilir. Yöntemlerin temel amacı kaya bloklarının düşmeleri engellenmekte veya kontrollü düşürülerek tehlike yaratmasının önüne geçilmesidir (Turner ve Schuster 2012, Nasery vd., 2024). Kaya ıslahı yöntemleri arasında seçim yapılırken emniyet ve ekonomi kriterleri değerlendirilerek en uygun

yöntem belirlenir (Agliardi vd. 2009). Emniyetli ve ekonomik bir çözüme ulaşılabilmesi için kaya ıslahı yapımına geçmeden önce detaylı bir risk analizi yapılmalıdır. Riskin detaylı belirlenmesi için farklı mühendislik dalları ve farklı mesleklerden insanlar beraber çalışır. Bu nedenle kaya ıslahı çalışmaları disiplinler arası çalışmalardır (Castelli ve Scavia 2008; Nasery ve Çelik, 2020). Risk analizlerinin hemen akabinde maliyet hesapları da önem arz eder. Bu noktada kayaların düştükleri güzergahta yaratacakları zararı karşılamak için harcanacak maliyetlerden yola çıkarak fayda maliyet oranının tespiti ve bu orana göre çözüm önerilerinin geliştirilmesi gerekir. Örneğin birkaç konuttan oluşan bir yerleşim biriminde tonlarca riskli kayayı ıslah etmenin maliyeti yerine bu birkaç konutu bulunduğu alanla beraber kamulaştırarak veya vatandaşların nakledilmesi tercih edilmektedir. Böylelikle afet riski olan bölge boşaltılarak daha az maliyetle kaya düşse bile risk oluşturmayacak alanlar yaratmak daha faydalı olabilir. Başka bir örnekte ise çevresinde başka bir yapı olmayan Trabzon İli Maçka İlçesinde bulunan insanlığın ortak mirası Sümela Manastırı'nı koruyabilmek için milyonlarca lira harcanması gerekmiş ve harcanmıştır (Nasery vd., 2023). Bu iki örnekte de görüldüğü gibi, kaya düşmelerine karşı alınacak önlemlerde afetin meydana geldiği yer oldukça önemlidir. Çalışmanın bir sonraki kısmında kaya düşme afeti yaşandığı yerlere göre ayrı başlıklar altında irdelenmiştir.

#### **1.4. Kırsalda Yaşanan Kaya Düşmesi**

Kırsal kelime manası olarak, kilometrekareye düşen insan nüfusunun az olduğu, daha ziyade tarım, mera veya dağlık arazilerden oluşan bölgelere verilen isimdir. Yukarıda verilen tanımlarda görülebileceği gibi kaya düşmesi engebeli arazilerde oldukça sık rastlanan bir doğa olayıdır (Baillifard vd., 2004; Nasery ve Çelik 2020). Bu noktada arazinin engebeli olması insan nüfusunun da az olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kırsalda kaya düşmesi oldukça sık rastlanmaktadır. Kaya düşmesi olayı kırsal bölgelerde insan hayatını doğrudan veya dolaylı etkilemediği alanlarda oluşması durumunda genellikle müdahaleler yapılmamaktadır (Şekil 2). Öte yandan, insan hayatının doğrudan veya dolaylı olarak etkilendiği durumlarda kaya düşmesi bir afet türüne dönüşmekte ve bu durumda kaya ıslahı çalışmalarının yapılması, en azından bir fayda-maliyet analizinin gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır. Fayda maliyet analizlerinde kırsalda yapılan ekonomik faaliyetler (Arıcılık, tarım, ormancılık faaliyetleri gibi), yaşayan insanların konut, ahır müstemilat gibi vatandaşlara ait yapıların maliyetleri, cami, okul, sağlık ocağı, karayolu gibi devlet yatırımlarının kaya düşmesi nedeniyle zarar alacağı hesaba katılmalıdır. Ayrıca maddi bir karşılığı olmamakla beraber bazı bölgelerde nüfusun göç

ettirilmesinden sonra doğabilecek terör gibi milli güvenlik problemleri veya kırsalda yaşayan insanları 7269 sayılı “Umumi Hayata Müessir Afetler Dolayısıyla Alınacak Tedbirlerle Yapılacak Yardımlara Dair Kanun” kanun kapsamında nakledilmesi durumunda yeni yaşam alanlarında alıştıkları ekonomik hayatın sağlanamaması (İşsizlik, uyum problemleri vb.) durumların da getireceği olumsuzluklar hesaba katılmalıdır (Resmi Gazete 1959). Sonuç olarak kırsalda kaya düşmesi riskinin tespitinden sonra detaylı bir saha çalışması yapılması, alternatif projelerin geliştirilmesi ve bu projelere göre faydaların, maliyete oranlanması kısacası ülkelerin kıt kaynaklarının etkin kullanılması için iyi bir planlama yapılması gerekmektedir. Kırsalda yaşanan kaya düşmesi afetini engellemek için ıslah çalışmalarına karar verilmesi durumunda avantajlı bir durum da bulunmaktadır. Buna göre kırsalda nüfusun az olması (gerektiğinde tamamının boşaltılabiliyor olması) ve alanların çoğunun boş (yapı bulunamaması) olmasından dolayı tehlikeli bir yapı imalatı türü olan kaya ıslahı çalışmaları, şehir merkezleri veya sit alanlarında yapılan çalışmalara göre daha kolay ve düşük riskli yürütülmektedir.



Şekil 2. Kırsal alanda yaşanan kaya düşmelerine ait görüntüler

### 1.5. İl ve İlçe Merkezlerinde (Yoğun İnsan Nüfusunun Bulunduğu Alanlarda) Kaya Düşmesi

Türkiye’de 1950’li yıllardan itibaren kırsaldan şehirlere doğru olan nüfus hareketinin doğal sonuçları olarak il ve ilçe merkezleri büyümüştür. Bu büyüme kimi zaman afet riski bulunan alanlara doğru uzanmış, hatta bazı yerleşim birimleri tehlike göz ardı edilerek afet riski taşıyan alanlarda yapılaşma yaşanmıştır. Bazı durumlarda ise daha önce tespit edilemeyen afet riski şehir büyümeye başlamasından sonra ortaya çıkmış, yaşanan vakalar neticesinde durum tespit edilmiştir (Şekil 3-4). Son olarak bazı yerleşim alanlarında ise yapılan diğer çalışmalar (yol şevleri, HES çalışmaları, madencilik faaliyetleri vb.) yeni afet riskleri oluşturmuştur. Başlık içerisinde anlatılan afet risklerinden bir tanesi de kaya düşmesi afetidir. Yerleşim alanlarının bazılarında yaşanan kaya düşmesi vakaları için tehlike boyutunu gözler önüne sermiştir. Kaya düşmesi şehirlerde sadece konutlaşmanın olduğu alanlarda değil şehirlerin büyüme güzergahları üzerinde de rastlanmaktadır. Doğal olarak şehirlerin bu güzergah boyunca büyümeleri sınırlanarak çeşitli şehircilik problemleri oluşturmaktadır. Bu noktada şehir merkezlerinde riskli alanların bertaraf edilmesinin önemi oldukça fazladır. Özellikle yeni imara açılacak bölgelerde bu önlemlerin alınması, konutlaşma olduktan sonra yapılacak imalatlara göre daha kolay olacağı şüphesizdir. Şehirleşmiş alanlarda gerek vatandaşın sahip olduğu yapılar gerekse devletin altyapı ve üstyapı yatırımlarının toplam maliyeti düşünüldüğünde, kaya ıslahı çalışmalarının yürütülmesinin fayda maliyet analizlerinde genellikle fayda kısmı ağır basmaktadır. Bu nedenle Türkiye’de il ve ilçe merkezlerinde gerek konutlaşmış alanlarda gerekse yeni imara açılacak alanlarda kaya ıslahı çalışmaları yürütülmüştür.



Şekil 3. İlçe merkezinde konuta ve imar alanına düşen kaya blokların görünüşleri

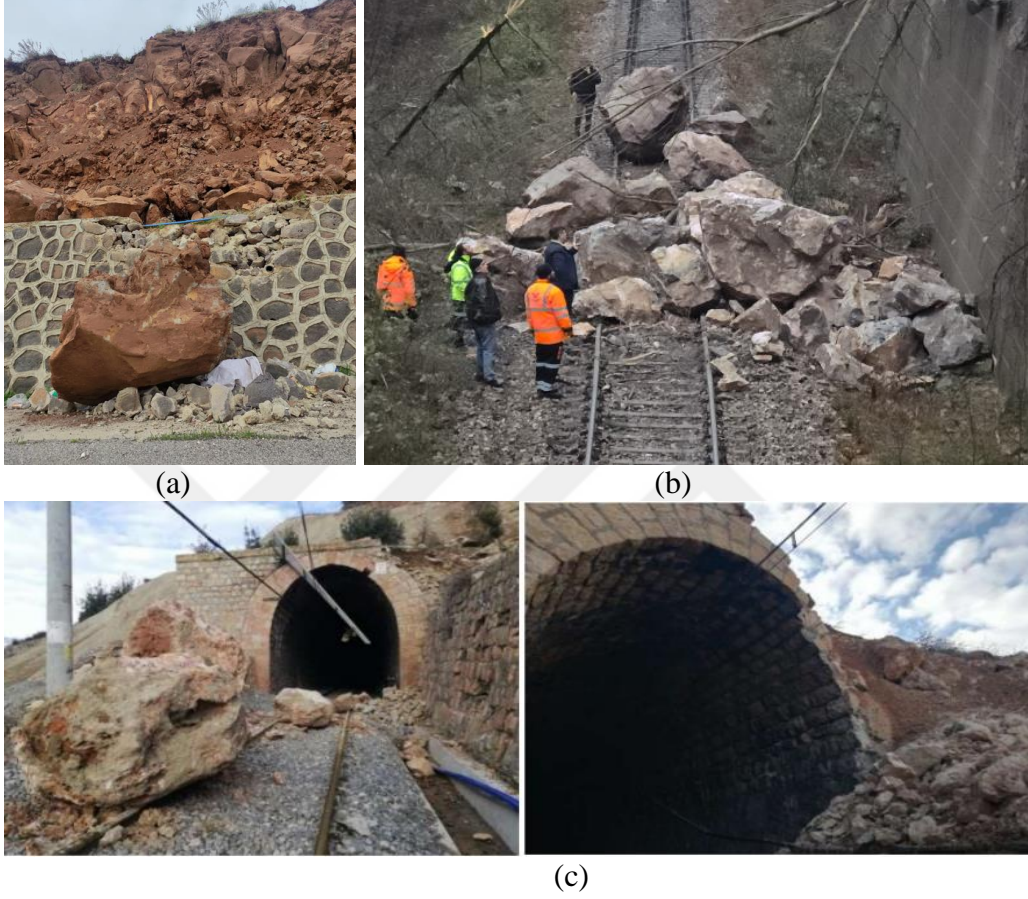


Şekil 4.Yoğun konutların bulunduğu alana düşen kaya blokların görünüşleri

### 1.6. Mühendislik Yapılarına Kaya Düşmesi

Karayolları, demiryolları, tüneller, barajlar gibi yüksek bütçeler ile inşa edilen yapıların bazılarında kaya düşmesi afeti yaşanmaktadır (Şekil 5). Özellikle bu yapılarda kaya düşmesi yaşanmasının nedeni bu yapı türlerinin imalat yerlerinin tespiti sırasında kaya düşme riski bilinmemekte ancak yer seçiminde çok fazla etkili olmamaktadır. Örneğin bir karayolu veya demir yolu güzergahı kaya düşmesi riski nedeniyle değiştirilemez. Zira dağlık arazide yol platformunun kurulacağı hat için şevlendirme yapılması ve bu şevlendirme çalışmaları sırasında kayalarda yeni süreksizliklerin oluşması kilometrelerce hat içerisinde kaçınılmazdır. Yine baraj yapıları maliyetlerin azaltılması için nehrin dar aktığı ancak daha dik olduğu vadiler kullanılmaktadır. Yüksek eğim açılına sahip vadiler, kaya düşmesi tehlikesi açısından riskli morfolojik özellikler sergilemektedir. Mühendislik yapılarında yaşanan kaya düşmesi afeti nadiren insanların yaralanmasına hatta ölümüne sebebiyet verirken genellikle maddi hasarlara neden olmaktadır. Özellikle karayolları şevleri, doğal yamaçların bozulmasıyla oluşturulduklarından nispeten daha sık yaralanmalı veya ölümlü kaya düşmesi afetine maruz kalmaktadır. Öte yandan sadece Türkiye’de 400 bin km üzerinde bulunan karayollarında toplam uzunluk düşünülürse tüm risk alanlarında önlem alınması neredeyse imkânsız gibidir. Kıt kaynakların etkin kullanımını gerekliliği hesaba katılarak gerekli faktörle değerlendirme sonucu ıslah çalışmalarına gidilmektedir. Buna göre, yolu kullanan kişi sayısı, kaya bloklarının düşme sıklığı gibi faktörlere göre önlem yapıları inşa edilmektedir. Barajlarda kaya düşmesi hareketi iki temel probleme neden olmaktadır. Birinci problem düşen kayaların baraj rezervuarını doldurarak barajda sedimentasyon problemini hızlandırması, ikincisi düşen kayaların bent, tribün odası, enerji hatları, dolu savak, tünel ve benzeri yapılara çarparak hasara neden olmasıdır. Bu noktada hem barajların daha uzun ömürlü olması hem de

yüksek maliyetli yapılarının hasar almaması için kaya ıslahı çalışmaları yürütülmektedir. Diğer mühendislik yapılarında da kaya düşmesi afetinin yaşanması muhtemeldir, yapının imalatında harcanan maliyet ve oluşturduğu riske göre kaya ıslahı çalışmaları yürütülmektedir. Ancak asıl olan riskin önceden tespit edilerek yapı imalatı için yer seçiminin bu riske göre değerlendirilmesidir.



Şekil 5. Farklı mühendislik yapılarına düşen kaya bloklarının görünüşleri: (a) istinat duvarı, (b) demir yolu (URL-1) ve (c) demir yolu tünel (GTÜ, 2023)

### 1.7. Sit Alanlarında Kaya Düşmesi

Sit alanı tanım olarak çeşitli özellikleri nedeniyle (duyusal, sanatsal, bilimsel, tarihsel ve kültürel) değerlendirilmesi ve korunması gereken, çok sık rastlanılmayan alanlardır. Sit alanları hem yer üstünde hem yer altında hem de su altında bulunabilir (Yalçın ve Göktepe 2018). Türkiye, tarihi alanlar/yapılar ve doğal güzelliklerin oldukça fazla bulunduğu; bu nedenle sit alanlarına çok sık rastlanan bir ülkedir. TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verilerine göre, 2022 yılında Türkiye’de toplam 23.632 adet sit alanı bulunmaktadır (URL-2, 2022). Öte yandan, ender doğal ve kültürel değerlere sahip olmasına rağmen hâlâ sit alanı olarak ilan edilmemiş onlarca tarihî ve arkeolojik alan da mevcuttur. Türkiye insanoğlunun bilinen en eski dönemlerinden beri kadim

medeniyetlere beşiklik yapmış bu nedenle tarihi/arkeolojik olarak değerli birçok alana sahiptir. Maksimum düzeyde korunan, özgün haliyle müdahalelerden uzak tutulan ve ayakta kalması sağlanan bu tür tarihi ve arkeolojik alanlara 'sit alanı' denilmektedir. İlk şehir olduğu kabul edilen Çatalhöyük ve insanlığın ilk tapınak yapıları olarak kabul edilen Karahantepe ve Göbeklitepe Türkiye sınırları içerisindedir (Avcı, 2019). İnsanoğlunun bu eski dönemlerinde Türkiye’de kurduğu bu yapılar hatta şehirlerin ciddi bir kısmı engebeli araziler üzerindedir. Bunun nedeni insanoğlunun, eski çağlarda barınma, depolama ve korunma ihtiyaçları doğrultusunda ulaşılması zor veya korunması kolay alanları tercih etmiş olmasıdır. Tercih edilen bölgelerde dışarıdan müdahalelere karşı korunma/saklanma imkanı sağlanmış veya müdahale edilmesi zorlaştırılmış alanlar oluşturulmuştur. Özellikle alet edevat kullanımının gelişmesiyle kayaların oyularak veya bloklar halinde kesilerek dizilmesiyle yapılan yerleşim alanları nedeniyle günümüze kadar ulaşan onlarca yeraltı boşlukları bulunmaktadır (AFAD, 2020). Kapadokya’daki yer altı şehirleri, Niğde’de yer alan Gümüşler Manastırı ve Trabzon’un Maçka ilçesindeki Sümela Manastırı, kayaların oyulması ve duvar şeklinde işlenmesiyle inşa edilmiş; dış tehditlere karşı korunma amacı taşıyan yapılara örnek teşkil etmektedir. Ayrıca Dünya’da Afganistan, Ürdün, Hindistan, İspanya, Çin, Mısır, İran, İtalya ve Etiyopya gibi birçok bölgede korunma ve barınma amacıyla kaya içine veya kayadan oyulma yerleşim birimleri bulunmaktadır (Özata, 2018). Bu yerleşim birimlerinden günümüze ulaşanlar, insanlığın ortak mirası olarak her yıl milyonlarca turist tarafından ziyaret edilmektedir. Ancak engebeli arazilerde inşa edilmiş yapıların etrafında bulunan kayalar ve yapılar kullanıldıkları dönemden bu yana çeşitli dış etkenler ve iç dinamiklerle yorulması sonucu bazı alanlarda kaya bloklarının süreksizlikleri artmış ve düşme tehlikesi oluşmuştur. Türkiye ve dünyada, arkeolojik sit alanlarının bulunduğu bölgelerin büyük bir kısmı aynı zamanda yüksek deprem riski taşıyan alanlardır ve bu bölgeler, yüzlerce yıllık süreç içerisinde birçok depreme maruz kalmıştır (Brando vd., 2020; Çakır., vd. 2015; D’Ayala ve Ansal, 2012). Bu nedenle, deprem bir iç dinamik olarak yalnızca bu yapılarda hasara yol açmakla kalmamış, çevresindeki kayalarda da süreksizliklerin ilerlemesine neden olmuştur. İlk inşa edildikleri dönemde düşük nüfuslar için tasarlanmış olan bu yapılar açısından risk düzeyi başlangıçta oldukça düşükken, günümüzde yüzbinlerce ziyaretçinin oluşturduğu yoğunluk nedeniyle bu risk önemli ölçüde artmıştır. Bu nedenle, Türkiye’de yer alan birçok önde gelen arkeolojik sit alanında kaya ıslahı çalışmaları ya yürütülmüş ya da yürütülmesi planlanmaktadır. Şekil 6’da Assos Antik Limanı, Silifke Kalesi, Niğde Gümüşler Manastırı, Gaziantep Dülük Antik Kenti’ndeki Mithras Tapınağı, Ihlara Vadisi

ve bu çalışmanın konusu olan Sille Vadisi gibi önemli sit alanlarında meydana gelen kaya düşmesi afetine ilişkin görseller sunulmuştur.



(a)

(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6. Türkiye'nin önde gelen arkeolojik sit alanlarında meydana gelen kaya düşmelerine ait görünüm: (a) Assos Antik Limanı (Nasery vd., 2024), (b) Silifke Kalesi, (c) Niğde Gümüşler Manastırı, (d) Gaziantep Dülük Antik Kenti'ndeki Mithras Tapınağı, (e) Ihlara Vadisi ve (f) Sille Vadisi (URL-3)

Sit alanlarında kaya ıslahı çalışmalarının birçok zorluğu vardır. Bu başlık altında bazı zorluklardan bahsedilmesi gerekirse; Kaya düşme riski bulunan şevler erişimsiz olmasından dolayı genellikle inceleme için endüstriyel dağcılar çalışma yapmaktadır. Kimsenin daha önce giremediği yamaçlarda yapılan incelemelerde yeni tarihi eserler ortaya çıkmakta, bu durum da imalatların durmasına neden olmaktadır. Örneğin Sümela Manastırı'nda bir şapel, Assos Antik limanında yeni bir tapınak tespit edilmiştir. Akabinde her iki çalışmada arkeolojik incelemeler nedeniyle durdurmuştur. Tarihi yapıların bulunduğu alanlarda gerçekleştirilen kaya ıslahı çalışmalarında, titreşim oluşturabilecek uygulamalardan kaçınılmakta; zorunlu hallerde ise bu uygulamalar çok düşük şiddetlerde gerçekleştirilmekte ve yapılar, çeşitli ölçüm yöntemleriyle sürekli olarak izlenmektedir (Nasery vd., 2024a). Bu durum alternatif proje üretimini zorlaştırmaktadır. Kaya ıslahı yöntemlerinin belirlenebilmesi için alanın jeolojik etüt raporu önem arz etmektedir. Ancak arkeolojik alanlarda sondaj yöntemleri ile veri alınması neredeyse imkansızdır. Zira sondaj yapılacak alanda başka bir tarihi yapıya veya kalıntıya zarar verilmesi riski bulunmaktadır. Sondaj yöntemi gibi tahribatlı deneysel metotların neredeyse hiçbiri tarihi alanlarda kullanılmamaktadır. Bu noktada jeofizik yöntemler ön plana çıkmakta, jeolojik yöntemler ise en yakın ve uygun alanlarda yapılarak jeofizik yöntemleri desteklemeye çalışmaktadır (Nasery vd., 2024b). Sit alanındaki zorluklardan bir diğeri, çalışmalar sırasında bu alanların tamamen kapatılması gerekliliğidir. 2023 yılında yaklaşık yarım milyon insanın ziyaret ettiği Sümela Manastırı daha öncesinde yürütülen kaya ıslahı çalışmaları sırasında 5 yıl kapalı kalmıştır. Ancak özellikle turizm sektöründeki vatandaşlarda ve tarihi bölgeleri merak eden turistlerden bu sürenin daraltılması talebi işlerin hızlandırılması ile ilgili sürekli bir baskı oluşmaktadır. Yine en sık rastlanan zorluklardan biri de tarihi bölgenin silüetinin bozulmaması isteğidir. Birçok sit alanında doğal dokusunun bozulmaması gerekliliği malzeme tercihinde sınırlarını oluşturmaktadır (Nasery vd., 2023).

Yukarıda bahsedildiği gibi tarihi yapılarda kaya düşmesi afeti yaşanması durumunda gerek risk belirleme gerekse ıslah çalışmaları daha da zorlaşmaktadır. Genellikle tarihi yapının etrafında kazı yapılmasında sakıncalar oluşturabilecek kalıntılar bulunmaktadır. Ayrıca yapıldığından beri onlarca yüzyıl ayakta kalmış yapılarda bulunan zamana bağlı deformasyonlar çalışmaları daha da zor hale getirmektedir. Sonuç olarak, tarihi dokunun bozulmaması ya da en az zararla korunması hedefi, birçok müdahale alternatifinin kullanımını sınırlandırmakta veya tamamen uygulanamamasına neden olmaktadır. Öte yandan kaya düşmesi afetinin yaşanması durumunda tarihi yapılar bir daha orijinal haline getirilemeyecek şekilde yıkıma uğrayabilir. Bu nedenle tarihi yapılar

ve arkeolojik sit alanlarında afet yaşanmadan önce riskin belirlenerek önlem alınması oldukça önemlidir (Bernabei vd., 2021; Hassan vd., 2020; Lombardo vd., 2020). Tarihi yapılarda veya bulunduğu sit alanlarında risk oluşturan afetlerin öncesinde gerekli önlemlerin alınarak güçlendirme yapılması ve böylelikle afetlere hazır hale getirilmesi ile ilgili literatürde şu çalışmalara ulaşılmıştır;

Roch ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise çok büyük bir alanı kaplayan Strazburg Şehrinin tarihi kısmında yaşanan kaya düşmesi afetlerine karşı tüm alanı bölgelere ayırarak ve GPR yardımıyla kaya bloklarının takibi yapılarak incelemelerde bulunulmuş ve GPR sistemlerinin kaya bloklarının koptuğu ana kayalıkların takibi için uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Roch vd., 2002).

Şerife ÖZATA'nın 2015 yılında kaleme aldığı Yüksek Lisans Tezinde Kapadokya bölgesinde bulunan Tarihi Malta Haçlı Kilise, Ortahisar Kilisesi ve Mazı Yeraltı Şehri gibi tarihi yapılarda oluşan hasarlar incelenmiş ve sorunları gidermek için çözüm önerileri sunmuştur (Özata 2015).

Gürcistan'da bulunan Vardzia Manastırı ve yamacında bulunan kayaların oyulmasıyla oluşturulmuş şehirde zaman zaman yaşanan kaya düşmelerinin ardından projelendirme çalışmaları başlatılmıştır. Çalışmada kaya mekaniği karakterizasyonu, jeo-mühendislik araştırması, jeo-yapısal ve kinematik analiz, kaya düşmesi modellemesi, coğrafi kazanımlar ve detaylandırma kısımları irdelenmiş ve bir mastır plan çerçevesiyle önlem çalışmalarına geçilmiştir (Margottini vd. 2016).

2011 yılında gerçekleştirilen çalışmada, Tarihi Kastamonu Kalesi'nin bulunduğu yamaçta meydana gelen kaya düşmelerinin etkilerini belirlemek amacıyla istatistiksel analiz programları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yamacın en kritik 17 kesitinde, farklı boyut ve şekillerdeki kaya bloklarının hareketi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kaya bloklarının düşme mesafesi, sıçrama yüksekliği, kinetik enerjisi ve düşme hızı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Bu veriler ışığında, kaya bloklarının temizlenmesi, bulonlanması ve düşecek kayaların setlerle durdurulmasına yönelik proje önerileri sunulmuştur (Topal vd., 2012).

2022 yılında Kesin ve Polat tarafından yürütülen bir çalışmada, UNESCO Dünya Mirası Listesi'nde yer alan Safranbolu'nun tarihi dokusunu tehdit eden kaya düşmeleri mercek altına alınmıştır. Araştırmacılar, kireçtaşı yapıya sahip bölgedeki kaya kütlelerinin jeolojik özelliklerini ve eklem yapılarını detaylı tarama yöntemleriyle incelemiştir. Sahadan elde edilen veriler ışığında, dik eğimli yamaçlarda oluşabilecek potansiyel stabilite sorunlarını belirlemek amacıyla kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, bilgisayar destekli simülasyonlarla

çeşitli kaya düşmesi senaryoları modellenmiş ve her bir senaryoda düşen kaya bloklarının kinetik enerjisi, sıçrama yüksekliği, yatay ilerleme mesafesi ve hızı gibi kritik parametreler detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle tarihi yapılar ve ziyaretçiler açısından ciddi güvenlik riskleri taşıyan bu dik yamaçlardaki kaya bloklarının acil müdahale gerektirdiğini ortaya koymuştur. Böylece çalışmada, Safranbolu’da kaya düşmesi risklerinin azaltılmasına yönelik alınması gereken önlemler konusunda önemli bir yol haritası sunulmuştur (Keskin ve Polat, 2022).

Trabzon’un Maçka ilçesinde yer alan Sümela Manastırı, kaya düşmesi tehlikesi nedeniyle 2015 yılında turizme kapatılmıştır. Ardından gerçekleştirilen multidisipliner çalışmalar sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, binlerce tonluk riskli kaya blokları kırılarak uzaklaştırılmış, bazıları ise uygun yöntemlerle sabitlenmiştir. Hazırlanan projeler ve uygulamalar sayesinde manastır yeniden ziyarete açılmıştır (Nasery vd., 2023).

Türkiye’nin turistik ve tarihi bölgelerinden biri olan Kapadokya’da gerçekleştirilen bir çalışmada, kaya düşmesi projelendirme aşamasında kullanılan 2 boyutlu ve 3 boyutlu istatistiksel analiz programları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki analiz türüne göre de incelenen tarihi ve turistik alanın risk altında olduğu belirlenmiştir. Ancak, 2 boyutlu analizlerde elde edilen kinetik enerji değerlerinin, 3 boyutlu analiz sonuçlarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Akın vd., 2024).

Sit alanında yapılacak ıslah çalışmalarında karşılaşılabilecek zorlukların birçok örneği sayılabilir. Öte yandan, bazı zorluklar tüm sit alanlarında yürütülen kaya ıslahı çalışmalarında ortak şekilde karşılaşılabilmektedir, bazıları ise alanın lokasyonuna özgü olabilmektedir. Bu nedenle, sit alanlarında kaya ıslahı projeleri hazırlanmadan önce karşılaşılabilecek zorluklar ayrıntılı bir şekilde planlanmalı hem projelendirme sürecinde hem de uygulama aşamasında arkeolog, şehir plancısı, tarihçi gibi ilgili disiplinlerden uzmanların da görüşlerinin alındığı toplantılar düzenlenmelidir. Islah için önerilecek birkaç alternatif projenin yine bu uzmanlara sunulması ve aralarında tercih yapılması gerekmektedir. Bu nedenle sit alanlarında projelendirme çalışmaları multidisipliner bir çalışma olup, detaylarda çok önemli kararlar barındırmaktadır. Bu tez kapsamında benzer bir çalışmanın detayları verilmiş, Konya İli Selçuklu İlçesindeki Sille Vadisinde yapılan kaya ıslahı projelendirme çalışması incelenmiştir. Bölge 6000 yıl öncesine kadar gidebilen yerleşim birimlerinin kalıntıları erken Hristiyanlık dönemine ait kilise ve tarihi dokusuyla sille evlerinin bulunduğu çok değerli kültür miraslarının bir arada olduğu bir bölgedir (Kuyrukçu ve Kuyrukçu 2015). Güney yönde bulunan kaynak kayalıklar kopan kaya blokları zaman zaman gerek kuzey-güney gerekse doğu-batı yönünde bulunan

vadilere girerek risk oluşturmaktadırlar. Yıl içerisinde yerli ve yabancı onlarca turistin ağırlandığı bölgede bu risk can ve mal kaybına neden olabileceği gibi tarihi kalıntılarda geri dönüşü imkânsız hasarlar verebileceğinden ıslah çalışmalarının yapılması ön görülmüştür. Bu noktada bölgenin birçok noktasında toprak altında bulunan tarihi kalıntılar ve Sille Vadisinin kendine has görüntüsünün bozulmaması için kaya ıslahı çalışmaları sırasında farklı alternatifler geliştirilmesi gerekmiş, güvenli ekonomik çözüm önerilerinin yanı sıra kültürel mirasın ve dokunun da korunması amacına uygun çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışma içerisinde 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı'ndaki kaya düşme riskinin detaylı bir şekilde tespiti ve minimum müdahale ile maksimum güvenliğin sağlanması için gerekli çalışmalar ve Sille Vadisi için alternatif projelerden bahsedilecektir.

### **1.8. Kaya Islahı Önlem Yapıları**

Kayaların eğimli arazilerde harekete geçmesi ve bu hareketin insanlarda doğrudan veya dolaylı etkilerinin olmasına kaya düşmesi afeti, bu afetin engellenmesi için yapılan çalışmalara da kaya ıslahı denilmektedir (Nasery ve Çelik, 2020). Bu başlık altında kaya ıslahı çalışmalarında sıkça uygulanan önlem yapı çeşitlerinden bahsedilecektir. Kaya ıslahı alanlarında, risk durumu, bölgenin morfolojisi, alanın statüsü ve kullanım amacına bağlı olarak farklı iyileştirme ve müdahale yöntemleri uygulanmaktadır. Bu noktada projeyi hazırlayacak olan müellifin farklı yöntemler hakkında bilgisi olması ve yeni denenecek yöntemi belirleyebilecek kadar mühendislik yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında alternatif proje önerileri sunulacağından farklı ıslah yöntemlerinden bahsedilmesi uygun görülmüştür. Önlem yapıları öncelikle aktif ve pasif önlem yapıları olarak ikiye ayrılmaktadır. Aktif yapılar kaya bloklarının harekete geçmesinin engellendiği ve yerinde stabil hale getirildiği yöntemlerdir. Pasif yöntemler ise kaya bloklarının hareketine kısmen veya tamamen izin verildiği, ancak tehlike olmadan durdurulduğu veya düşme güzergahının tehlike yaratmayacak alanlara doğru değiştirildiği yöntemlerdir (Turner ve Schuster, 2012; Akın vd., 2020). Kullanılan bazı yöntemler hem aktif hem de pasif müdahale yöntemleri kapsamında değerlendirilebilmektedir. Aktif ve pasif yöntemlerin birlikte uygulanması durumunda ise bu durum 'birleşik koruma ve müdahale yöntemi' olarak adlandırılmaktadır (Nasery ve Çelik, 2020). Örneğin kaya bloğunun ağ ile sabitlenmesinde eğer kaya hareket edemeyecek şekilde sabitlenmişse aktif yöntem içerisinde, kaya bloğu ağ içinde kısıtlanmış bir hareketle belirlenen alana kadar inmesine ve toplanmasına izin verilecekse pasif yöntemde değerlendirilir. Aktif yöntemler olarak kullanılan yöntemlere örnek

olarak, riskli kaya bloklarının kırım ve istiflenmesi, kaya bulonları, püskürtme beton, payanda, güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitleme, ankrajlı çelik kafesler, tıraşlama ve şevlendirme gibi yöntemler sayılabilir (Wyllie ve Norrish, 1996). Pasif yöntemlere örnek olarak; kaya tutma alanları veya hendekleri, enerji sönmüleyici bariyerler, sabit bariyer sistemleri ve tel kafes sistemler gösterilebilir (Andrea vd., 2016; Polat vd., 2016).

### **1.8.1. Kaya İslahı Çalışmalarında Aktif Koruma ve Müdahale Yöntemleri**

Yukarıda belirtildiği gibi aktif koruma yapılarında risk oluşturan kayanın yerinde çözüm üretilmesi böylelikle harekete geçmesinin engellenmesi esas alınmaktadır. Genellikle büyük vadiler içerisinde birkaç kaya bloğu veya kaynak kayalığın hacminin düşük olduğu alanlarda tercih edilmektedir. Vadi boyunca farklı düşme güzergahları nedeniyle uzun önlem yapısı planlamaktansa yerinde kayanın sabitlenerek durdurulması veya kontrollü bir şekilde kırılarak uzaklaştırılması daha ekonomik bir çözüm olmaktadır. Aktif koruma ve müdahale yöntemlerinde en önemli husus alanda serbest halde bulunan kayaların tamamının belirlenmiş olmasının gerekliliğidir. Aksi halde risk oluşturabilecek bir kaya bloğunun varlığı tehlikeyi devam ettirebilir. Bu noktada özellikle bitki örtüsünün yoğun olduğu yerlerde tüm kayaların tespiti güçleşmektedir. Bu tarz arazilerde mümkünse yaprakların döküldüğü kış aylarında çalışılması daha efektif olmaktadır. Ancak kar örtüsünün de arazi üzerinde olmaması gerekmektedir. Aktif koruma yapılarında, doğru malzeme seçimi yapılmış ve mühendislik hesapları doğrultusunda güvenli bir şekilde tasarım gerçekleştirilmişse, bu yapıların sık aralıklarla denetlenmesine genellikle gerek duyulmaz. Bu durum, aktif koruma yöntemlerinin en önemli avantajlarından biridir. Aktif yapılar ayrıca pasif yapıları koruyucu olarak da imal edilebilir. Düşme riski çok yüksek bulunan kayalar için pasif yapı yapılması planlanıyorsa bu yüksek riskli kayaların önceden temizlenmesi veya sabitlenmesi hem ikili koruma hem pasif yapının ömrünü uzatma hem de muayene aralığını genişletme etkisi yaratabilir(Nasery ve Çelik, 2020). Aşağıda sıklıkla uygulanan bazı aktif koruma müdahale yöntemlerinden bahsedilmiştir.

#### **1.8.1.1. Kontrollü Kırım ve İstifleme**

Kaya düşme afetine neden olan kaya blokları belirli ebatların (hacmin) altındaysa veya güvenlik önlemleri ile yine aynı ebatlara getirilebiliyorsa en etkin ıslah yöntemlerden biri kırım ve istifleme yöntemidir. Arazinin yapısına ve yamaç konumuna ve ihtiyaç duyulması halinde geçici önlem yapılarına bağlı olarak riskli bloklar olduğu gibi aşağıya düşürülerek, bazen büyük bloklar çeşitli kırıcılar (güçlü darbeli matkap) gibi

mekanik aparatlar ile bazen de mekanik veya kimyasal patlayıcılar ile parçalanıp temizlenmektedir. Parçalanmış bloklar arazinin durumuna göre nakledilmekte veya müsait ve kontrollü bir güzergâh aşağıya atılarak yamaç tamamen temizlenmektedir.

Eğer bu imkan mevcut değilse, saha içerisinde kazılacak biriktirme hendekleri veya çukurları aracılığıyla düşen kaya parçalarının tutulması sağlanabilir. Kaya kırım işlemi ise; tam kontrollü kaya kırımı (Şekil 7). sıçrama kontrollü kaya kırımı ve serbest kaya kırımı olmak üzere üç farklı kategoriye ayrılmaktadır (Nasery vd., 2024a). Tam kontrollü kaya kırım yönteminde kaya bloğunun parçalanmadan önce gerekli önlemleri alınır ve hareket edemeyecek şekilde sarılır, parçalandıktan sonra da önlem için yapılan imalatın içinde parçalı kayalar bulunur. Akabinde ise nakledilme ve istifleme işlemine geçilir. Sıçrama kontrollü kaya kırımında ise, kaya bloğu sabitlenmez ancak kırım ve patlatma sırasında parçaların sıçramasını önlemek için üzerine bir çelik ağ veya membran yerleştirilir. Kırım sonrası güvenlik amaçlı ağ kaldırılır ve kırım moluzu serbest bir şekilde temizlenir (Şekil 8). Bu güvenlik önleminin kapasitesine göre kaynak kayalık parçalanarak aşağıya yollanır. Temizlik veya istifin zor olduğu yerlerde ankraj ve halatlar ile kayaların ana kayaya daha sıkı bağlanması gerekebilir. Bu imalat türünün nasıl uygulanacağı ile ilgili yerinde tespitler yapılması oldukça önemlidir. Bazen de yamacın altı serbest temizlemeye müsait olmadığı yerlerde yamacın müsait ve eğimin az olduğu yerlere birikip istiflenmektedir (Şekil 9). İstifleme işlemi sırasında ihtiyaç duyulması halinde harç ile daha sağlam yapılar oluşturulabilmektedir. Kırım ve istifleme çalışmaları her zaman sadece küçük kayalar için yapılmaz; projenin gereksinimlerine bağlı olarak, onlarca ton ağırlığındaki büyük kaya blokları, piroteknik tip patlayıcılar veya kimyasal çatlatıcı tozlar kullanılarak parçalanabilir ve nakledilebilir hale getirilerek temizlenebilir. Ancak diğer imalatlara göre ithal malzeme kullanılmıyor olması, aynı malzemenin defalarca kullanılabilir olması, riskli kayanın tamamen ortadan kalkıyor olması nedeniyle avantajlı bir uygulamadır. Öte yandan çeşitli geçici önlemler alınmasının gerekmesi, nakliye problemleri nedeniyle her kaya bloğunda uygulanamıyor olması ve gerek projenin gerekse uygulamacının tecrübeli olması gerekliliği gibi olumsuz özellikleri de bulunmaktadır.



Şekil 7. Assos Antik Liman kaya ıslahı çalışmalarında tam kontrollü kaya kırım uygulamasına ait görseller (Nasery vd., 2024a)



Şekil 8. Sümela Manastırı ıslah çalışmalarında sıçrama kontrollü kaya kırım uygulaması (Nasery vd., 2023)



Şekil 9. Kaya ıslahı çalışmalarında yapılan kırım ve istiflenme görünümleri

#### 1.8.1.2. Çelik Ağlar ile Yüzeyin Kaplanması

Kaynak kayalığın geniş bir alana yayıldığı ve hali hazırda düşme riski yüksek olmayan ancak süreksizliklerin artma riski bulunan dolayısıyla yakın gelecekte düşme

riski yüksek olabilecek kayaların bulunduğu şev yüzeylerinin çelik ağlar, panel ağlar veya halka ağlar ile kaplanarak risk barındıran kayaların düşmesi engellenebilir. Bu yöntem dik ve kot farkı fazla olan yamaçlarda daha çok tercih edilir bir yöntemdir. Çelik ağlar, hazır ağlar olabileceği gibi, halatların enine ve boyuna kaya bloklarına sarılmasıyla da oluşturulabilir. Ayrıca, 2-3 mm çapında galvaniz kaplı altıgen çelik tel ağlar veya en az 10-50 cm çapında halka ağlarla bu kaplama yapılabilir (Şekil 10). Çelik ağları oluşturan halatların kalınlığı ve sıklığı, kaya bloklarının boyutlarına göre belirlenmeli; gerektiğinde, yüzeye dik ankrajlarla ağlar güçlendirilmelidir. Bu noktada ankraj derinliği oldukça önemlidir. Kaya bloklarının süreksizlik derinliğinin tespit edilmesi ve ankrajların bu derinlikten sonra etkili boyunun hesaplanması gerekmektedir. Çelik ağlar ile yüzey kaplaması yönetiminde bakım önemlidir çünkü debris denilen kopan kaya malzemelerinin tele yaptığı baskı ve yorma etkisi telin kopmasına neden olacağından biriktiğinde temizlenmesi gerekmektedir.

Çelik halatların üç tip ankraji bulunmaktadır. Birinci tip olan tepe ankrajları, şevin üst kısmında, mümkünse düz alanlarda imal edilir. Genellikle süreksizliğin az olduğu bölgelerde tercih edilir ve şeve serilecek çelik ağları taşımakla görevlidir. İkinci ankraj tipi, yüzey ankrajlarıdır. Bu ankrajlar, sistemi yüzeye sabitlemek ve kayaların hareket etmesini engellemek amacıyla yerleştirilir. Üçüncü tip ise topuk ankrajlarıdır. Kaya blokları tutularak küçük çaplı malzemelerin ağ içinde aşağıya doğru hareketi engellenmeye çalışılır. Ancak bazı durumlarda, ufak kaya blokları da bu harekete katılabilir. Bu tür durumlarda, topuk ankrajları sayesinde malzeme ağın en alt kotunda biriktirilir. Topuk ve yüzey ankrajlarının belirli aralıklarla incelenmesi ve debris birikmesi durumunda temizlenmesi oldukça önemlidir. Çelik ağ ile yüzey kaplamasında, ağlar, halatlar, yüzeye dik bulonlar ve tepe ankrajlarının boyutlandırılması yapılırken, halatlar ve yüzey ankrajları genellikle çekme gerilmesine göre, tepe ankrajları ise halata dik olmalarından dolayı kesmeye göre boyutlandırılmaktadır. Ayrıca, boyutlandırmada dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biri de kar yüküdür. Çünkü çelik ağlarla kaplanan yüzeyler kış aylarında kar tutar ve kar yükü, bölgeye bağlı olarak büyük değerlere ulaşabilir (Seferoğlu vd., 2016).



Şekil 10. Halka ağ sistemiyle yamaç kaplanması (URL-4)

### 1.8.1.3. Güçlendirilmiş Kombine Ağlar ile Kaya Sabitlemesi

Afet riski taşıyan kayaların bulunduğu yüzeyin çelik ağlarla kaplanmasına bir önceki bölümde değinilmiştir. Bu bölümde ise, sadece riskli yüzeyin değil, doğrudan risk barındıran kayanın sabitlemesinden de söz edilecektir. Kaya düşmesi, her proje ve bölge için özel çözümler ve titiz çalışmalar gerektiren bir problemdir. Örneğin, bazı durumlarda büyük kaya bloklarının düşme riski bulunmakta; ancak bu risk düşük seviyede olduğu ya da kırım ve temizleme işlemleri uygulanabilir bir konumda yer almadığı durumlarda, riskli blokların yerinde sabitlemesi gerekebilmektedir. Özellikle hemen altında önemli bir tarihi yapı bulunan kayaların temizlenmesi sırasında oluşabilecek riskler göz önünde bulundurularak, yerinde sabitleme alternatifi değerlendirilmelidir. Bu yöntemde, öncelikle kayanın hacmi, birim hacim ağırlığı, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmekte; ardından bölgenin iklim koşulları ile kar, rüzgar ve deprem gibi çevresel etkiler dikkate alınarak sabitleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak burada en kritik karar noktası, riskli kayanın hazır çelik ağlarla mı yoksa yerinde örülen halat ağlarla mı sabitleneceğidir. Eğer kayalıktan düşme riski olan küçük ve düzgün geometriye sahip bloklar söz konusuysa, hazır ağlar yeterli olabilir. Ancak büyük kaya blokları için hazır ağ kullanımı sakıncalar yaratabileceğinden, kayanın geometrisine uygun şekilde yerinde örülen çelik halat ağlarla sabitleme yapılması en doğru çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Ayrıca, örme ağ sisteminde ağ açıklığı statik hesaplara göre belirlenmekte, küçük parçaların düşmesini önlemek amacıyla bu örme ağın içine genellikle altıgen göz aralığına sahip hazır çelik tel ağlar yerleştirilmektedir. Böylece hem büyük kaya kütlesi hem de küçük parçacıkların düşmesi önlenabilmektedir. Bu iki katmanlı sistem, güçlendirilmiş kombine ağ olarak adlandırılmaktadır (Şekil 11). Çelik halatlar, projeye ve statik hesap sonuçlarına göre sağ, sol, üst ve alt bölgelerdeki sağlam ana kayalara, ankraj ve bulonlar yardımıyla monte edilmektedir.



Şekil 11. Güçlendirilmiş kombine ağ ile kaya sabitlenmesi örnek görseli

### **1.8.2. Kaya Islahı Çalışmalarında Pasif Koruma ve Müdahale Yöntemleri**

Yukarıda belirtildiği üzere, aktif koruma yapılarında risk oluşturan kaya, yerinde çözümlerle stabilize edilmekte ve bu sayede kaya blokları kontrolsüz şekilde harekete geçmeden risk ortadan kaldırılmaktadır. Buna karşılık, pasif kaya koruma yapıları ise kaya bloklarının harekete geçmesinden sonra alınan önlemlerle riskin bertaraf edilmesini amaçlayan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem genellikle afet riski taşıyan alanın çok geniş olması, tüm kaya bloklarının tespit edilmesinin imkansızlığı ya da kaynak kayalıklara ulaşımın ekonomik açıdan çok maliyetli olduğu durumlarda tercih edilmektedir.

Pasif koruma yapıları, çoğunlukla düşecek kaya bloklarının tam olarak belirlenemediği ya da birden fazla kaya bloğunun düşme riskinin bulunduğu alanlarda kullanılan etkili bir yöntemdir. Ayrıca bazı durumlarda, uygulama kolaylığı ve uzun süreli çözüm sağlaması gibi avantajlar nedeniyle pasif koruma yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yapılar, özellikle çok geniş bir yamacın tamamında kaya düşmesi riski bulunduğu yaygın olarak kullanılmaktadır.

Öte yandan, pasif koruma yapılarının uygulanabilmesi için şevin alt kotunda ya da üst kısmında uygun yerlerin bulunması gerekmektedir (Volkwein vd.,2009). Ancak bu yapıların en önemli dezavantajlarından biri, düzenli aralıklarla bakım ve kontrol gerektirmeleridir. Aksi halde, meydana gelen kaya düşmeleri sonucunda pasif koruma yapılarında hasar, birikme ve boyda kısalma gibi durumlar yaşanabilir. Bu da bir sonraki düşecek kaya bloğunda yapının yeterli performans göstermemesine ve bloğu durduramamasına yol açabilir. Buna karşılık, pasif koruma yapılarının en önemli avantajı, eğim yönünde arkada kalan alanın tamamını koruyabilecek bir yapısal çözüm sunmasıdır. Bu yönüyle, kayaların eksik tespiti gibi dezavantajlı durumlar pasif koruma sistemleri için kritik bir problem oluşturmamaktadır.

Pasif koruma yapılarının seçimi, tasarım ve uygulama yerinin tespiti için genellikle aşağıdaki parametreler kullanılır. Bu parametreler genellikle kaya bloklarının düşme güzergahları boyunca kazanacakları özellikler, ekonomi ve uygulama yerinin özellikleri ile alakalıdır.

- Kayanın düşme sırasında kazanacağı enerjiler
- Kayanın düşme sırasında kazanacağı hızlar
- Kayanın düşme sırasında yapabileceği sıçrama yükseklikleri
- Koruma yapısının enerji yutma kapasitesi
- Koruma yapısının ekonomiklik derecesi
- Koruma yapısına gerekli olan yerleşim alanı
- Kaynak kayalıktan ayrılan bloğun düşebilecekleri en uzak mesafe

#### **1.8.2.1. Enerji Sönümleyici Bariyer Sistemleri (Esnek Bariyer)**

Enerji sönümleyici bariyerler diğer bir ifadeyle esnek bariyer sistemleri düşen ve belirli bir hız kazanan riskli kaya bloklarını, çevreye zarar vermeden durdurmak amacıyla kullanılan sistemlerdir. Bu sistemler, kaya bloğunun sahip olduğu enerjiyi, bünyelerinde yer alan esnek enerji sönümleyiciler yardımıyla sönümleyerek tehlikeyi bertaraf ederler. Enerji sönümleyici bariyerler genellikle çelik direkler, bu direkler arasında gerilen özel çelik ağlar ve uzama yoluyla darbe yükünün enerjisini azaltan enerji sönümleyicilerden oluşur (Şekil 12). Çelik bariyer sistemleri, pek çok kaya ıslahı projesinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yamacın hemen her noktasına yerleştirilebilme esnekliğine sahiptir. Ancak bu sistemlerde en önemli zorluklardan biri, bariyeri oluşturan elemanların özellikle uzun profillerden oluşan dikme/direklerin sahaya nakliyesidir.

100 kJ'den başlayarak 10.000 kJ'ye kadar yüksek enerjileri sönümleyebilen bu bariyer sistemlerinde, çelik H, I, boru ve kutu profiller ve benzeri direkler, çeşitli açılarla

yerleştirilen hareketli mafsallar aracılığıyla sabitlenir. Bu direkler arasında sönümleyici özelliğe sahip çelik ağlar gerilmektedir. Enerji sönümleyiciler, çarpma sonucu oluşan enerjiyi sistemdeki mekanik gerilmeyi azaltarak absorbe eden elemanlardır (Castanon-Jano vd., 2017). Genellikle bu sönümleyici elemanlar patentli ürünlerdir ve enerji kapasitesi arttıkça bu ürünleri üretebilen firma sayısı azalmakta, maliyet ise artmaktadır. Enerji sönümleyici bariyerler, esnek bariyer türlerinden biridir ve çarpma enerjisiyle birlikte hareket eder. Bu sayede enerjinin yapıya verdiği hasar azalır; ancak her çarpma sonrasında enerji sönümleyicilerin değiştirilmesi gerekebilir. Bu durum, sisteme ek bakım maliyetleri getirir (Wyllie, 2015). Dolayısıyla, yüksek enerji sönümleme kapasitesi gerektiren bariyerlerin ilk yapım ve işletme maliyetleri oldukça yüksek olabilmektedir (Çelik vd., 2017). Bu durum, esnek bariyerlerin en büyük dezavantajlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca çarpan kayaların, bariyer boylarında kısalmaya neden olması da sistemin diğer bir zayıf yönüdür. Bariyer sisteminin üst ve alt bölgelerinde çelik halatlar ile gerilmiş çelik ağlar yer almakta ve bu halatlar, iki direk arasında ağız düzlem içinde sabit kalmasını sağlamaktadır (Yang vd., 2024). Bu sistemlerin projelendirilmesinde, tasarım ve uygulama yeri seçimi üç ana kritere göre yapılmalıdır.

1. Kayanın düşme sırasında kazanacağı enerjiler
2. Kayanın düşme sırasında kazanacağı hızlar (Maksimum 35 m/sn)
3. Kayanın düşme sırasında yapabileceği sıçrama hareketleri

Bu üç ana kritere göre, güzergâh boyunca kazanılacak enerjiye ilişkin değerlendirmelerde istatistiksel analiz programlarından yararlanılması gerekmektedir. Enerjinin düşük olduğu bölgelerde, eğer esnek bariyer yerleştirilmesi için uygun alanlar mevcutsa, bu bölgelerde inşaat faaliyetleri gerçekleştirilebilir.

Hız faktörü, esnek bariyer sistemleri açısından önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, düşen kaya bloklarının hızının 35 m/s'yi aşması durumunda, bu blokların bariyeri delip geçme ihtimali ortaya çıkmaktadır (Çelik ve Nasery, 2021).

Son olarak, düşmeye başlayan kaya bloklarının maksimum sıçrama hareketlerini gerçekleştirdiği noktaların tespiti de büyük önem taşımaktadır. Bariyer yüksekliği, bu sıçrama yükseklikleri dikkate alınarak, uygun güvenlik katsayıları ile çarpılarak belirlenmelidir. Literatürde bu güvenlik katsayısının 1,5 olması gerektiğini belirten çalışmalar bulunmaktadır (Plassiard ve Donzé, 2010). Bu parametreler, bariyerin toplam maliyetini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca sıçrama yüksekliği, bariyerin yerleştirileceği konumun seçiminde de belirleyici bir unsurdur (Çelik vd., 2017).



Şekil 12. Enerji sönümleyici çelik bariyer görünümleri

### 1.8.2.2. Oluk Bariyer (Statik Bariyer)

Oluk bariyerler, dar vadilerden feyezanla (ani taşkınla) gelen malzemelerin tutulması amacıyla tasarlanmış yapılardır. Ancak sahip oldukları yapısal özellikler sayesinde, kaya ıslahı projelerinde de kullanılabilir. Kaya düşmesi afetinin yaşandığı bazı yamaçlarda dar vadi oluşumu çok belirgin bir şekilde gözlemlenmekte olup, yamaç üzerinde düşebilecek tüm kaya ve moloz bloklarının bu dar vadiye yönelme ihtimali doğrulanmışsa, oluk bariyer sistemi tercih edilmektedir.

Bu nedenle, oluk engeli, moloz bariyer veya statik bariyer olarak da adlandırılan bu pasif koruma yapısı, genellikle dar vadilerde veya yağışlar sırasında suyla beraber kaya ve molozların gelme riski taşıyan bölgelerde kullanılmaktadır. Sistem, hazır çelik ağlar ile yüksek çekme dayanımına sahip çelik halatlardan oluşmaktadır. Statik bariyerlerde kullanılan çelik halatların çekme dayanımı genellikle maksimum 1770-2160 MPa seviyesindedir.

Bu sistemde, öngörülen yağış miktarına ya da akış sırasında düşmesi muhtemel kaya bloklarının büyüklüğüne göre çelik halatlar ile örülen ağın sıklığı ve gözenek açıklığı belirlenmektedir. Yatay ve düşey yönlü ağlar, özel klipsler (klimens) ve bağlantı aparatları kullanılarak birbirine bağlanmakta; sistem, sağ, sol ve alt bölgelerdeki sağlam ana kayalara ankrajlar yardımıyla sabitlenmektedir (Şekil 13). Akış sırasında oluşabilecek küçük parçacıkları tutabilmek için, örme ağın içine daha sık gözenekli hazır çelik tel ağlar yerleştirilmektedir. Bu tür statik bariyerler, yamacın eğimine ve arazinin özelliklerine bağlı olarak tek kademeli ya da çok kademeli olarak inşa edilebilmektedir. Sistemin önemli avantajlarından biri de, yağış sırasında dere yatağından gelen suyun bu sistemin içinden rahatlıkla geçebilmesidir. Ayrıca, oluk bariyerlere opsiyonel olarak enerji

sönümleyiciler de entegre edilebilmektedir. Bu durumda, düşen kayaların bariyere çarpmasıyla sistem vadi aşağısına doğru esneyerek genişler ve malzemenin etkin biçimde tutulması sağlanır (Hübl vd., 2009; Canelli vd., 2012; Tan vd., 2020).



Şekil 13. Sahada uygulanmış oluk bariyer görünümü

### 1.8.2.3. Yüze Dik Sabitlenmeyen Tel Ağ ile Yüze Örtülmesi

Aktif koruma yapılarında, çeşitli çelik ağ ve halatlar kullanılarak kaya bloklarının yerinde sabitlenmesine ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Öte yandan, pasif koruma yöntemlerinde ise kaya bloklarının çelik ağ içerisinde belirli bir mesafeye kadar hareket etmesine izin verilmekte; ancak ağın oluşturduğu engelle bu hareketin kontrolsüz hale gelmesi önlenmektedir (Şekil 14). Bu iki sistem arasındaki temel fark, koruma yapısında kullanılan çelik halat veya tel ağların ankrajlama şeklidir. Eğer ağ, yüze dik ankrajlarla sabitlenmişse bu sistem aktif koruma olarak tanımlanır. Ancak yalnızca üst ve alt bölgelerden ankrajlanmışsa, bu yapı pasif koruma sistemi olarak adlandırılmaktadır. Pasif koruma sistemlerinin temel amacı, geniş ve dik yamaçlardan düşen kaya bloklarının serbest şekilde yuvarlanmasını önleyerek, ağ içerisinde kontrollü bir biçimde düşmesini sağlamaktır. Aktif koruma sistemlerinde, ankrajlar kopan malzemeyi doğrudan tutar ve bu durum zamanla çelik ağlarda yamaç boyunca yorulmalara neden olur. Söz konusu yorulmalar, bazen ankrajların yerinden çıkmasına, bazen de ağlarda kopmalara yol açabilmektedir.

Bu tür olumsuzlukların önüne geçmek amacıyla, birçok kaya ıslahı uygulamasında pasif koruma olan tel ağ ile örtüleme sistemi tercih edilmektedir. Ayrıca, pasif koruma sistemlerinin etkinliğini artırmak için üst ve alt ankrajların sayısının artırılması ve çelik halatlarla sistemin güçlendirilmesi önerilmektedir. Pasif sistemler, aktif koruma

sistemlerinde olduğu gibi yüzeğe dik ankrajlama gerektirmediğinden bakım açısından daha kolay ve uygulama açısından daha pratiktir. Bu nedenle özellikle dik yamaçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sistemin en önemli dezavantajı, topuk ankrajları bölgesinde zamanla biriken malzemenin düzenli olarak temizlenmesi gerekliliğidir.



Şekil 14. Çelik tel ağ ile örtüleme örneği

#### **1.8.2.4. Kaya Tutucu Toprak Bariyerler-İstinat Yapıları**

Düşen kaya bloklarının belirli bir alanda durdurulması ya da yönünün değiştirilmesi amacıyla kullanılan yapılara genel olarak bariyer adı verilmektedir. Önceki bölümlerde, yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip esnek bariyer sistemlerine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Bunun yanında, ayrı bir enerji sönümleyici elemanı bulunmayan, nispeten rijit ya da sabit nitelikteki bariyerler de mevcuttur. Bu yapılar, klasik istinat duvarlarına benzer şekilde inşa edilmekte ve çoğunlukla betonarme, taş, çelik veya toprak gibi yapı malzemeleri kullanılarak farklı tiplerde uygulanmaktadır.

Klasik istinat yapıları esasen statik yanal yükleri karşılamak amacıyla tasarlanır. Ancak bu yapılar, kaya ıslahı kapsamında da kullanılabilir. Yapısal davranış özelliklerinden dolayı, genellikle çarpma enerjisinin düşük olduğu durumlarda tercih edilirler. Öte yandan, yüksek enerjili kaya düşmelerinde, özellikle büyük blokların etkili olduğu durumlarda, kaya tutucu toprakarme ve gabion yapıları ön plana çıkmaktadır. Günümüzde gabion duvarlar, inşaat ve maden mühendisleri tarafından kaya ıslah projelerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Kaya tutucu toprakarme bariyer sistemleri, içi toprak, taş ya da başka doğal malzemelerle doldurulan tel kafeslerden oluşur ve yüksek kinetik enerjili kaya bloklarına karşı etkili bir çözüm sunar (Oggeri ve Peila, 2000; Nomura vd., 2002; Ronco vd., 2009). Enerji sönmeme kapasiteleri, iç dolgu malzemesinin tane boyutunun küçülmesiyle artış göstermektedir. Bu nedenle, kaya ıslahı uygulamalarında genellikle ince taneli zeminlerden oluşturulan gabion duvarlar tercih edilmektedir. Bu tür yapılara aynı zamanda toprakarme bariyerler de denilmektedir (Lambert ve Kister, 2018).

Toprakarme bariyerler, yüksek enerjili ya da çoklu kaya düşmelerinde güçlü ve güvenilir performans göstermekte, düşük enerjili çarpmalarda ise bakım ya da onarım gerektirmeden işlevini sürdürebilmektedir (Ronco vd., 2009; Lambert ve Bourrier, 2013). Söz konusu bariyerlerin boyutları, çarpacak kaya bloklarının toplam kinetik enerjisine göre belirlenmekte olup, bu yönüyle esnek bariyerlere kıyasla daha avantajlı çözümler sunmaktadır (Hearn vd., 1996).

Kaya tutucu toprakarme bariyerler, klasik dik gabion duvarlardan farklı olarak yaklaşık 67° eğimde inşa edilmelidir (Peila vd., 2007; Lambert ve Bourrier, 2013). Uygulamada, gabion teller U şeklinde tabakalar halinde serilir ve içi sıkıştırılmış toprakla doldurulur. Toprağın erozyonunu önlemek amacıyla, kafes tellerin içine UV dayanımlı örtüler yerleştirilmekte; mümkünse bu örtüler hava ve su geçirgenliğine sahip olacak şekilde seçilerek, yapının üzerinin bitkilendirilmesine olanak sağlanmaktadır (Şekil 15). Toprakarme sisteminin 67° eğimini korumak amacıyla, uygulama sırasında sehpa ve hasırlı donatılar kullanılmaktadır. Sistem, içine yerleştirilen malzeme sayesinde ağırlık duvarı olarak çalışmakta ve yüzeyine serilecek nebati toprak ile birlikte püskürtme tohum (hydroseeding) yöntemi sayesinde doğaya uyumlu, çevre dostu bir yapıya dönüşmektedir.

Literatürde “Reinforced Embankments” olarak geçen bu tür yapılar yaygın olarak kullanılmakla birlikte, halen bu sistemler için standart bir boyutlandırma yönetmeliği veya kesin bir tasarım kriteri bulunmamaktadır. Bunun temel nedeni, dolgu malzemesi olarak kullanılan ince taneli zeminlerin nonlineer gerilme-şekil değiştirme davranışı göstermesi ve darbe etkisi altında büyük deformasyonlara maruz kalmasıdır. Bu nedenle, bu yapı sistemlerinin davranışlarını daha iyi anlamak adına, birçok araştırmacı tarafından tam ölçekli deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılmıştır (Ronco vd., 2009; Lambert ve Bourrier, 2009; Çelik, 2023).

Kaya ıslahı çalışmalarında gerek aktif gerekse pasif yöntem olarak kullanılan birçok çözüm yöntemi daha bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin kullanım sıklıkları yukarıda listede verilen yöntemlere nispeten daha azdır. Örneğin hasır donatı ile güçlendirilmiş püskürtme beton uygulamaları geniş yüzeyli yamaçlarda

uygulanmaktadır. Ancak hem görüntüsü hem de kullanım süresine bağlı olarak bazı bölgelerinde kopmalar yaşanması nedeniyle çok sık kullanılmamaktadır. Başka bir örnek olarak kaya önüne payanda yapıları kullanılan bir yöntemdir. Bu yapılarda çelik veya ahşap malzeme kullanıldığı gibi taşlardan veya topraktan seddeler de kullanılmaktadır. Buna göre düşme riski bulunan kayanın önüne tasarlanan payanda ile kaya bloğu desteklenmektedir. Bu yöntemlerin sayısı artırılabilir. Ancak belirtildiği gibi en sık kullanılan yöntemler yukarıda bahsedilen yöntemlerdir.



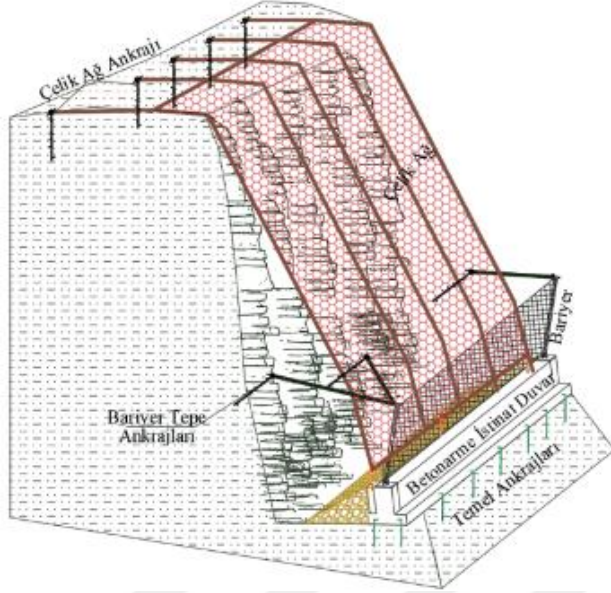
Şekil 15. Kaya tutucu toprakarme bariyer görünümü

### 1.8.3. Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Koruma ve Müdahale Yöntemleri

Kaya ıslahı çalışmalarında, bazı durumlarda birden fazla yöntemin birlikte kullanıldığı birleşik çözümler geliştirilmesi gerekebilir. Örneğin, yüksek eğimli bir şevde harekete geçen kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri fazla ise ve bu durum bariyer imalatlarını zorlaştırıyor ya da maliyeti artırıyorsa, Şekil 16'da görüldüğü üzere, yamaç çelik ağ ile kaplanarak sıçrama yüksekliği kontrol altına alınabilir. Böylece, yamacın alt kotuna yerleştirilecek esnek veya sabit bariyerlerle etkin ve bütüncül bir çözüme ulaşılabilir. Benzer şekilde, bariyer yapılacak bir yamaçta, bu yapıların bakım ve onarım ihtiyacını azaltmak amacıyla kontrollü kırım ve istifleme de yapılabilir. Bu tür birleşik çözüm önerileri, kullanılan yöntemlerin daha etkin çalışmasını sağladığı gibi riski de azaltmaktadır (Nasery ve Çelik, 2020).

Birleşik sistemler, sadece aktif veya sadece pasif yöntemlerin kendi içinde birlikte uygulanması şeklinde değil, aynı zamanda hem aktif hem de pasif koruma ve müdahale yöntemlerinin birlikte kullanılması yoluyla da gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin, belirli bir bölgede yalnızca birkaç riskli kaya bloğu diğerlerine göre belirgin şekilde daha büyükse ve tasarım bu büyük bloklara göre yapılırsa, projenin maliyeti ekonomik olmaktan çıkabilir. Ancak ortalama blok boyutuna göre bir enerji sönmüleyici bariyer

boyutlandırıldığında da bu, yeterli güvenlik sağlamayabilir. Bu tür durumlarda optimizasyon yapılarak büyük riskli bloklar kırma ve istifleme yöntemleriyle bertaraf edilebilir, ardından bariyer tasarımı ortalama blok boyutuna göre gerçekleştirilirse, hem ekonomik hem de güvenli bir çözüm elde edilmiş olur. Şekil 17’de, birleşik çözümlerin uygulandığı Assos Antik Limanı’ndaki kaya ıslahı uygulamasına ait görüntü yer almaktadır.



Şekil 16. Yamaçta pasif koruma yapısı olarak çelik tel ağ ve alt kotunda bariyer imalatı (Nasery ve Çelik 2020)



Şekil 17. Birleşik koruma yönetimlerinin uygulandığı kaya ıslahı projesi (Nasery vd., 2024)

## 2. POTANSİYEL KAYA DÜŞMESİ ALANLARININ BELİRLENMESİ

### 2.1. Arazinin 3D Sayısal Modelinin Oluşturulması

Kaya düşmesi riskinin ortaya konulabilmesi için yapılması gereken ilk ve belki de en önemli adım, arazinin doğru ve hassas bir şekilde haritalandırılmasıdır. Çünkü bu haritalar, gerçekleştirilecek tüm sayısal analizler ve mühendislik değerlendirmeleri için temel bir altlık oluşturmaktadır. Potansiyel kaya düşmesi alanlarında genellikle zorlu topografik koşullar hakimdir ve kaynak bölgelerde çok sayıda kaya bloğu bulunmaktadır. Bu durum, süreksiz ve riskli kaya kütlelerinin detaylı ve hassas biçimde tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, haritalama işlemlerinin farklı yöntemlerle gerçekleştirilmesi ve elde edilen verilerin birlikte değerlendirilerek bütüncül bir yorum geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Kaya düşmesi analizleri ile şev stabilite analizleri gibi jeoteknik değerlendirmelerde elde edilen sonuçların, doğrudan topografik kesitlere bağlı olduğu bilinmektedir. Bu da oluşturulacak arazi modelinin hassasiyetinin ne denli kritik bir öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, 1. derece arkeolojik sit alanı statüsüne sahip Konya ili Selçuklu ilçesinde yer alan Sille Vadisi'nin potansiyel kaya düşmesi riski ortaya konmuş; ardından çeşitli alternatif ıslah yöntemleri değerlendirilerek optimum çözüm yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ilk etabında, çalışma alanının arazi koşulları göz önünde bulundurularak dijital fotogrametrik alım yöntemi tercih edilmiş ve bu sayede arazinin hassas sayısal modeli oluşturulmuştur. Fotogrametrik veri alımı sırasında, Şekil 18'de gösterilen çalışma alanının sınırlarının ötesine geçilerek daha geniş bir alan kapsanmıştır. Veri toplama sürecinde, literatürde belirtilen hassasiyet kriterleri dikkate alınmış ve ölçüm kalitesi, bu standartlara uygun şekilde sağlanmıştır (Maraş ve Nasery, 2023).



Şekil 18. Çalışma alanının Google Earth üzerindeki görünümü (URL-5)

### 2.1.1. Yer Kontrol Noktalarının Belirlenmesi ve Ölçümleri

Arazinin hassas ve detaylı 3 boyutlu sayısal modelini hazırlamak için ilk etapta fotogrametrik ilkeler doğrultusunda, araziye homojen dağılımdaki 9 adet yer kontrol noktasının tesisi gerçekleştirilmiştir (Şekil 19). Bu noktalar tesis edilirken fotogrametrik çekim sırasında rahatlıkla görülebilmesine, resimlerde bu noktaların görülmesini engelleyecek ağaç ve bina gibi doğal ve yapay nesnelere uzak olmasına ve Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği'nde (BÖHHBÜY) belirtilen hususlara dikkate edilmiştir (Şekil 20).



Şekil 19. Yer kontrol noktalarının arazi üzerindeki dağılımı



Şekil 20. Yer kontrol noktalarının arazideki işaretlemeleri

Noktaların koordinat alımı gerçekleştirilirken çalışma bölgesinin üstü açık arazi olduğu için CORS (GNSS alıcısı) cihazı alım için uygun görülmüştür. GNSS CORS Cihazı(Uydu bazlı hassas konum belirleme sistemi) alıcısı ile kısa bir denemeden sonra noktaların alımına başlanmıştır. Yer kontrol noktalarının (SATLAB S1500) tipi GNSS alıcısı ile 2 cm hassasiyetinde konum ölçmeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 21). Fotogrametrik çekim için tesis edilen 9 adet yer kontrol noktalarının koordinatları yersel ölçümlerle ölçülmüş olup Tablo 1’de verilmiştir.



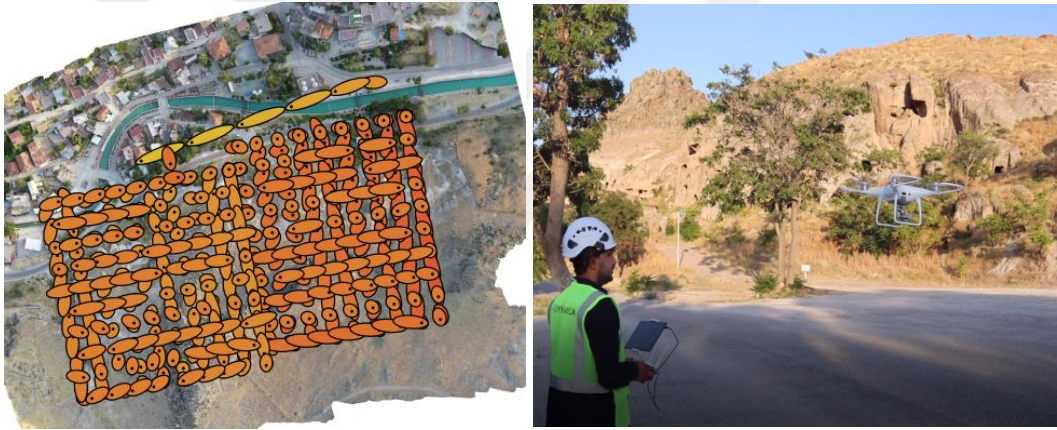
Şekil 21. CORS (SATLAB S1500) GNSS alıcısı cihazı ve YKN ölçümleri

Tablo 1. Ölçülen yer kontrol noktalarının 3 derecelik dilimde GRS80 Elipsoidi üzerinde ITRF96 datumundaki koordinatları.

Nokta No	Y	X	Z
p1	448870.34	4199410.22	1261.07
p2	448922.24	4199413.38	1288.96
p3	449025.97	4199511.41	1243.80
p4	449028.57	4199449.04	1294.45
p5	449054.56	4199528.66	1229.63
p6	449076.74	4199477.13	1255.46
p7	448954.72	4199535.75	1228.38
p8	448839.20	4199450.72	1237.25
p8	448839.19	4199450.71	1237.26
p9	448957.27	4199479.14	1258.79

### 2.1.2. Fotogrametrik Veri Alımı

İkinci etapta uçuş hazırlıkları olarak uçuş planı ve uçuş saati belirlenmiştir. Çalışma alanındaki yamaçta keskin kot farkları olduğu için güneşin mevcudiyetinde çekim yapıldığı zaman, gölgeleme etkisinin kaçınılmaz olduğu anlaşılmış ve uçuş için en uygun saat sabah güneş doğmadan saat 5:30 ile 8:30 arası ve akşam güneş batımı öncesinde saat 16:30-19:30 arası seçilmiştir. Uçuş planı hazırlanırken arazinin tamamını kapsayacak ve 3D modellemek için gerekli olan çift yönlü grid sistemi kullanılmıştır. Uçuş planının hazırlanmasında BÖHHBÜY yönetmeliğinde minimum %60 bindirme oranları dikkate alınarak daha hassas bir model elde edebilmek için %90 bindirmeli olarak planlanmıştır. Uçuş yüksekliği ise manuel olarak bir deneme uçuşu gerçekleştirildikten sonra İHA'nın yamaçlara çarpmadan en yakın yüksekliği olan 105m olarak belirlenmiştir (Şekil 22). Uçuşun yamaçlara yakın olması ise detayların daha hassas elde edilebilmesini sağlamıştır.



Şekil 22. Deneme uçuşu ve fotogrametrik uçuş planı

Saha çalışması, fotogrametrik prensipler temel alınarak, arazinin fiziksel koşullarına en uygun uçuş planı doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, Dynamica tarafından kullanılan DJI Phantom 4 PRO modeline ait dört pervaneli bir insansız hava aracı (İHA) tercih edilmiştir. Bahsi geçen cihaz, 20 megapiksel çözünürlükte 4K kalitesinde görüntü elde edebilen ve 1 inç boyutundaki CMOS sensörü sayesinde 11.6 stop genişliğinde dinamik aralık sunan gelişmiş bir kamera sistemine sahiptir (Şekil 23). Bu yüksek dinamik aralık, özellikle aşırı ışık kontrastlarının bulunduğu sahalarda oluşabilecek “patlama” etkilerini minimize ederken, uçuş sırasında oluşabilecek hareket kaynaklı “jöle etkisi” olarak bilinen görüntü bozulmalarını da büyük ölçüde engellemektedir (Nasery, 2021). Ayrıca, cihazın lens diyaffram açıklığının manuel

olarak ayarlanabilir olması, kullanıcıya ışık koşullarına göre optimum görüntü kontrolü imkanı sunmaktadır.

Bu teknik donanım ve özellikler, fotogrametrik uygulamalarda karşılaşılabilecek ışık saçılması (aberasyon), ışın yönelme hataları ve geometrik bozulmaları (distorsiyon) en aza indirerek, yer kontrol noktalarının (YKN) ve diğer arazi unsurlarının net biçimde algılanmasını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, bu sistem sayesinde daha yüksek doğrulukta, sağlıklı ve güvenilir mekansal veriler elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 23. Phantom 4 PRO tipi Dynamica insansız hava aracı kamerası

Çekim yukarıda bahsedilen Phantom 4 PRO tipi DYNAMİCA insansız hava aracı ile gerçekleştirilmiştir. Toplam oblik ve nadir olmak üzere 1375 adet yüksek çözünürlüklü fotoğraf çekilmiştir. Çekim arazinin geometrisi gereği karşıdan yapılmış ve arazi spesifik bir geometriye sahip olduğu için, bütün detayların modelde çıkması için yarı otomatik uçuş da gerçekleştirilmiştir (Şekil 24).



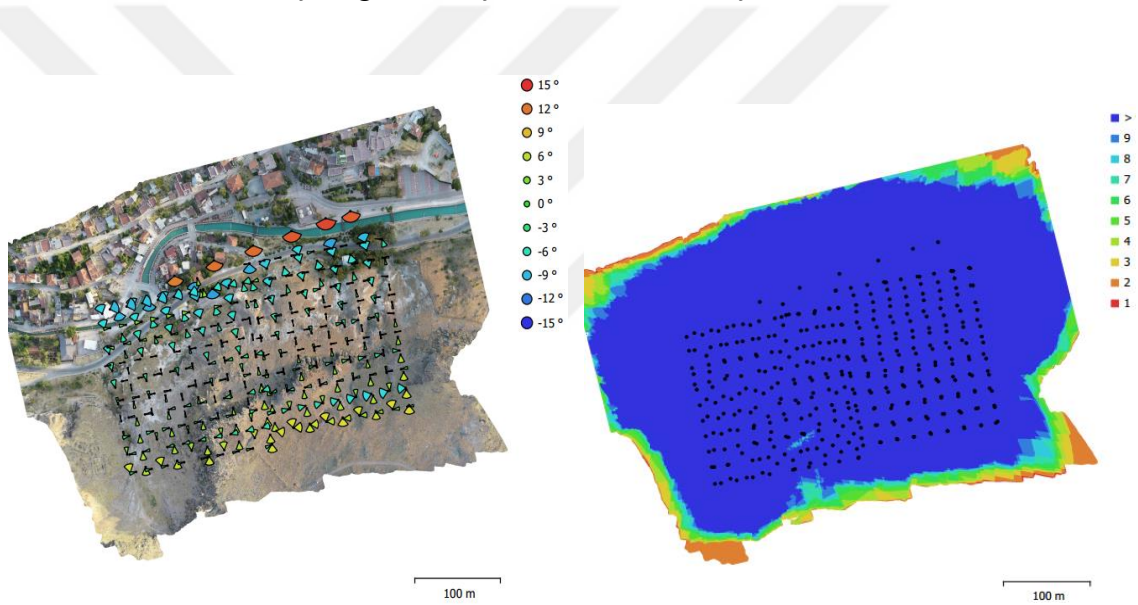
Şekil 24. 4 pervaneli Phantom 4 Pro tipi Dynamica insansız hava aracı ile fotogrametrik çekim

### 2.1.3. Veri İşleme

Yapılan fotogrametrik çalışma sonucunda elde edilen hava fotoğrafları, yer kontrol noktalarının yüksek doğruluklu konum bilgileri ile desteklenerek stereoskopik (üç boyutlu uzaysal) değerlendirme tekniğiyle analiz edilmiştir. Bu analiz yöntemi sayesinde uçuş alanına ait yüzey morfolojisi hem görsel formu hem de sayısal geometri verileriyle

dijital ortamda yeniden modellenmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde kullanılan 9 adet yer kontrol noktası, TUSAGA-Aktif sistemi aracılığıyla ulusal koordinat sistemine entegre edilmiştir. Bu noktalar, GRS 1980 elipsoidi referans alınarak, 33. dilime karşılık gelen 3° Türkiye Ulusal Projeksiyon Sistemi (EPOK 2005) kapsamında, ITRF96 datumuna göre EPSG:5256 kodlu sistemde ölçülmüş ve işlenmiştir. Çekim esnasında kullanılan kameranın kalibrasyon verileri, piksel başına yansıma-absorbsiyon özellikleriyle birlikte değerlendirilmiştir.

Fotogrametrik ilkelere göre çekilen hava fotoğraflarındaki enine bindirme %90 ve boyuna bindirme ise %90 oranında olmakta olup kaya düşme analizlerinde kullanılacak olan hassas 3 boyutlu sayısal arazi modeli istenen detayları verebilecek niteliktedir. Veri işleme süreci sonrasında oluşturulan modelde, arazide çekilen fotoğrafların konumları ve bindirme oranlarına ilişkin görseller Şekil 25'te sunulmuştur.



Şekil 25. Çekilen fotoğrafların arazide konumları ve bindirme oranları

Çalışma alanının 2.89 cm/pix çözünürlükte ortofoto, nokta bulutu, bu nokta bulutundan da araziye ait 3D stereoskopik ve dolayısıyla optik modelleri üretilmiştir. Üretilen modellerde kullanılan yer kontrol noktalarının hassasiyeti 0.005 m olarak tespit edilmiştir. Oluşturulan modeldeki noktalar ile ölçülen yer kontrol noktaları arasındaki hata payı Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre X yönündeki sapma 3.06 cm, Y yönündeki sapma ise 3.67 cm ve Z yönündeki sapma ise 6.92cm olarak hesaplanmıştır. Budenli yoğun kayalık bir topografya için elde edilen hassasiyet oldukça yüksek olup kaya düşme analizlerinde ve şev stabilite analizlerinde ve koruma yapıların statik hesaplamalar için doğru bir altlık oluşturabilmektedir. Oldukça yoğun kayalık bir topografyaya sahip alanda elde edilen hassasiyet seviyesi oldukça yüksek olup; bu durum, kaya düşme analizleri,

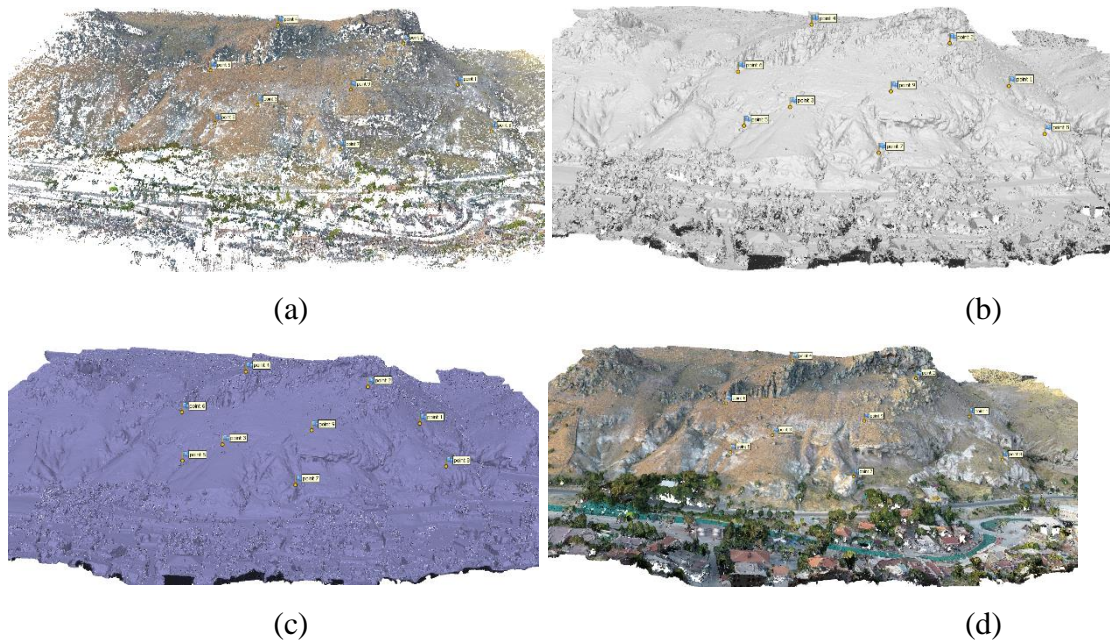
şev stabilite değerlendirmeleri ve koruma yapılarına ait statik hesaplamalar için güvenilir bir altlık oluşturmaktadır.

Tablo 2. Elde edilen model ile yer kontrol noktaları arasındaki ortalama sapma değerleri.

Kod	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Toplam (cm)	Fotoğraf (pix)
P.1	-1.40335	1.96615	-1.35384	2.76912	0.513 (39)
P.2	2.65124	5.33392	-10.1638	11.7806	0.331 (25)
P.3	-0.114286	-0.112126	5.1531	5.15559	0.550 (41)
P.4	3.21212	6.62502	3.61476	8.20214	0.669 (16)
P.5	-1.39635	-5.07431	-12.5972	13.6524	0.293 (59)
P.6	4.39314	-2.4238	2.67832	5.68752	0.397 (44)
P.7	-5.47659	-2.01643	7.13859	9.22055	0.354 (66)
P.8	-3.38301	-1.73892	-2.52255	4.5642	0.400 (47)
P.9	1.52236	-2.51367	7.98573	8.50929	0.530 (32)
Toplam	3.06112	3.67048	6.92591	8.41493	0.433

#### 2.1.4. Nokta Bulutunun Oluşturulması

Veri işleme yapıldıktan sonra yer kontrol noktalarının dengeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik çekimden oluşturulan nokta bulutu global koordinat sistemine entegre edildikten sonra çalışma alanının nokta bulutu oluşturulmuştur. Çalışma alanı için oluşturulan model toplam 97420803 adet nokta sayısını içeren koordinatlı nokta bulutundan oluşturulmuştur. Üretilen 3 boyutlu arazi modeli uluslararası ve ulusal koordinat sistemlerine oturtulmuştur. Böylece sayısal arazi model sınırları içerisinde istenen herhangi bir noktanın global koordinatları alınabilmektedir. Çalışma alanına ait nokta bulut modelleri Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. Modellenen arazinin (a) (b) (c) ve (d) nokta bulut modeli

### 2.1.5. Üç Boyutlu sayısal Yüzey Modelin Oluşturulması

Nokta bulutu oluşturulduktan sonra noktalar arası meshleme yapılarak arazinin üç boyutlu sayısal modeli oluşturulmuştur. Arazinin 3D sayısal modeli toplam 50000000 yüzeyden oluşturulmuştur. Nokta bulutu modeli kullanılarak çalışma alanının 2.89 cm/pix çözünürlükte ortofoto, araziye ait 3D Stereoskopik ve dolayısıyla Optik modeli üretilmiştir. Şekil 27’de çalışma alanına ait Texture kaplanmış 3D modelin prespektif görünümü ve eş yükselti eğrilerin görünümleri verilmiştir. Oluşturulan ortofotonun ölçeksiz hali ise Şekil 28’de gösterilmiştir.



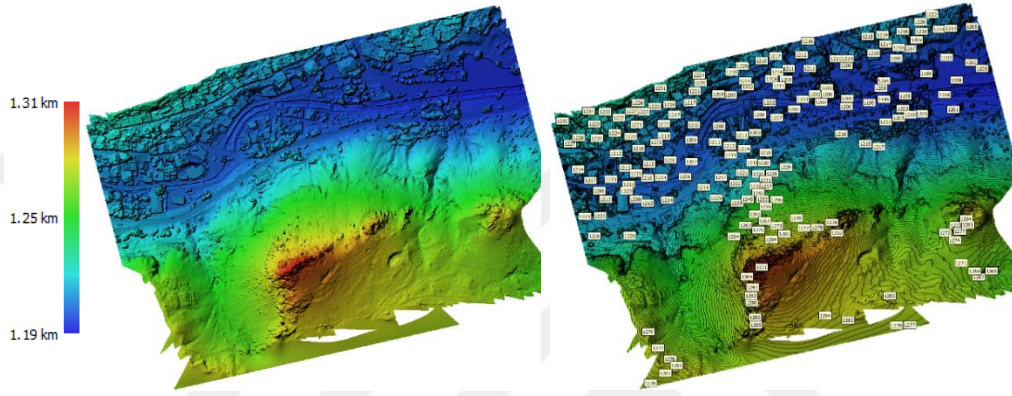
Şekil 27. Texture kaplanmış 3 boyutlu arazi modelinin genel perspektif görünüşü



Şekil 28. 2.89 cm/pix hassasiyetinde oluşturulan ortofoto

### 2.1.6. Sayısal Yükseklik Modelin Oluşturulması

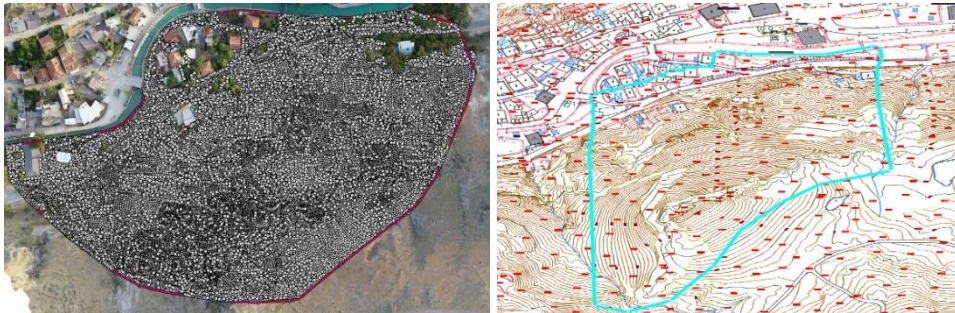
Oluşturulan nokta bulutu ve 3B sayısal modele altlık teşkil edecek vektör veriler derlenmiş; bu verilerden sayısal yükseklik modeli (SYM) ve eş yükselti eğrileri üretilmiştir. Arazinin sayısal yükseklik modeli ile eş yükselti eğrilerine ait görünüm ise Şekil 29'da sunulmuştur. Bu sayede, kaya düşmesi analizleri, şev stabilite analizleri ve limit denge analizleri için gerekli olan her türlü enkesit ve boykesit üretilebilecek hassasiyette bir model elde edilmiştir. Oluşturulan sayısal yükseklik modelinin hassasiyeti 5.45 cm/piksel olarak hesaplanmıştır.



Şekil 29. Arazinin sayısal yükseklik modelleri

### 2.1.7. Halihazır Haritanın Oluşturulması

Çalışma alanının nokta bulutu, 3D sayısal modeli ve sayısal yükseklik modelleri oluşturulduktan sonra, 3D ve ortofoto modelleri sayısallaştırılarak kayalık bölgenin vektörel halihazır haritası oluşturulmuştur (Şekil 30). Oluşturulan halihazır haritanın doğruluğu mevcut olan bölgenin hali hazır haritası ile karşılaştırıldıktan sonra teyit edilmiştir. Dolayısıyla, 3B sayısal model üzerinde çizilecek çelik bariyer, örtüleme, toprakarme gibi önlem yapıları gerçek koordinatlı olarak modellenmekte; bu sayede uygulamaya yönelik hatların aplikasyon verileri doğrudan 3B model üzerinden alınarak arazide hassas bir şekilde applike edilebilmektedir.



Şekil 30. Çalışma alanına ait hazırlanan sayısallaştırılmış ve halihazır haritalar

## 2.2. Jeolojik-Geoteknik Çalışmalar

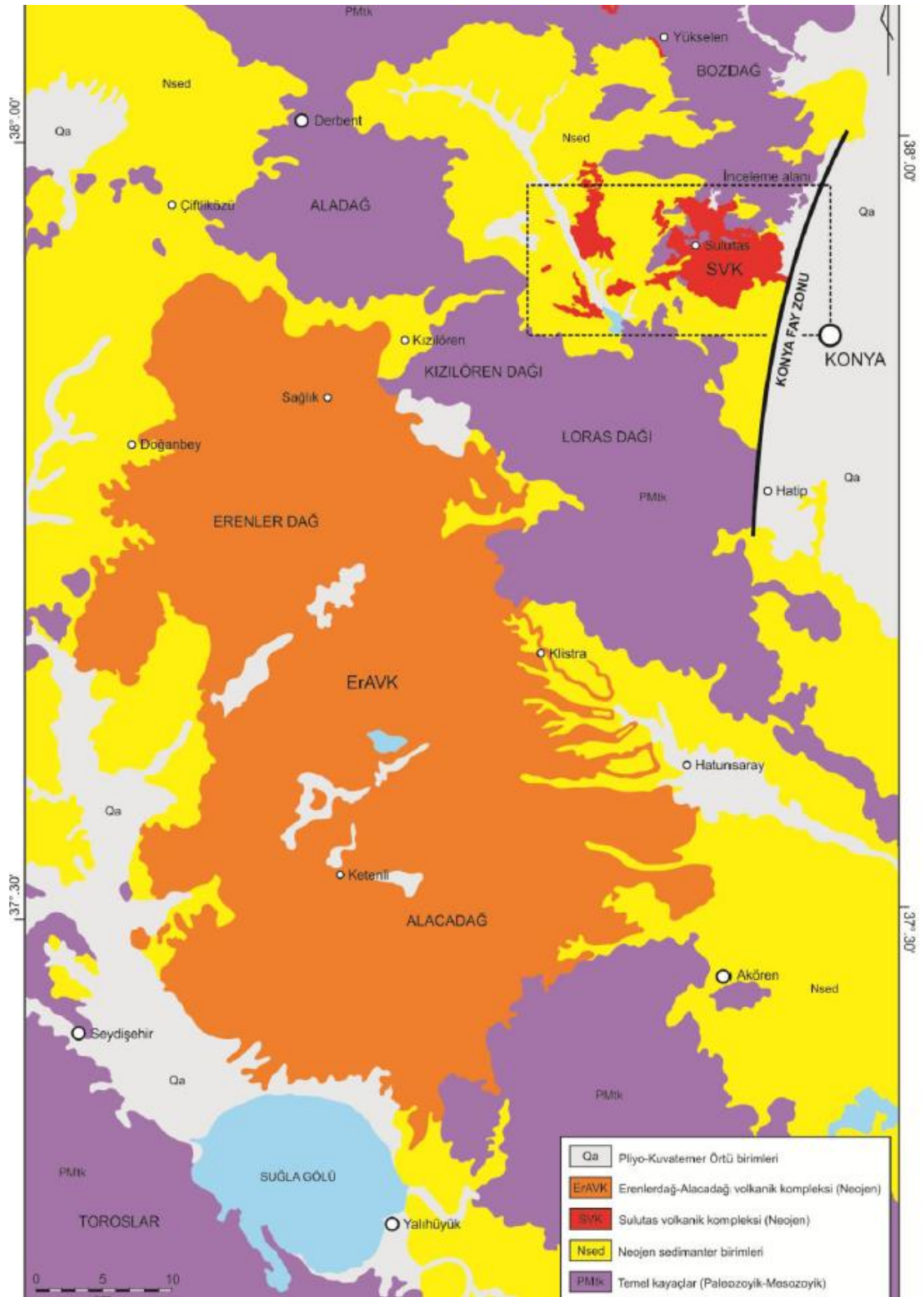
### 2.2.1. Genel Jeoloji

Konya ve çevresinde yüzeyleyen Miyosen-Pliyosen dönemine ait volkanik kayalar (Şekil 31), Orta Anadolu Volkanik Provensi'nin güneybatı ucunda yer almakta olup, bu provens Kayseri, Nevşehir, Niğde ve Aksaray illerini kapsayan geniş bir alanı içermektedir. Bu volkanik birimler, Sille (Konya) bölgesinde yayılım gösteren ve Sulutaş Volkanik Kompleksi (SVK) olarak adlandırılan kalk-alkalen nitelikli lav akıntıları ve domları ile birlikte piroklastik düşme ve akma ürünlerinden (ignimbiritler) meydana gelmekte ve eski bir dalma-batma zonuyla ilişkilendirilmektedir (Temel vd., 1998; Kurt vd., 2003). Araştırma sahası ve çevresindeki birimlerin stratigrafik kolon kesiti Şekil 32'de sunulmuş olup, çalışmada incelenen litolojiler Neojen yaşlı Sulutaş Volkanitlerinden türeyen andezitik tuf, dasitik tuf ve breşlerden oluşmaktadır.

#### 2.2.1.1. Sulutas Volkanik Kompleksi

Eren (1993) tarafından yapılan çalışmalara göre, Sulutas Volkanik birimi ağırlıklı olarak Sille ve Küçükmuhsine mahallelerin çevresinde yayılım göstermekte olup, çalışma sahasının çeşitli bölgelerinde de rastlanmaktadır. Renk olarak genellikle beyaz, gri ve pembe tonları gözlenirken, bazı bölümlerde belirgin ince veya kalın tabakalanmalar ile sedimanter yapı izleri dikkat çekmektedir. Litolojik açıdan bakıldığında, bu birim; ayrışma, erozyon ve taşınım süreçlerinin ürünü olan, volkanik kökenli, orta sertlikte ve ince taneli malzemelerden meydana gelmiştir. Yaşlandırma çalışmaları doğrultusunda, birimin Geç Miyosen ile Erken Pliyosen dönemleri arasında oluştuğu belirlenmiştir (Eren, 1993).

Sulutaş Volkanik Kompleksi içerisinde inceleme alanı Sille Vadisi ve civarında üst kotlarda andezitik tüfler, daha alt kotlarda dasitik breşler ve en altta ise makroskobik olarak dasitik özellik gösteren tüfler yayılım göstermektedir (Şekil 33). İnceleme alanında kaya düşme potansiyeli yüksek olan birim andezitik tüfler olup, ayrılmış ve eklemli özellik göstermesi açısından zirve kısımlarda (Sille Vadisi yerleşkesinin güneyinde) düşmüş ve düşme potansiyeli yüksek bloklar içermektedir (Şekil 34). Görüldüğü üzere, hem düşmüş hem de düşme riski taşıyan kaya bloklarının ortalama hacmi 5–6 m<sup>3</sup> civarındadır. Bu bloklar düştüklerinde yamaç boyunca yüksek hızlara ulaşarak, alt kısımdaki yerleşim alanlarında ciddi can ve mal güvenliği tehditleri oluşturmaktadır.



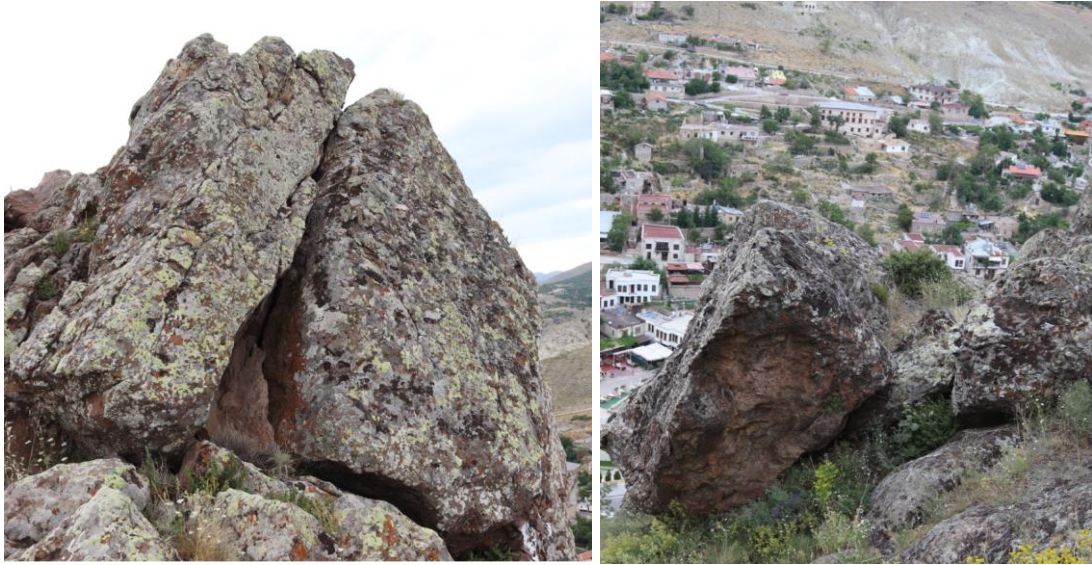
Şekil 31. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeolojik haritası (Keller vd., 1977; Eren 1993; 1996; Özkan, 1998; MTA, 2002 ve Gündüz, 2017)

ÜST SİSTEM	SİSTEM	SERİ	BİRİMLER	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR VE SİMGELER
SENOZOYİK	Kuvaterner	Pliyosen Holosen	Örtü Birimleri		Az tuturulmuş veya hiç tutturulmamış konglomera, kumtaşı, çakıltaşı ve çamurtaşı (NQç/Qa)
				Neojen sedimantleri	
PALEOZOYİK-MESOZOYİK	Devoniyen-Kretase	-	Temel		SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ
				Dasitik lav akıntıları ve domlar (Nsud2) 12.07±0.06-13.17±0.67 My	
SENOZOYİK	Neojen	Miyosen-Pliyosen	SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ		Blok-kül akma çökelleri (Nsup3)
					Kaynaklaşmamış ignimbirit (Nsup2)
SENOZOYİK	Neojen	Miyosen-Pliyosen	SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ		Andezit daykı (Nsua)/12.86±0.22 My
					Blok-kül düşme çökelleri (Nsup1)
SENOZOYİK	Neojen	Miyosen-Pliyosen	SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ		Epivolkanoklastik çökeller/Tüfit (Nt)
					Bazaltik sil/lav akıntısı (Nsub)/12.55±1.12 My
SENOZOYİK	Neojen	Miyosen-Pliyosen	SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ		Konglomera, killi kireçtaşı, stramatoliti kireçtaşı ve marn (Nsed)
					Kısmen ayrılmış durumda porfirik dokulu dasit (Nsud1)
PALEOZOYİK-MESOZOYİK	Devoniyen-Kretase	-	Temel	SULLUTAS VOLKANİK KOMPLEKSİ	— Açılı Uyumsuzluk —

Şekil 32. Çalışma alanı ve yakın çevresinin geliştirilmiş dikme kesiti (Gündüz, 2017)



Şekil 33. İnceleme alanında yayılım gösteren volkanik kayaçlar (a) andezitik tuf, (b) dasitik breş ve (c) dasitik tuf



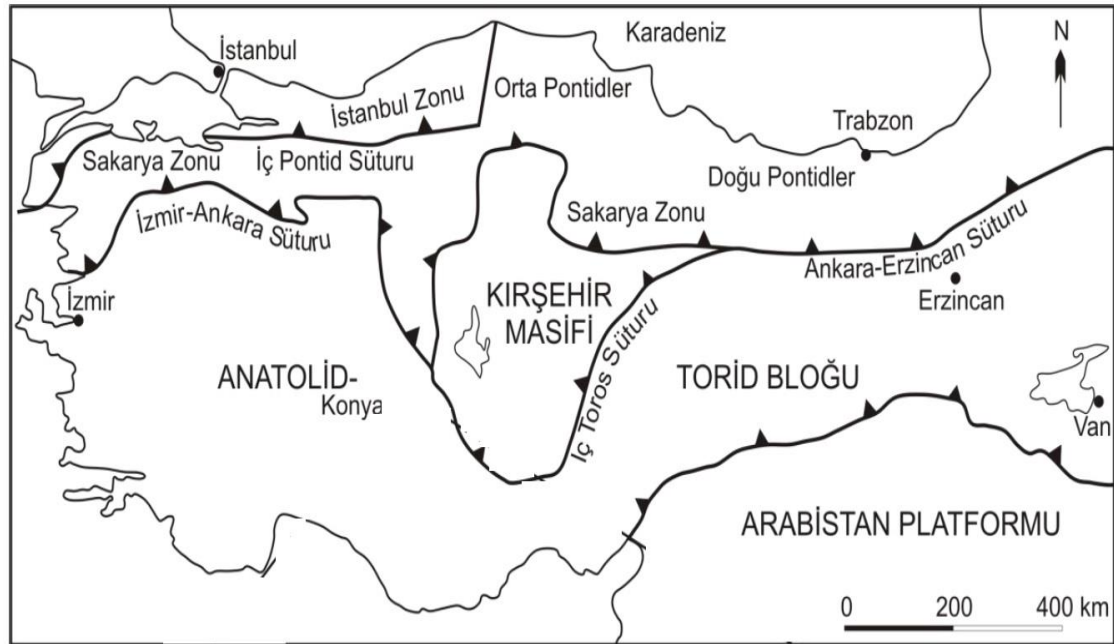
Şekil 34. İnceleme alanındaki düşmüş ve düşme olasılığı yüksek bloklar.

### 2.2.2. Yapısal Jeoloji ve Tektonik

İnceleme sahasında gözlemlenen ve stratigrafik özellikleri tanımlanan birimler, farklı dönemlerde etkili olmuş orojenez süreçlerinin etkisiyle kıvrımlanmış ve faylı bir

yapı geliştirmiştir. Bu bölge, Ketin (1966) tarafından tanımlanan Toridler Ana Tektonik Birliği'nin Orta Toroslar segmenti içerisinde yer almaktadır. Sahadaki jeolojik birimler, Alpin orojenezinin etkisiyle kıvrımlı ve kırıklı bir yapı kazanmıştır. Temel litolojiyi oluşturan Kızılören ve Lorasdağı formasyonlarında gözlenen doğu-batı yönelimli kıvrımlar ile bu birimlerle Üst Miyosen–Alt Pliyosen yaşlı çökeller arasındaki açısal uyumsuzluk, Alpin orojenik evrenin etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu orojenez sürecinin sona ermesinin ardından bölge, şengör (1980) tarafından tanımlanan Neotektonik döneme girmiştir. Bu genç tektonik dönem, Eren (1993) tarafından da belirtildiği üzere, Üst Miyosen–Pliyosen yaşlı birimleri etkileyerek ilk yerleşim konumlarını değiştirmiştir.

Konya'nın Sille-Tatköy kuzeyinde, Bozdağlar masifi içerisinde konumlanan çalışma sahası, Ketin (1966) tarafından Anatolidler içerisinde; Özgöl (1976) tarafından ise Toridler içindeki Bolkardağı Birliği kapsamında değerlendirilmiştir. Okay ve Tüysüz (1999) ise bu alanı, Anatolid-Torid bloğu üzerinde yer alan Afyon Zonu dahilinde sınıflandırmaktadır (şekil 35).



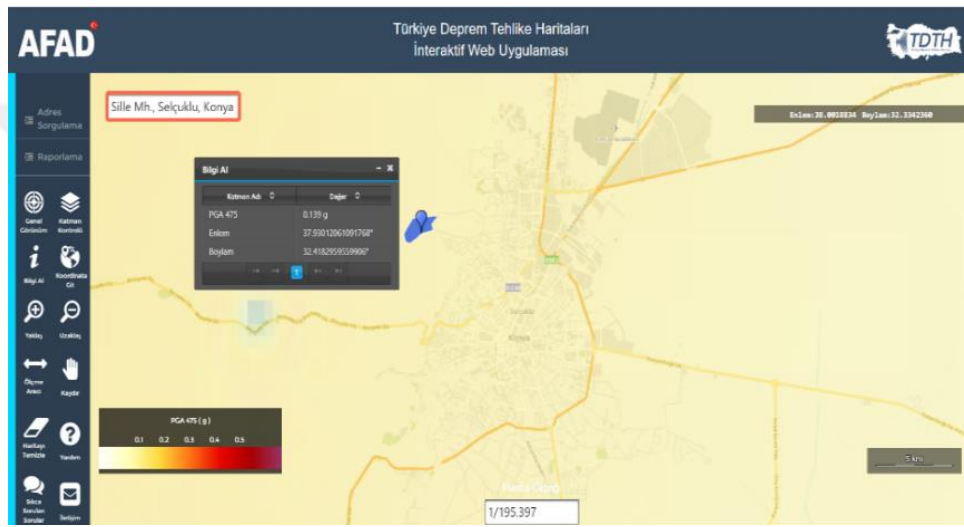
şekil 35. Türkiye'nin tektonik birlikleri (Okay ve Tüysüz, 1999)

### 2.2.3. Doğal Afet Tehlikeleri

İnceleme alanında eklemli andezitik tüf ve breşlerden oluşan kaya kütleleri mevcut olup, yüksek eğim ve kaya kütlelerinin 3 adet eklem seti içermesi sebebiyle potansiyel kaya düşme riski olan bölgeler mevcuttur. Yamaç ıslahı yöntemleri olan kazı, kaya kırımı ve

sabitlenme gibi uygulama esnasında yapılacak herhangi bir olumsuzluk oluşturacak olayın meydana gelememesi için gerekli tedbirler alınmalıdır.

Çalışma alanının etkin yer ivme değeri, Türkiye Deprem Tehlike Haritasından (URL-6) elde edilmiş olup, DD2 deprem düzeyinde maksimum yer ivmesi değeri 0.139 g olarak belirlenmiştir (Şekil 36). Çalışma alanı için yapılacak stabilite analizlerinde etkin yer ivmesi dikkate alınarak statik ve sismik yük durumunda şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca inceleme alanının Türkiye aktif deprem haritasındaki yerini belirtmek amacıyla AFAD (2018) tarafından güncellenen deprem tehlike haritası Şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 36. Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen Sille (Konya) bölgesine ait harita (URL-6)



Şekil 37. Türkiye deprem tehlikesi haritası (URL-6)

#### 2.2.4. Kaya Malzemelerinin Jeomekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

İnceleme alanında yayılım gösteren birimlerin jeomekanik özellikleri ISRM (2007) deney standartları dikkate alınarak, araziden derlenen blok örnekler laboratuvarında deney yapılacak standartlara getirilerek (Şekil 38) (karot, küp) hazırlanmış ve deneyler Gümüşhane Üniversitesi Kaya Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Derlenen blok örnekleri andezitik tuf, dasitik breş ve dasitik tuf birimlerine ait olup, deney standartlarına uygun hale getirilen örneklerde birim hacim ağırlık, tek eksenli sıkışma dayanımı, nokta yükü dayanım indeksi, brazilian çekme dayanımı, süreksizliklerde makaslama dayanımı deneyleri yapılmıştır. Her bir jeolojik birime ait deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İnceleme alanındaki birimlerin jeomekanik özellikleri.

Jeolojik Birim	Tek eksenli sıkışma dayanımı, $\sigma_c$ (MPa)	Nokta Yükü Dayanım İndeksi, $I_{s(50)}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Brazilian Çekme Dayanımı (MPa)	Birim hacim ağırlık, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Andezitik Tuf	50.00		0.90	17.50
Dasitik Breş	58.95		1.20	22.30
Dasitik Tuf	67.00		1.68	28.15
<b>Ortalama</b>	<b>58.65</b>	<b>-</b>	<b>1.26</b>	<b>22.65</b>
Dasitik Breş	1.80	0.70	0.10	10.20
Dasitik Breş	2.40	1.05	0.15	14.30
Dasitik Breş	3.51	1.43	0.35	19.24
<b>Ortalama</b>	<b>2.57</b>	<b>1.06</b>	<b>0.2</b>	<b>14.58</b>
Dasitik Tuf	2.90	1.6	0.10	12.5
Dasitik Tuf	3.60	2.7	0.30	16.10
Dasitik Tuf	4.6	4.04	0.47	20.60
<b>Ortalama</b>	<b>3.70</b>	<b>2.78</b>	<b>0.29</b>	<b>16.40</b>



Şekil 38. İnceleme alanından derlenen blok örneklerinin laboratuvarında deney standartlarında hazırlanması ve bazı jeomekanik deneyler

### 2.2.5. Süreksizliklerin Mühendislik Özellikleri

İnceleme alanında üç farklı kaya kütlesi yüzeyleme vermekte olup, bunlardan andezitik tüfler ve dasitik breşlerde süreksizlik özellikleri gelişmiş olup, dasitik tüfler genellikle domlar ve akma yapıları şeklinde oluşmuş olup, süreksizlik içermemektedir. Süreksizliklerin mühendislik özellikleri, literatürde en yaygın kullanılan Priest ve Hudson (1976) ve uluslararası kaya mekaniği topluluğu (ISRM, 2007) tarafından kabul edilmiş olan hat etüdü yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Arazi çalışmaları sırasında andezitik tüf ve breşlerde belirlenen lokasyonlarda hatlar çekilerek süreksizliklerin yönelim, ara uzaklık, açıklık, devamlılık, pürüzlülük, ayrışma derecesi, su durumu, dolgu ve süreksizlik sıklığı özellikleri belirlenmiştir (Şekil 39).



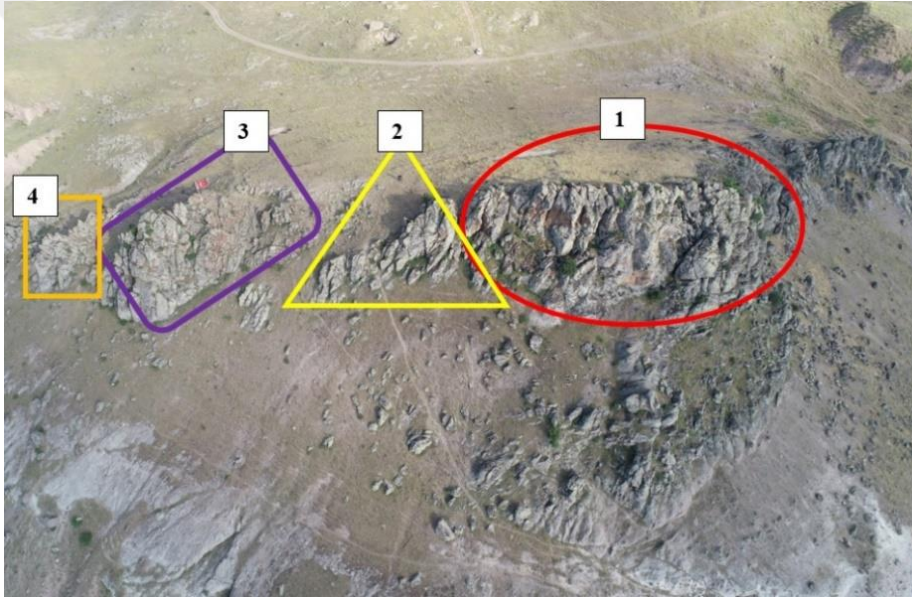
Şekil 39. İnceleme alanında hat etüdü çalışmaları ve süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi

#### 2.2.5.1. Süreksizliklerin Yönelimi

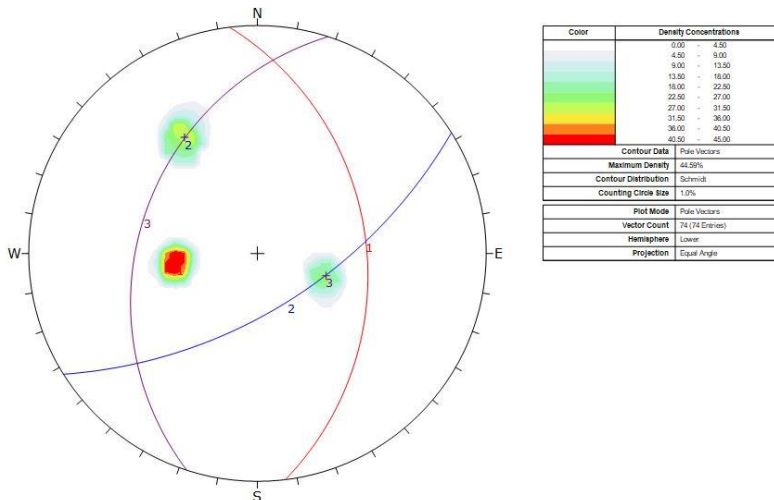
Mühendislik uygulamaları kapsamında süreksizlik setlerinin sayısını ve baskın yönelimlerini tespit edebilmek amacıyla, kutup noktalarının ekvatorial eş-alan stereonetine aktarılmasıyla kontur diyagramları oluşturulmaktadır.

Süreksizlik setlerinin sayısının ve bunların ağırlıklı yönelimlerinin belirlenmesi ve mühendislik uygulamalarında değerlendirilmesi amacıyla, ekvatorial eş-alan stereonetine işlenen kutup noktalarından yararlanılarak, kontur diyagramları hazırlanmaktadır.

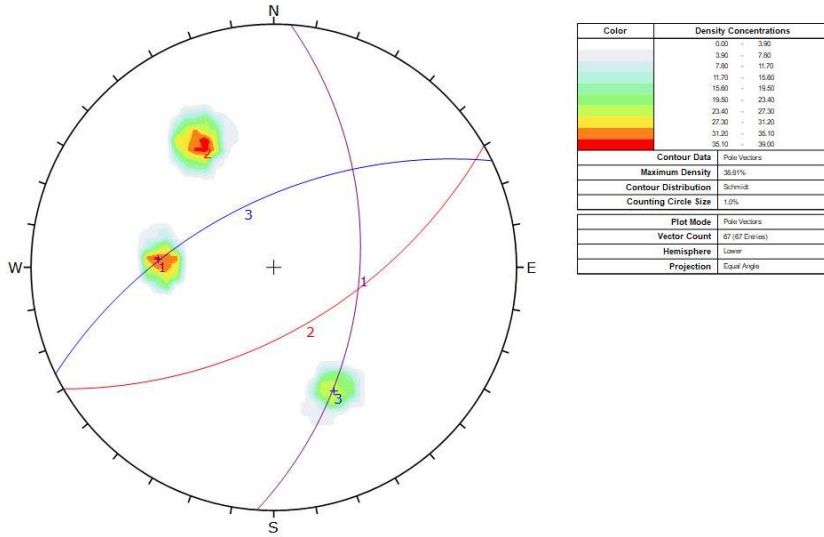
Bu çalışmada, andezitik tüf ve dasitik breş kaya kütlelerine ait ana süreksizlik setleri ile bu setlerin yönelimleri belirlenmiş ve Dips v8.0 (Rocscience, 2020) yazılımı kullanılarak kontur diyagramları hazırlanmıştır. Andezitik tüfler, arazi koşullarına göre dört bölgeye ayrılmış ve her bölge ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Şekil 40-44). Eklem setleri ile şev yönelimlerine ilişkin veriler ise Tablo 4'te sunulmuştur. Dasitik breşler ise genel olarak değerlendirilmiş olup, bu kayalara ait kontur diyagramları Şekil 45'te verilmiştir. Ayrıca, dasitik breşlere ait eklem setleri ve şev yönelim bilgileri Tablo 5'te yer almaktadır.



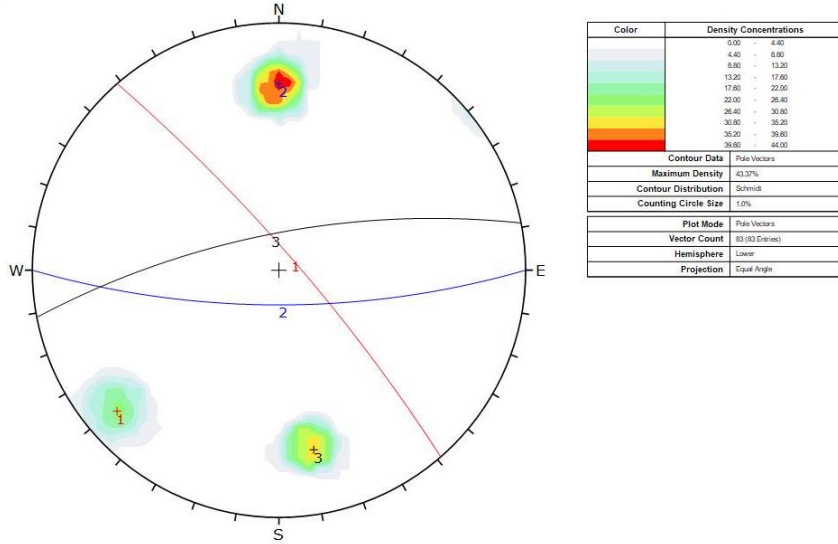
Şekil 40. İnceleme alanında Andezitik tüflerin bölgeleştirilmesi



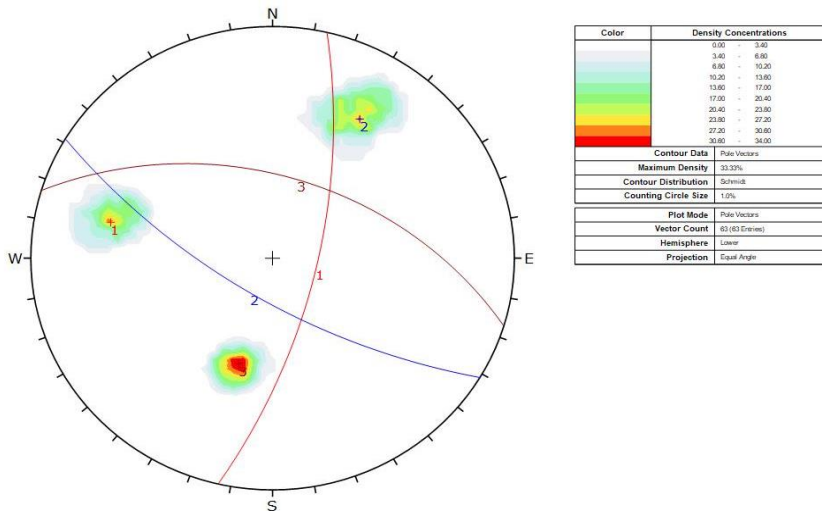
Şekil 41. Andezitik tüf kaya kütlelerinde 1. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı



Şekil 42. Andezitik tuf kaya kütlelerinde 2. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı



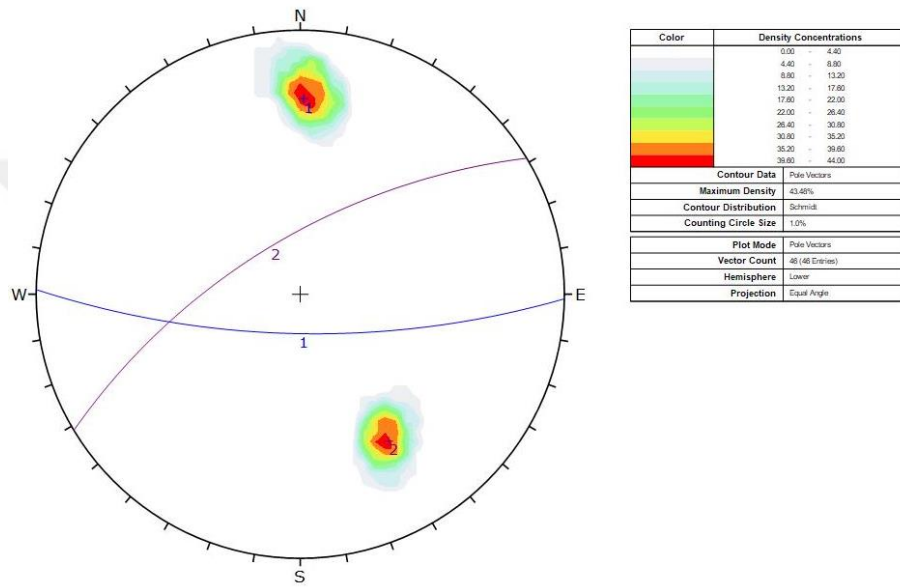
Şekil 43. Andezitik tuf kaya kütlelerinde 3. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı



Şekil 44. Andezitik tuf kaya kütlelerinde 4. Bölgeye ait eklem setlerinin dağılımı

Tablo 4. Andezitik tuf kaya kütleindeki bölgelendirmelere ait süreksizlik setleri.

Eklem- Şev Yönelimi	Bölgeler			
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge
	Eğim / Eğim Yönü	Eğim / Eğim Yönü	Eğim / Eğim Yönü	Eğim / Eğim Yönü
Şev	85/325	80/321	78/324	320/75
Eklem-1	39/83	51/94	82/49	69/103
Eklem -2	62/148	60/150	74/180	70/211
Eklem -3	35/288	59/334	73/349	51/17



Şekil 45. Dasitik breş kaya kütleisinde eklem setlerinin dağılımı

Tablo 5. Dasitik breş kaya kütleisindeki eklem setleri.

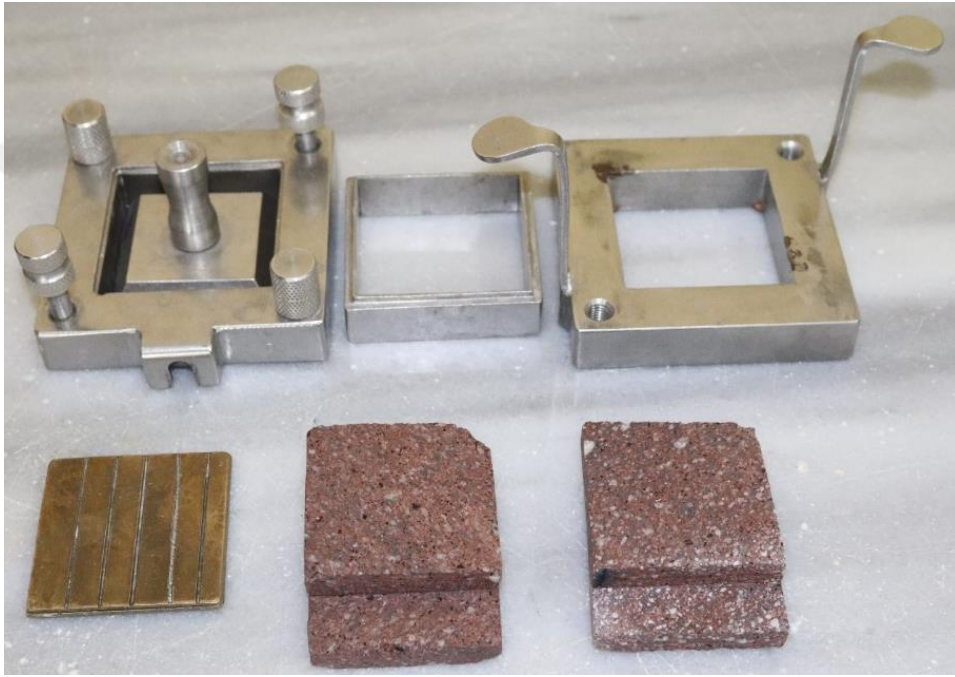
	Eğim / Eğim Yönü
Şev	85/330
Eklem-1	73/181
Eklem -2	66/329

### 2.2.5.2. Süreksizliklerin Makaslama Dayanımı

Çalışma alanında yayılım gösteren andezitik tuf ve dasitik breş kaya kütlelerine ait süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi, saha içerisindeki kaya şevlerinin duraylılık analizleri açısından önem arz etmektedir. Bu değerlendirme kapsamında, kaya kütleisini oluşturan süreksizliklerin içsel sürtünme açısının ( $\phi$ ) tespiti gereklidir. CANMET (1977) tarafından önerilen yöntem doğrultusunda, deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri gerçekleştirilmiş ve Barton ve Choubey'in (1977)

deneysel yenilme kriteri kullanılarak hem andezitik tüfler hem de dasitik breşler için sürtünme açıları belirlenmiştir.

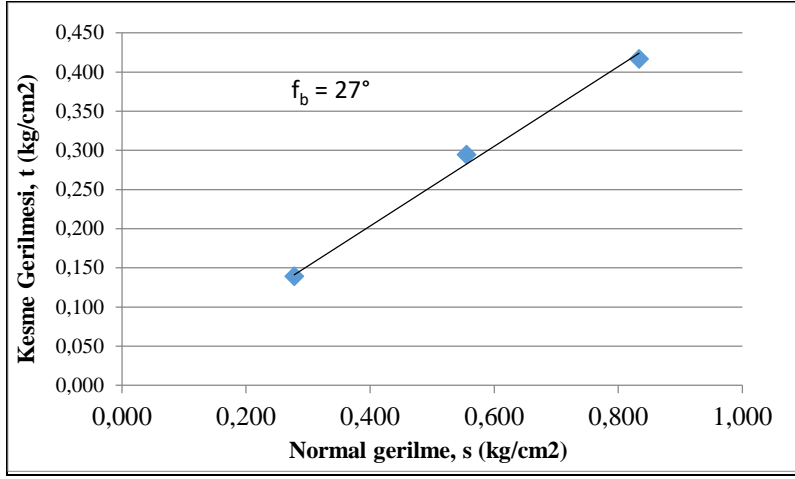
Deneylerde, arazi çalışmalarında elde edilen blok kaya numuneleri kullanılmış; bu örnekler 6x6x1 cm boyutlarında kesilerek yüzeyleri düzeltilmiş ve deney için uygun hale getirilmiştir (Şekil 46). Farklı normal gerilmeler altında toplam üç adet makaslama testi uygulanmıştır (Tablo 6-8). Elde edilen verilerle, normal gerilme ( $\sigma$ ) – kesme gerilmesi ( $\tau$ ) ilişkileri grafiksel olarak gösterilmiş ve iki farklı andezitik tüf seti ile bir dasitik breş seti için temel sürtünme açıları ( $\phi_b$ ) belirlenmiştir (Şekil 47-49).



Şekil 46. Süreksizliklerin makaslama dayanımı için hazırlanmış örnekler

Tablo 6. Andezitik tüflere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri (1. ve 2. Bölge).

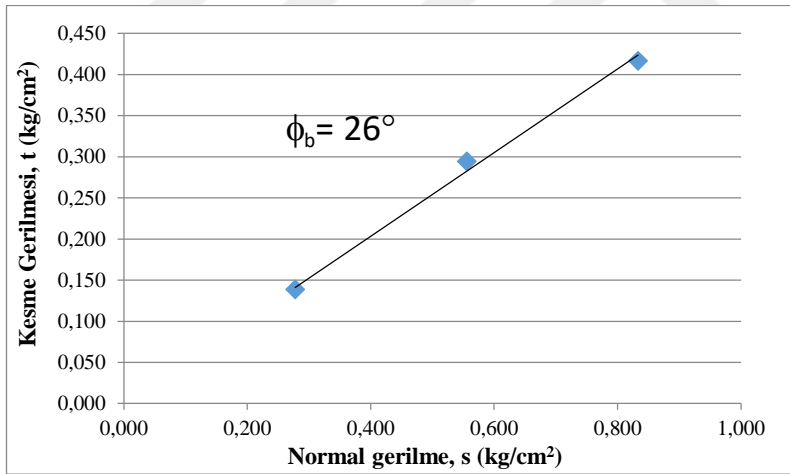
T (kg)	N (kg)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )
5,5	10	0,278	0,153
9,3	20	0,556	0,258
15,6	30	0,833	0,433



Şekil 47. Andezitik tüflerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği

Tablo 7. Andezitik tüflere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri (3. ve 4. Bölge).

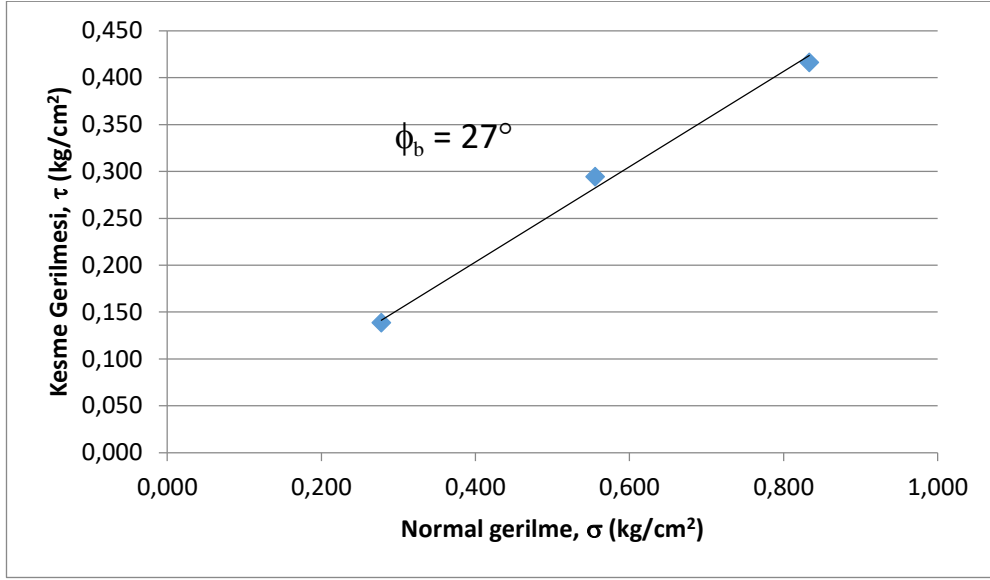
T (kg)	N (kg)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )
4,7	10	0,278	0,131
10,4	20	0,556	0,289
14	30	0,833	0,389



Şekil 48. Andezitik tüflerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği

Tablo 8. Dasitik breşlere ait Normal ve Kesme gerilmesi parametreleri

T (kg)	N (kg)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )
5	10	0,278	0,139
10,6	20	0,556	0,294
15	30	0,833	0,417



Şekil 49. Dasitik breşlerin süreksizliklerine ait temel sürtünme açısı ( $\phi_b$ ) grafiği

Barton ve Choubey (1977) makaslama gerilmesi ile normal gerilme arasındaki ilişkiyi Eşitlik 1 ile ifade etmektedir.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Bu eşitlikte;

$\tau$  : Makaslama gerilmesi

$\sigma_n$  : Süreksizlik düzlemine etki eden normal gerilme

JRC : Süreksizlik pürüzlülük katsayısı

JCS : Süreksizlik yüzeyinin dayanımı

$\phi_r$  : Rezidüel sürtünme açısıdır

$\phi_b$ : Süreksizliklerin temel sürtünme açısı

$\gamma$ : Birim hacim ağırlığı

$\phi$ : İçsel sürtünme açısı

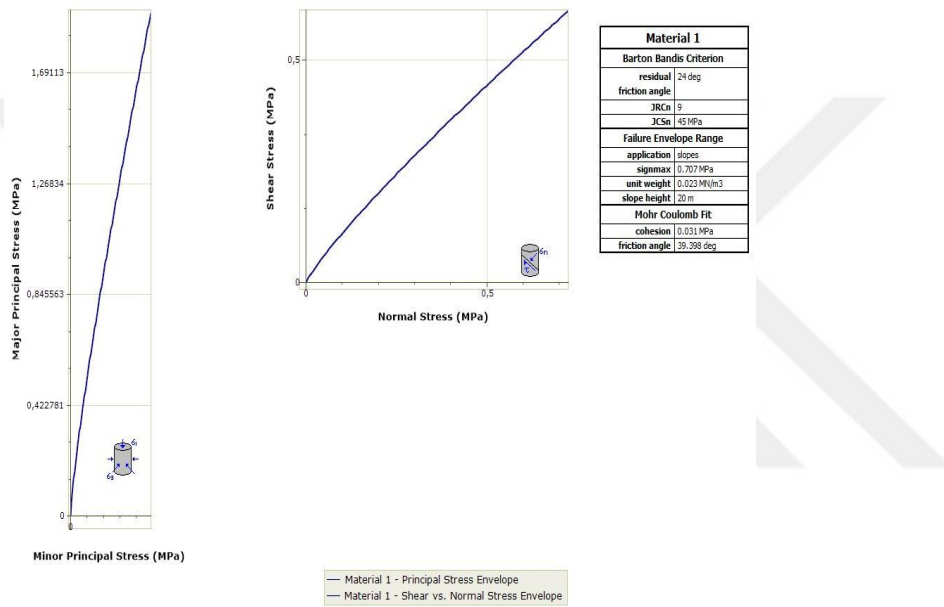
$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R)$

R: Taze yüzeyin Schmidt geri sıçrama sertlik değeri

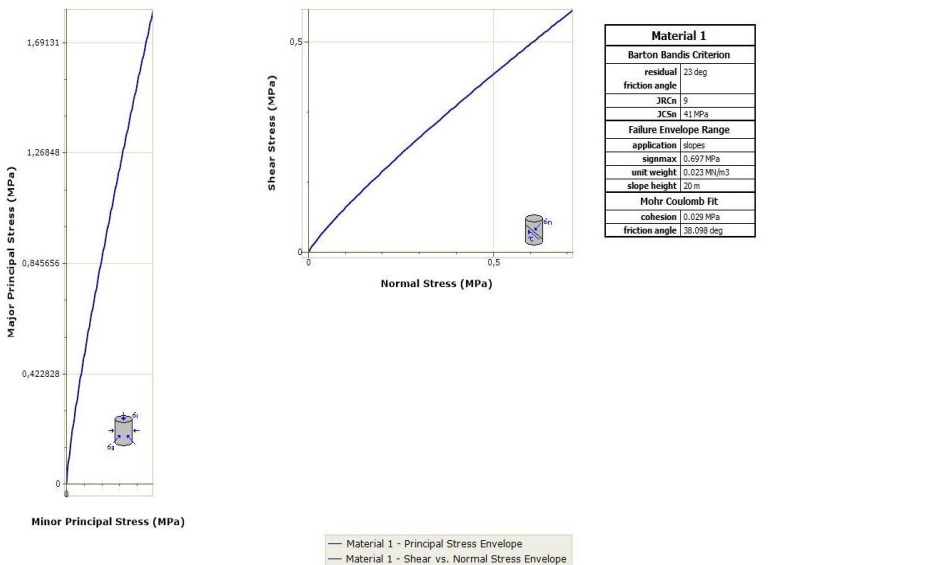
r: Bozunmuş yüzeyin Schmidt geri sıçrama sertlik değeri

Barton (1973) tarafından geliştirilen Görgül Yenilme Ölçütü'nde yer alan parametrelerden biri olan süreksizlik pürüzlülük katsayısı (JRC), arazi çalışmaları sırasında elde edilen eklem yüzeylerine ait pürüzlülük profillerinin, Barton ve Choubey

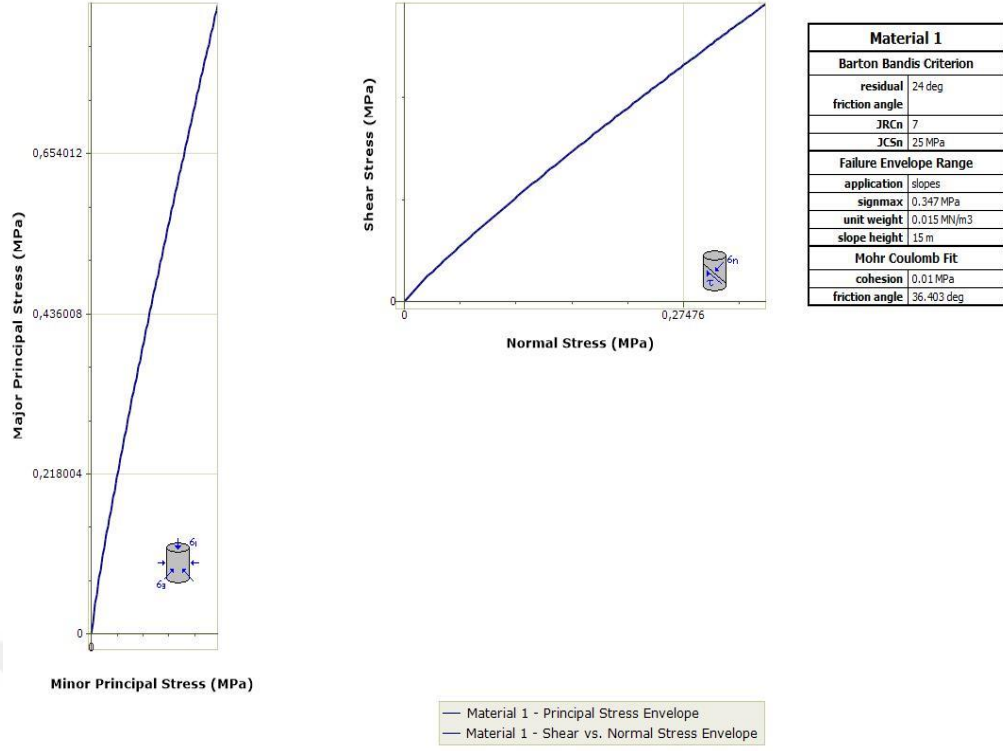
(1977) tarafından sunulan standart profillerle karşılaştırılması yoluyla belirlenmiştir. Süreksizliklerin duvar dayanımı (JCS) ise, Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen grafiksel yöntem kullanılarak, Schmidt sertlik geri sıçrama değeri ve kaya biriminin ortalama birim hacim ağırlığına dayanılarak hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda, RocData 5.0 (2020) yazılımı aracılığıyla yapılan analizler sonucunda; andezitik breşlerin 1. ve 2. bölgelerinde yer alan süreksizliklerin içsel sürtünme açısı  $39^\circ$  olarak bulunmuştur (Şekil 50). Aynı şekilde, 3. ve 4. bölgelerdeki süreksizlikler için bu değer  $38^\circ$  olarak belirlenmiş (Şekil 51), dasitik breş birimlerinde ise içsel sürtünme açısı  $36^\circ$  olarak tespit edilmiştir (Şekil 52).



Şekil 50. Andezitik tüflerin (1. ve 2. Bölge) normal gerilme-kesme gerilmesi grafikleri



Şekil 51. Andezitik tüflerin (3. ve 4. Bölge) Normal gerilme-Kesme gerilmesi grafikleri



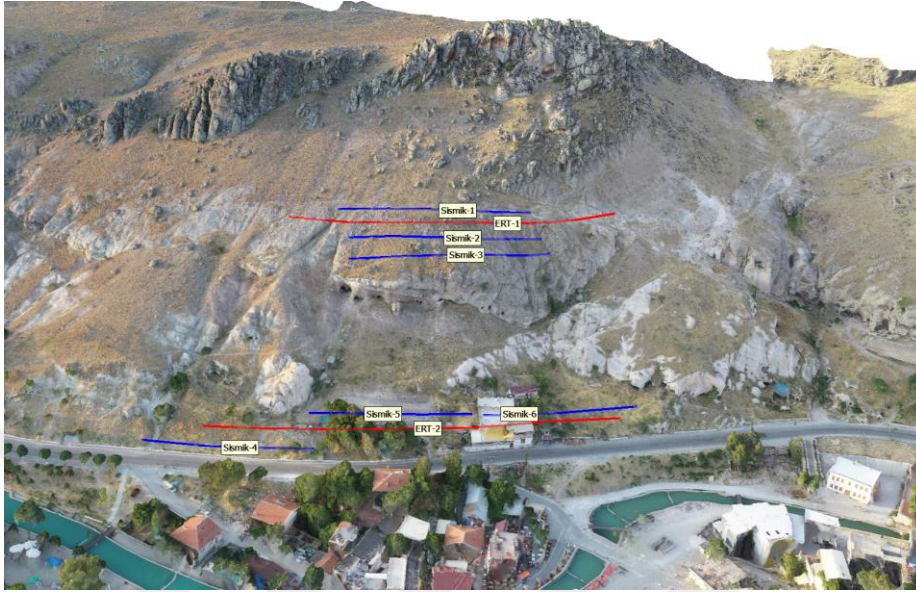
Şekil 52. Dasitik breşlerin normal gerilme-kesme gerilmesi grafikleri

### 2.3. Jeofizik Çalışmalar

Tarihi alanlarda yürütülen kaya ıslahı çalışmalarında, yüzeyde yer alan süreksizliklerin gözlemsel yöntemlerle belirlenmesi mümkündür. Ancak, derinlikteki süreksizliklerin tespiti, yamacın tabaka kalınlıklarının, fiziksel ve mekanik özelliklerinin ortaya konulabilmesi için deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, tahribatsız bir yöntem olarak kullanılan jeofizik tekniklerden elde edilen veriler büyük önem taşımaktadır. Sille Vadisi 1. derece arkeolojik sit alanında yürütülen çalışmalarda, arkeolojik kalıntılara zarar vermeden yamaç ve zemin hakkında bilgi edinilmesi oldukça kritik bir husustur. Zira alanda hala gün yüzüne çıkarılmayı bekleyen birçok arkeolojik varlık bulunmaktadır. Yamaç üzerinde yer alan süreksizliklere ilişkin elde edilen veriler sayesinde, hem düşme riski taşıyan kaya bloklarının hacimleri belirlenmiş hem de ankraj elemanlarının etkin mesafeleri tespit edilmiştir.

Ayrıca, jeofizik yöntemlerle elde edilen veriler ışığında çözüm önerisi olarak planlanan kaya tutucu toprakarme bariyer sisteminin ağırlığına karşılık zeminin yeterli taşıma gücüne sahip olup olmadığı da değerlendirilmiştir. Öte yandan, enerji sönmüleyici çelik bariyerlerin uygulanmasının planlandığı güzergahlarda ana kaya derinliği ile jeomekanik özelliklerin belirlenmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, inceleme alanında iki farklı hat boyunca çok kanallı elektrik rezistivite tomografi (ERT) ölçümü gerçekleştirilmiş; buna ek olarak, altı farklı güzergâh ve çeşitli yamaç

seviyelerinde toplam altı adet sismik kırılma ölçümü yapılmıştır (Şekil 53). Gerçekleştirilen ölçümlerin detayları sonraki bölümlerde sırasıyla sunulmuş; ayrıca elde edilen verilerin, mevcut jeolojik bilgilerle olan uyumu da doğrulanmıştır.

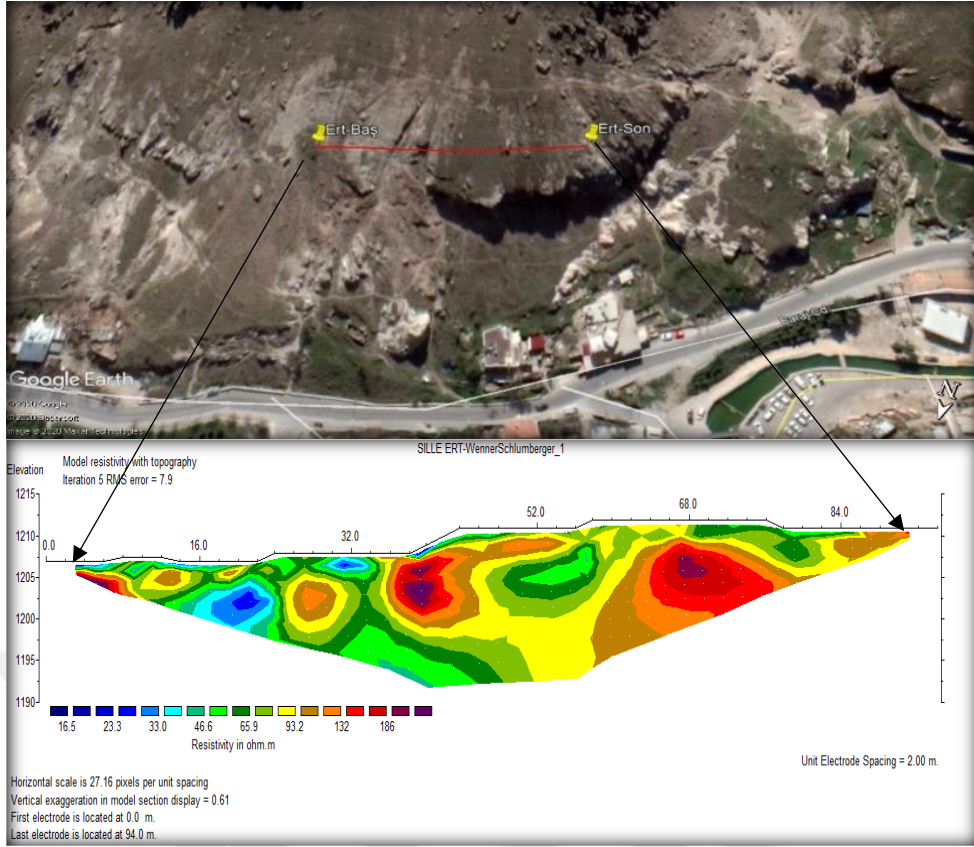


Şekil 53. Çalışma alanında gerçekleştirilen ERT ve sismik kırılma ölçümlerine ait arazi ölçüm hatları

### 2.3.1. Çoklu Elektrik Rezistivite Tomografisi Ölçümleri

Yukarıda belirtilen jeofizik çalışmalar kapsamında, Sille Vadisi 1. derece arkeolojik sit alanı mevkiinde çok elektrotlu ölçüm sistemi kullanılarak bir profilde elektrik özdirenç verilerine dayalı birleşik sondaj-profil ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu verilerin 2B (iki boyutlu) ters çözüm analizi yapılmıştır. Elde edilen görünür özdirenç kesiti, bir ters çözüm algoritması ile işlenmiş ve profil boyunca ortamın özdirenç-derinlik ilişkisi hesaplanmıştır (Bernard vd., 2006). Bu çalışmanın temel amacı; araştırma alanının jeolojik yapısını ortaya koymak, jeolojik etütlerle elde edilen verilerle karşılaştırma yapmak, tabaka kalınlıklarını belirlemek, yer altı suyu, zayıf zemin, kırık, boşluk ve çatlak yapıları ile bunlara neden olabilecek fay zonlarını tespit ederek bütüncül bir jeolojik-jeofizik model oluşturmaktır.

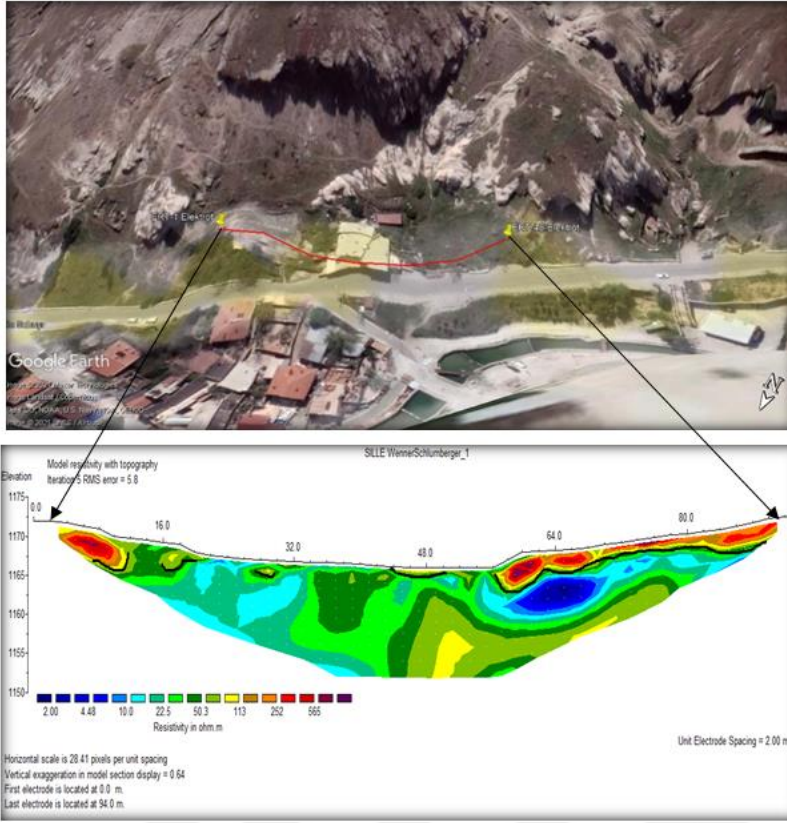
İnceleme sahasında gerçekleştirilen iki adet çok elektrotlu rezistivite tomografi (ERT) uygulamasında, 48 elektrot ile ölçüm yapılmış; her bir elektrot aralığı 2 metre olacak şekilde seçilmiştir. Bu dizilimle, yaklaşık 17 metre derinliğe kadar ulaşılarak toplam 96 metrelik bir profil boyunca, Wenner-Schlumberger dizilimiyle ölçümler alınmıştır. Sahada elde edilen veriler RES2DINV (2020) yazılımı kullanılarak yorumlanmıştır. İki ayrı hat üzerinde gerçekleştirilen ERT ölçümlerinde, birinci hattın arazi üzerindeki konumu ve bu hatta ait kontur diyagramı Şekil 54'te sunulmuştur.



Şekil 54. ERT-1 ölçüm sonucu kesitinin Ohm.m değerlerine göre kontur diyagramı

Birinci ERT hattında elde edilen verilere göre oluşturulan kesit incelendiğinde, yüzeyden itibaren yaklaşık 17 metre derinliğe ulaşıldığı görülmektedir. Özdirenç değerleri 16,5 ile 186 ohm.m arasında değişmektedir. Kesit boyunca formasyon değerlendirildiğinde; ölçüm hattının 1 ila 96. metreleri arasında, yer yer 11 metre derinliğe kadar yüksek özdirençli birimlerin bulunduğu söylenebilir (kırmızı-mor renkli bölgeler). Özdirenç aralığı 93,2 – 186 ohm.m olan bu birimler, bloklu andezit olarak yorumlanmaktadır. Özdirenç değerleri 46,6 – 65,9 ohm.m aralığında değişen açık-koyu yeşil renkli bölgeler ise düzgün tabakalanma göstermeyen tüf birimleri olarak değerlendirilmiştir. Bu yapı, eğim etkisi nedeniyle duraylılık açısından zayıflık gösterebilir. Ölçüm hattının 1. ile 32. metreleri arasında yer alan açık ve koyu mavi renkli bölgelerde ise özdirenç değerleri 16,5 – 33,0 ohm.m arasında olup, bu birimler kum-çakıl olarak tanımlanabilir. Son olarak, yamacın giriş kısmında yer alan oyma mekanların devamına, kesit üzerinde rastlanmamıştır.

İkinci ERT hattı ise, şevnin daha alt seviyelerinde, araç yolunun hemen üst kotlarında gerçekleştirilmiştir. Bu hat boyunca, şev tabanında bulunan zeminin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda, bölgede alternatif çözüm olarak önerilen toprakarme bariyer sistemlerinin uygulanabilirliği de araştırılmıştır (Şekil 55).



Şekil 55. ERT-2 ölçüm sonucu kesitinin Ohm.m değerlerine göre kontur diyagramı

İkinci ERT hattına ait veriler incelendiğinde, yüzeyden itibaren yaklaşık 16 metre derinliğe ulaşıldığı ve özdirenç değerlerinin 2.00 ile 565 ohm.m arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ölçümden elde edilen kesit doğrultusunda yapılan değerlendirmede; ölçüm hattının 1. metresinden 96. metresine kadar olan bölümde, yüzeyden başlayarak yer yer 5 metre derinliğe kadar inen yüksek özdirençli birimlerin mevcut olduğu görülmektedir (sarı-kırmızı-mor renkli bölgeler). Özdirenç aralığı 113–565 ohm.m olan bu birimler, sıkışmış yamaç molozu olarak yorumlanmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, profilin sol kısmında yoğun olarak gevşek ve kaya blokları içeren bir yamaç molozu bulunduğu sonucuna varılabilir. Kesitte formasyon sınırları siyah çizgilerle gösterilmiştir. Özdirenç değerleri 22.5–50.3 ohm.m arasında değişen açık ve koyu yeşil renkli bölgeler ise, düzgün tabakalanma göstermeyen tuf ve yamaç molozu birimleri olarak değerlendirilmiştir. Bu yapılar, eğim etkisiyle durağanlık açısından zayıflık gösterebilir. Ayrıca, ölçüm hattının 12. ile 96. metreleri arasında, 1 metre ile yer yer 16 metre derinlikler arasında kalan açık ve koyu mavi renkli alanlarda özdirenç değerleri 2.00 – 10.0 ohm.m aralığında olup, bu bölgeler kil ve kum birimleri olarak tanımlanabilir.

### 2.3.2. Sismik Kırılma Yöntemi ile Yapılan Ölçümler

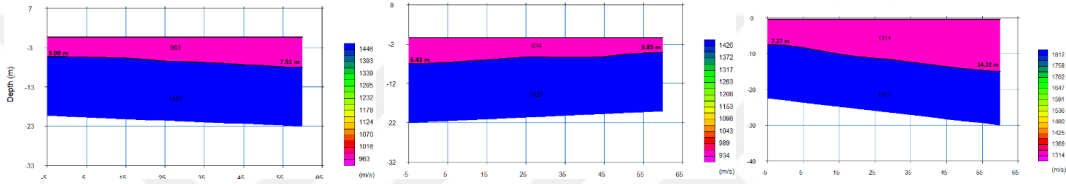
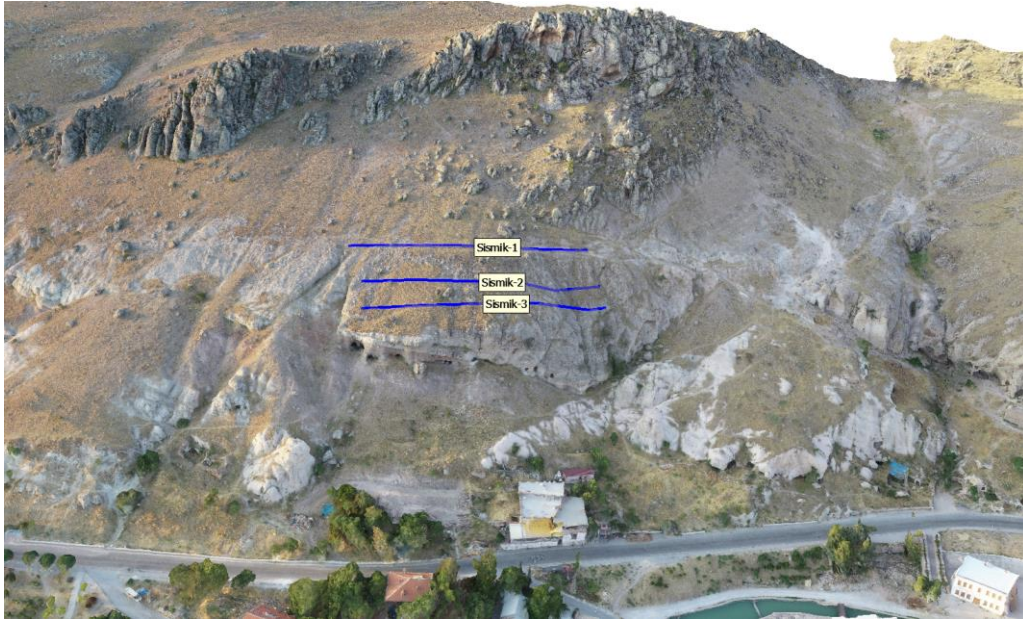
Alanda jeofizik yöntemler kapsamında gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise sismik kırılma yöntemi olmuştur. Bu yöntemin temel prensibi; sığ derinliklerde yapay olarak oluşturulan elastik dalgaların yer altı tabakaları boyunca ilerlerken kırılma ve yansıma süreçlerine uğraması ve bu dalgaların alıcıdan kayıt sistemine ulaşan ilk varış zamanlarının kaydedilmesine dayanmaktadır. Sismik dalgaların yayılma hızları, buldukları ortamın yoğunluğu, su içeriği, çatlak durumu, porozite oranı ve çimentolanma derecesi gibi özelliklere bağlıdır. Enine (S) dalgalar, bu parametrelere boyuna (P) dalgalardan daha yüksek duyarlılık göstermektedir (Kızılay, 2019).

Çalışma kapsamında, üç farklı profil üzerinde, her biri 60 metre uzunluğa sahip olan sismik kırılma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde, 5 metre aralıklarla yerleştirilen jeofonlar ve 5 metre ofset mesafesi kullanılarak hem P hem de S dalgalarına ilişkin veriler toplanmıştır. Elde edilen bu veriler aracılığıyla; yer altı tabakalanması, hız yapısı, zeminlerin dinamik ve elastik mühendislik parametreleri, taşıma gücü, zemin sınıflamaları, hakim titreşim periyotları, büyütme faktörleri ve zemin içerisindeki yatay ve düşey süreksizlikler belirlenmiştir.

Jeofizik ölçüm noktaları, arazi koşulları dikkate alınarak çalışma alanını en iyi temsil edecek bölgelerden seçilmiştir. Sismik kırılma uygulamaları, iki farklı güzergâh üzerinde, her birinde üçer adet serim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk güzergâh, tarihi oyma yapıların üst kotlarında, şevin üst kesimlerine yakın konumda yer almaktadır. Bu güzergâha ait ölçüm hatlarının konumu Şekil 56'da sunulmuş; şeklin altında ise ilgili serimlerden elde edilen arazi kesitleri görsel olarak verilmiştir.

Yürütülen çalışma kapsamında elde edilen ölçümler doğrultusunda, her bir profile ait  $V_p$  (boyuna dalga) ve  $V_s$  (enine dalga) hızlarının derinlikle değişimi belirlenmiştir. Bu hızlardan yararlanılarak, zeminin dinamik ve elastik özelliklerini ortaya koymak amacıyla her bir tabakaya ait Yoğunluk ( $\rho$ ), Maksimum Kayma Modülü ( $G$ ), Young Modülü ( $E$ ), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Hacimsel Modül ( $K$ ) ve  $V_{s30}$  (m/sn) değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda şu bulgulara ulaşılmıştır: Göreceli zemin büyütme faktörü 0 ile 2.5 arasında değişmekte olup, bu değerler çalışma alanının büyük kısmının "A; Düşük Tehlike Düzeyi" sınıfında yer aldığını göstermektedir. Öte yandan, önceki çalışmalarda, spektral büyütme değerlerinin 2.0 ve üzeri olması durumunun yerleşime açılacak alanlar açısından kritik bir kriter olarak kabul edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Ansal vd., 2007).



Şekil 56. Soldan sağa doğru Sismik-1, Sismik-2 ve Sismik-3 hatlarında gerçekleştirilen sismik kırılma yöntemi ölçümleri ile elde edilen arazi kesitleri

Bir diğer önemli sonuç ise, inceleme alanında belirlenen zemin hakim titreşim periyodu değerlerinin 0.3 ila 0.5 saniye arasında değiştiğidir. Bu periyot aralığına göre, alanın göreceli hakim periyot sınıflaması, Ansal vd. (2007) tarafından önerilen ölçütlere göre “B; Orta Tehlike Düzeyi” grubuna girmektedir. Bu bağlamda, inceleme alanında önerilecek koruma yapısının, zemin ile yapı periyodu arasındaki olası rezonans durumlarını önlemek amacıyla, yapıların özperiyotları ile zemin hakim periyotları dikkate alınarak tasarlanması gerekmektedir. Böylece, deprem anında oluşabilecek yatay yüklerin salınım etkisinin yapı-zemin etkileşimi nedeniyle tehlikeli düzeye ulaşmasının önüne geçilebilecektir.

Ayrıca, saha genelinde tahmini 30 metre derinlik için ortalama kayma dalgası hızı ( $V_{s30}$ ) 467–589 m/sn aralığında bulunmuştur. Bu değerler, ZC zemin sınıfına karşılık gelmekte olup, çok sıkı çakıllı zeminler ile yoğun çatlaklı gevşek kayaları temsil etmektedir. Birinci güzergahta yapılan üç serime ait her iki katmana ilişkin detaylı veriler Tablo 9'da sunulmuştur.

Birinci güzergahta gerçekleştirilen serimlerin genel değerlendirmesi sonucunda, ölçüm hattı boyunca yüzeyden itibaren yaklaşık 5.00–7.50 metre derinliğe kadar olan kısmın, orta derecede sağlam ve bozmuş özellikle birimlerden oluştuğu tespit edilmiştir. Bu derinlik aralığı, serimler arasında 3 ila 5 metre arasında değişiklik

göstermekle birlikte ortalama değer esas alınarak ifade edilmiştir. İlk tabakanın tuf ve alüvyon malzemelerden oluştuğu değerlendirilirken, altında yer alan ikinci tabakanın daha sağlam bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu alt tabaka ise litolojik olarak volkanik breş ve andezit birimlerinden meydana geldiği şeklinde yorumlanmaktadır.

Tablo 9. Sismik-1, Sismik-2 ve Sismik-3 hatlarında yapılan Sismik Kırılma yöntemi ölçümleriyle elde edilen arazi dinamik parametreleri.

Ölçüm Numarası	Sıkışma dalga Hızı Vp (m/sec)	Kayma dalga Hızı Vs (m/sec)	Yoğunluk (d) (gr/cm <sup>3</sup> )	Poisson Oranı $\nu$	Kayma Modülü G (kg/cm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (kg/cm <sup>2</sup> )	Bulk Modülü K (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık H (m)	
Serim 1	Katman 1	963	334	1.72	0.43	1923.5	5507.5	13425.6	5.0
	Katman 2	1447	507	1.91	0.43	4907.2	14034.7	33428.6	7.1
Serim 2	Katman 1	934	345	1.71	0.42	2036.7	5788.2	12211.6	6.43
	Katman 2	1427	532	1.90	0.42	5384.3	15283.6	31560.2	3.85
Serim 3	Katman 1	1314	461	1.86	0.43	3960.5	11325.5	26895.7	7.27
	Katman 2	1813	647	2.02	0.43	8454.8	24130.6	55115.2	---

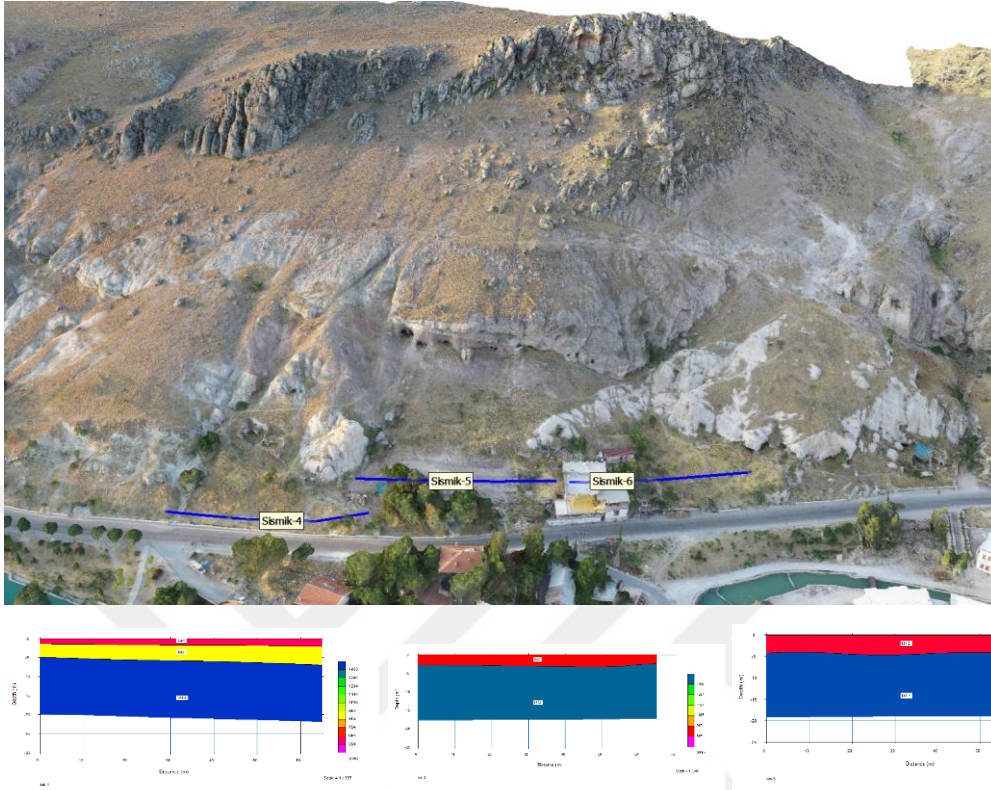
Tablo 10. Sismik-4, Sismik-5 ve Sismik-36 hatlarında yapılan Sismik Kırılma yöntemi ölçümleriyle elde edilen arazi dinamik parametreleri.

Ölçüm Numarası	Sıkışma dalga Hızı Vp (m/sec)	Kayma dalga Hızı Vs (m/sec)	Yoğunluk (d) (gr/cm <sup>3</sup> )	Poisson Oranı $\nu$	Kayma Modülü G (kg/cm <sup>2</sup> )	Elastisite Modülü (kg/cm <sup>2</sup> )	Bulk Modülü K (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık H (m)	
Serim 4	Katman 1	594	226	1.53	0.42	780.5	2209.3	4350.9	2.0
	Katman 2	897	328	1.69	0.42	1822.4	5185.9	11199.6	5.0
	Katman 3	1514	626	1.93	0.40	7566.2	21138.3	34168.5	-
Serim 5	Katman 1	867	351	1.68	0.40	2069.3	5802.2	9866.2	2.5
	Katman 2	1413	509	1.90	0.43	4916.6	14016.8	31333.8	-
Serim 6	Katman 1	1012	469	1.75	0.36	3840.10	10469.80	12759.30	4.0
	Katman 2	1617	693	1.96	0.39	9426.30	26157.90	38752.50	-

Sismik kırılma ölçümleri kapsamında ikinci güzergah olarak, şevin alt bölgesinde, yolun hemen üst kotlarında yer alan bölgede ölçümler gerçekleştirilmiştir. Serimlerin arazideki konumları Şekil 57’de sunulmuş olup, şeklin alt kısmında her bir serimden elde edilen verilere göre oluşturulan arazi kesitleri yer almaktadır. Bu güzergaha ait tüm ölçüm sonuçları ise Tablo 10’da detaylı şekilde verilmiştir.

İkinci güzergahta yapılan serimlere ilişkin genel değerlendirmede, 4. serimin uygulandığı hattın boyunca yüzeyden yaklaşık 7.0 metre derinliğe kadar uzanan 1. ve 2. tabakaların yamaç molozu niteliğinde olduğu, bu tabakaların altında yer alan 3. tabaka seviyesinin ise tüflerden oluştuğu belirlenmiştir. 5. serimde, hat boyunca yüzeyden yaklaşık 2.5 metre derinliğe kadar uzanan 1. tabakanın yamaç molozu, altındaki 2. tabakanın ise tuf birimlerinden oluştuğu görülmüştür. Benzer şekilde, 6. serim doğrultusunda yapılan değerlendirmede de yüzeyden yaklaşık 4.0 metre derinliğe kadar

uzanan 1. tabakanın yamaç molozu, bu tabakanın altındaki 2. tabakanın ise tüflerden oluştuğu anlaşılmıştır.



Şekil 57. Soldan sağa doğru Sismik-4, Sismik-5 ve Sismik-6 hatlarında gerçekleştirilen sismik kırılma yöntemi ölçümleri ile elde edilen arazi kesitleri

#### 2.4. Gözlemsel Yüze İncelemesi ve Riskli Blokların Tespit Çalışması

Bu bölümde, 1. Derecede arkeolojik statüde olan inceleme sahasındaki tüm bloklar doğrudan arazide yerinde ziyaret edilerek tek tek gözlemsel olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, yapılan kinematik analiz sonuçları, limit denge analiz verileri ve şev stabilite analizleri de dikkate alınmış; risk taşıyan bloklar detaylı yakın incelemeye tabi tutulmuştur. İncelemeler sırasında, her riskli bloğa ve blok grubuna bir numara verilmiş, bu numaralar ilgili blokların üzerine işaretlenmiş ve farklı açılardan fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca, riskli blok tespit çalışmaları kapsamında her bloğun konumu ile ortalama en, boy ve yükseklik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 58’de, gözlemsel yüze inceleme ile riskli blok tespitine ilişkin çalışmalardan bazı görseller sunulmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, riskli blokların boyutlarının belirlenmesi ve buna bağlı olarak optimum ıslah yönteminin seçilmesiyle, uygun müdahale biçimi ve koruma yapısının doğru şekilde boyutlandırılmasını sağlamaktır. Çalışma sahasında toplam 400

adet riskli blok tespit edilmiş olup, her biri hacim, ağırlık ve konum bilgileriyle birlikte kaya düşmesi analizlerine dahil edilmiştir.

Son olarak, optimum ıslah yönteminin belirlenmesine yönelik bu çalışma kapsamında geliştirilen gözlemsel değerlendirme yaklaşımının detayları alt bölümlerde sunulmaktadır.

İlk etapta, riskli blokların işaretlenmesi sırasında dört prensip göz önüne alınmıştır;

1. Bloğun diğer bloklarla etkileşim içinde olup olmadığı
2. Bloğun ya da blok kümesinin toplam riskli hacmi
3. Sağlam bir kaya bloğu üstünde yer alan parçaların birlikte tanımlanması
4. Bloğun oturduğu yerin eğimi, ana kayaya tutunma düzeyi ve konumu



Şekil 58. Gözlemsel yüzey incelemesi ve riskli blok tespit çalışmalarına ait bazı görüntüler.

1. Birbirine yakın konumlanmış veya birbirine yaslanmış bloklar arasında, duraylılık durumlarının karşılıklı olarak etkileşim içinde olabileceği durumlarda, bu blokların birlikte hareket etme potansiyeline sahip olabileceği değerlendirilmiştir. Bu tür

blok grupları, analizlerde tek bir birim olarak ele alınmış ve her bir gruba tek bir numara verilmiştir (Şekil 59). Riskli blokların belirlenmesinde en sık karşılaşılan hatalardan biri, etkileşim hâlinde olan bloklardan yalnızca birinin boyutunun dikkate alınarak analiz yapılmasıdır. Bu yaklaşım, koruma yapılarının yalnızca tek bir bloğun hareketine göre boyutlandırılmasına neden olmaktadır. Oysa böyle bir durumda, kaya düşmesi gerçekleştiğinde bloklar birlikte hareket edebilir ve bu da koruma yapısının tasarım kapasitesinin aşılmasına yol açabilir. Bu tür hatalı değerlendirme, günümüzde ne yazık ki en sık yapılan ve en yaygın hatalardan biridir.



Şekil 59. Birbirine bağlı ve birlikte hareket etme riski taşıyan blokların görünümü

2. Toplam hacmi 0.25 metreküpten küçük olan ve yamaçta serbest halde bulunan parçalar, genellikle toplam yamaç temizliği sırasında ya da yerleştirilecek koruma yapıları tarafından tutulabilecek boyutlarda oldukları için analiz kapsamında ayrı olarak değerlendirilmemiştir. Ancak, önlem aşamasında bu tür küçük parçalar için de müdahale öngörülmüş; özellikle enerji sönmüleyici bariyerlerin arkasında kalan alanlarda yamaç temizliği, kısmi kırma işlemleri veya benzeri uygulamaların yapılması gerektiği belirtilmiştir (Şekil 60). Bu küçük blokların ayrı olarak ele alınmasının temel nedeni, bazı durumlarda bir araya gelerek yığıntı oluşturdukları bölgelerde moloz akması veya moloz sellenmesi gibi ikincil tehlikelere yol açabilmeleridir. Bu nedenle, optimum ıslah yönteminin belirlenmesinde bu tür parçalar da ayrıca değerlendirmeye alınmalı ve nihai müdahale kararı, yapılacak mühendislik optimizasyonundan sonra verilmelidir.



Şekil 60. Düşme riski olan yamaçta serbest duran küçük blokların görüntüsü

3. Sağlam bir kaya bloğu ya da mostra veren bir kayacın üzerinde bulunan bazı parçalar, aynı yapısal bütünlük içerisinde yer aldıkları için birlikte tanımlanmışlardır. Ancak bu durum, söz konusu bloğun tamamının önlem paketi kapsamında değerlendirilmesi gerektiği anlamına gelmemektedir (Şekil 61). Bu tür durumların daha sağlıklı tanımlanabilmesi için, kırım oranlarının ayrı olarak belirtilmesi gerekmektedir. Ayrıca, risk düzeyi düşük olan ve sabitleme alanı olarak tanımlanan birçok blok da bu kapsamda değerlendirilmektedir. Riskli bloklara yönelik yapılacak kırım işlemleri sırasında, bu blokların mevcut durumu kontrol teşkilatı tarafından yeniden gözden geçirilmelidir. Çünkü başlangıçta düşük riskli gibi görünen bazı bloklar, açıldığında arka yüzeylerinde daha yüksek risk barındırabilir; bu gibi durumlarda ek kırım işlemleri gerekebilir. Dolayısıyla, bu tür bloklar ve riskli bölgeler bütüncül olarak değerlendirilmeli, ancak uygulanacak müdahaleler oransal ve yerinde bir yaklaşımla planlanmalıdır.



Şekil 61. Mostra veren blokların üzerinde yer alan riskli blokların durumu

4. Bu bölümde, inceleme sahasında yer alan tüm bloklar değerlendirilmiş, ancak bazı bloklar risk analizi dışında bırakılmıştır. Özellikle bloğun yerleştiği alanın eğimi, ana kayaya olan tutunma durumu ve bloğun genel konumu itibarıyla, bir parçanın aşağı düşme ihtimali düşükse, bu tür bloklar genellikle dikkate alınmamıştır. Ancak bu yaklaşımın istisnası; yukarıdan gelebilecek çarpmalara karşı hassas olan ve yamacın üst kesimlerinde, kenarlara yakın konumlanmış parçalardır (Şekil 62). Çünkü üst bölgelerde bulunan büyük hacimli ve yüksek düşme riski taşıyan bloklar, düşme anında yamaç boyunca hız kazanarak alt kottaki bloklara çarpabilmektedir. Bu durumda, normal şartlarda düşük riskli olarak değerlendirilen ve kendi başına düşme potansiyeli olmayan bloklar bile, çarpmanın etkisiyle harekete geçebilir. Böyle bir senaryoda, blokların birlikte hareket etmesi, toplam riskli blok hacminin artmasına ve aynı anda birden fazla bloğun düşme durumuna neden olmaktadır. Bu tür birleşik hareketler, özellikle enerji sönmüleyici çelik bariyerler, oluk bariyer sistemleri ve kaya tutucu toprakarme bariyerler açısından en olumsuz durumlardan birini oluşturmaktadır; yapının kapasitesinin aşılmasına ve işlevini yitirmesine yol açabilmektedir.



Şekil 62. Bloğun oturduğu yerin eğimi, ana kayaya tutunma düzeyi ve konumu

#### 2.4.1. Riskli Blokların Değerlendirme Yöntemi ve Kriterleri

Bloklara ilişkin değerlendirmeler yalnızca düşme eğilimleri dikkate alınarak yapılmıştır. Devrilme, düşme, yuvarlanma veya sürüklenme eğilimi gösteren blokların, yamacı kat ederek alt kotlara ulaşip ulaşamayacakları bu aşamada analiz edilmemiştir; bu konu kaya düşmesi analizleri bölümünde detaylı şekilde ele alınmıştır.

Bir bloğun risk seviyesini belirlemede aşağıdaki kriterler esas alınmıştır:

- Bloğun yamaçla veya ana kaya ile bağlantısının güvenilirliği,
- Bloğun oturduğu yüzeyin eğimi ve yüzey özellikleri,
- Kayaç iç direnci ve geometrisinin yuvarlanma hareketine ne kadar uygun olduğu,
- Üzerinde ya da arkasında başka bir objeden kaynaklı baskı bulunup bulunmadığı,
- Bloğun duruş karakteristiği (ağırlık merkezinin konumu, konsol durumu, topuğa yaslanma vb.),
- Dış etkenlerden (iklim koşulları, sismik aktivite, çarpma vb.) etkilenme potansiyeli.

Sahada elde edilen tüm bu veriler tablo haline getirilmiş; örnek teşkil etmesi amacıyla yalnızca bir bölümü Tablo 2.11’de sunulmuştur. Hacim hesaplamaları, blok ya da blok grubunun yaklaşık genişlik, derinlik ve yükseklik ölçülerine göre yapılmıştır. Hazırlanan tablolar kategorik olarak düzenlenmiş olup, bu veriler üzerinden çalışacak uzmanların yapım ve müdahale kararlarına kolay erişim sağlaması amaçlanmıştır.

Kaya bloklarının risk seviyelerinin belirlenmesinde beş düzeyli bir sınıflandırma sistemi kullanılmıştır. Tespit edilen riskli bölgeler aşağıdaki sınıflama kriterlerine göre değerlendirilmiştir:

1. Dereceden Riskli (Her An Düşmeye Hazır Bloklar)
2. Dereceden Riskli (Düşme Süreci Kestirilemeyen Bloklar)
3. Dereceden Riskli (Bağlantıları Zayıflamış ve Güvenilir Olmayan Bloklar)
4. Dereceden Riskli ( Düşme Riski Nispeten Düşük Olan Bloklar )
5. Dereceden Riskli (Düşme Riski Çok Az Veya Kısmi Olan Bloklar)

#### **2.4.1.1. Her An Düşmeye Hazır Bloklar (1. Dereceden Riskli)**

Bunlar duraylılık süreçlerinin sonuna gelmiş her an düşmeye hazır bloklardır. Bu tür bloklar büyük ihtimalle yer sarsıntısı, donma, iç direncin tükenmesi ya da diğer parçaların çarpması gibi etkilerle kolayca harekete geçmeye hazırdırlar. Bunun ötesinde bu bölümde değerlendirilen blokların, kendi ağırlıklarıyla dağılarak ya da topuklarını kırarak yuvarlanmaları veya oturma hattındaki süreksizlikler boyunca kayarak harekete geçmeleri de mümkündür. Tutunma sürecinin sınırında bulunduğu düşünülen bu bloklara acilen müdahale edilerek önlem alınması gerekmektedir. Yamacın üst kotlarında düşmek üzere olan çok sayıda blok mevcuttur (Şekil 63).



Şekil 63. Her an düşmeye hazır iki blok görüntüsü

#### 2.4.1.2. Düşme Süreci Kestirilemeyen Bloklar (2. Dereceden Riskli)

Yamaca oturma açıları, oturma yüzeyindeki ya da topuğundaki tutunma yetersizlikleri, yamaçtan ayrılmayı tetikleyecek süreksizliklerdeki açılmaların ulaştığı seviyeler ileri düzeyde olan bloklardır (Şekil 64). Yamaçtaki konumu (oturma açısı, ağırlık merkezinin konumu, bloğun dışa eğimi vb.) tehlike oluşturan ya da harekete geçecek komşu bloklar tarafından düşüşünün kolayca tetiklenme potansiyeli olduğu düşünülen bloklar bu kategoride ele alınmıştır. Bu bloklar her an düşmeye hazır olarak nitelenemeyeceği gibi, ne zaman harekete geçecekleri belirli olmayan ileri derecede güvenilmez yapılardır. Optimum ıslah yönteminin belirlenmesinde bu kategorideki blokların müdahale ve önlemler paketine alınması gereklidir.



Şekil 64. Düşme süreci kestirilemez durumdaki blokların görüntüleri

### 2.4.1.3. Bağlantıları Zayıflamış ve Güvenilir Olmayan Bloklar (3. Dereceden Riskli)

Yapısal olarak nispeten sağlam görünümlü olan ancak oturma açıları ya da süreksizlikleri göz önüne alındığında çok kısa vadede büyük olasılıkla olmasa bile yine de öngörülemeyebilecek düşme/devrilme, yuvarlanma ve sürüklenme riskleri içeren bloklar bu kategoriye alınmıştır (Şekil 65). Bu tür blokların durumu iklimsel etkiler ve sismik sarsıntılarla oluşacak radikal değişikliklere açıktır. Arazi eğiminin %80'tan fazla olan yamaçlarda bu kategorideki blokların önlemler paketine alınması zorunlu hale gelecektir.



Şekil 65. Bağlantıları zayıflamış ve güvenilmez durumdaki bir bloğun görüntüsü

### 2.4.1.4. Düşme Riski Nispeten Düşük Olan Bloklar (4. Dereceden Riskli)

Yamaçla bağlantıları kalmamış olsa da oturma açıları uygun olduğu için yerini koruduğu düşünülen bloklardır (Şekil 66). Mevcut haliyle güvenli kabul edilebilecek, ancak sadece güçlü bir dış etki ile durumu değişebilecek bloklar bu kategoride toplanmıştır. Yer sarsıntısı, donma gibi etkilere dahi kısmen de olsa dirençli olduğu izlenimi veren yapılardır. Ancak orta vadede düşme ihtimalleri az olsa da, olası etki sahaları dikkate alınarak bu tip bloklarda önlem paketi içine alınabilir.



Şekil 66. Düşme riski nispeten düşük bir bloğun görüntüsü

#### 2.4.1.5. Düşme Riski Çok Az veya Kısmi Olan Bloklar (5. Dereceden Riskli)

Riskli görünümüleri nedeniyle değerlendirmeye katılan ancak düşme ya da yuvarlanma ihtimali düşük olan bloklar bu gruba girmektedir (Şekil 67). Bu grubun önlem paketinde daha çok yerinde sabitleme ve güçlendirme yapılması uygun ve ekonomik olacaktır. Üstlerinde bazı riskli parçalar bulunan ancak kendisi sağlam olan mostra vermiş kayalar bu gruba dahil edilmiştir. Eğer sahada kırım işlemi uygulanacaksa bu blokların sadece kısmen kırıma tabi tutulması yeterli olacaktır. Örtüleme ve bariyer önlemleri ile ilgili hesaplamalarda bloğun tamamının ele alınmasına gerek yoktur, sadece riskli kısımlarının ağırlık şekil ve düşme yüksekliği gibi parametrelerini hesaba katmak yeterlidir.



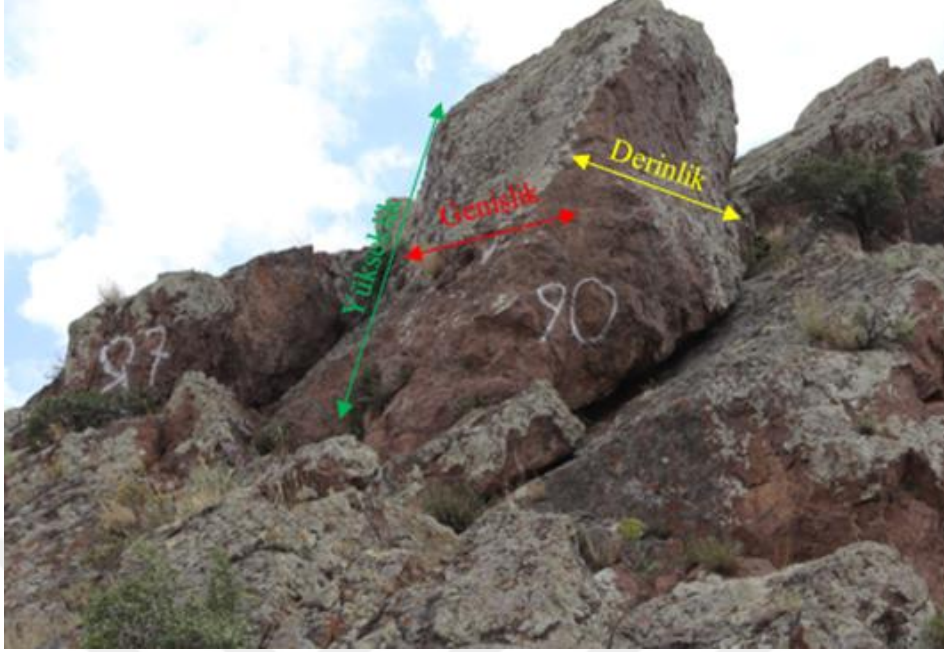
Şekil 67. Düşme riski çok az olan kaya bloklarının görüntüleri

#### 2.4.2. Blokların Şekilleri

İnceleme sırasında, düşmeleri halinde oluşacak senaryoları doğrudan etkilediği için kaya bloklarının şekilleri ile ilgili de bir gruplama yapılmıştır (Şekil 68). Bu tespit kaya düşmesi analizlerinde de kullanılan kriterleri desteklemesi nedeniyle önemlidir. Kaya blokları ya da yığınlarda yer alan bloklar 5 şekil kategorisinde değerlendirilmiştir.

1. Yuvarlak (Küre) Şekilli Bloklar: Yuvarlanma ve ivmelenme potansiyeli en yüksek olan blok tipleridir.
2. Oval Kenarlı Masif Bloklar: Yuvarlanmaya eğilimli olup, eğimli yüzeylerde kolayca harekete geçebilirler.
3. Keskin Kenarlı Masif Bloklar: Yuvarlanma eğilimleri düşüktür; genellikle kayma şeklinde hareket etme eğilimindedirler.
4. Yassı Geometrilik Bloklar: Yuvarlanmalarını oldukça zordur; daha çok kayarak hareket etme potansiyeli taşırlar.

5. Levha (Plaka) Şekilli Bloklar: Aşırı derecede yassı olduklarından yalnızca kayma hareketi gösterebilirler.

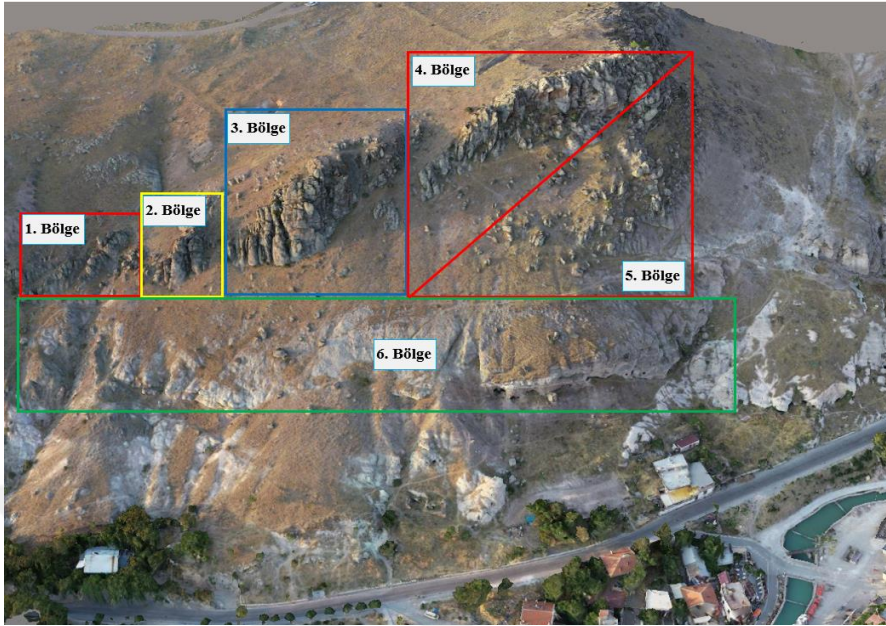


Şekil 68. Arazide işaretlenmiş olan yassı geometrili blok görüntüsü

Detaylı yüzey inceleme ve riskli blokların tespit çalışması kapsamında, araziye daha iyi anlayabilmek ve sistematik bir değerlendirme yapabilmek amacıyla çalışma sahası altı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelere ait dağılım Şekil 69'da sunulmuştur. Söz konusu bölgelemenin, hem riskli blokların tespiti ve işaretlenmesinde hem de uygulama aşamasında önemli ölçüde kolaylık sağlayacağı öngörülmektedir. Ayrıca, riskli kaya bloklarına ilişkin tabloda her bir bloğun hangi bölgede yer aldığı açıkça belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, tüm riskli bloklara ait sınır koordinatları ile uygulama sürecinde öngörülen müdahale yöntemlerinin özetine de yer verilmiştir. Bu aşamada önerilen müdahale yöntemlerinin, kaya duraylılık analizleri ve kaya düşmesi analizleri ile doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama sonrasında, ilgili blok veya bölge için optimum müdahale yöntemi net olarak belirlenmiş olacaktır. Eğer aktif müdahale yöntemleri uygulanmayacaksa, pasif koruma sistemleri tercih edilmelidir. Bunlar; enerji sönmüleyici çelik bariyer, oluk bariyer ve kaya tutucu toprakarme bariyer gibi sistemlerdir. Bu durumda, riskli blokların hacmi, ağırlığı, şekli, konumu ve blokların bulunduğu zemine ait jeomekanik özellikler de kapasite ve yeterlilik analizlerinde mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu nedenle, özellikle arkeolojik sit alanlarında optimum ıslah yönteminin belirlenebilmesi için tüm riskli bloklar ve bölgeler, detaylı yüzey inceleme ve risk tespit

çalışmaları kapsamında gözlemsel olarak da değerlendirilmelidir. Bu kapsamda, Tablo 11’de Sille Vadisi’nde tespit edilen riskli bloklardan bazıları örnek olarak sunulmuştur.



Şekil 69. Gözlemsel inceleme ve riskli blok tespit çalışması için arazinin bölgeleme şeması

Tablo 11. Riskli kaya blokları ve özet önlem önerileri.

Blok No	Risk Notu	Şekli	Açıklama	Bulunduğu Bölge	Parça Sayısı	Yükseklik (m)	Genişlik (m)	Derinlik (m)	Hacim m <sup>3</sup>
1	1	2-3	Tam Kırım	2	5	1,40	3,40	1,10	5,24
1A1	1	4	Arkasındaki parçalar kırım sonrası değerlendirilir	1	1	3,80	2,15	1,20	9,80
2	1	3	Tam Kırım	2	2	1,50	1,10	0,50	0,83
3	2	3	4. Parça Kırım Sonrası Değerlendirilir	2	3	0,80	3,80	1,20	3,65
4A	2	4	Tam Kırım	1	1	3,20	2,50	1,00	8,00
5A2	2	4	45 derece açıyla riskli üst bölgeye kırım uygulanır	1	1	4,00	2,80	3,00	33,60
6A1	1	3	Tam Kırım	1	1	1,60	1,10	1,00	1,82
7A1	2	4	Tam Kırım	2	2	1,80	1,70	0,70	5,24
21A	2	4	Tam Kırım	6	1	1,25	3,50	2,30	10,93
22	2	3	Tam Kırım	6	1	2,60	4,10	2,00	3,74
23	1	4	Tam Kırım	6	1	0,75	2,20	1,15	3,64
25	1	3	Tam Kırım	6	1	2,50	2,3	1,90	13,50
28A	3	3	Tam Kırım	6	1	0,70	1,30	1,30	21,32
53	3	4	Tam Kırım	6	1	0,60	1,60	1,30	1,25
74	1	2	Tam Kırım	5	1	0,85	1,40	2,30	2,737
86A	1	4	Tam Kırım	3	1	1,80	2,30	0,75	3,11
87A	1	3	Tam Kırım	3	1	3,10	1,80	1,50	8,37
89A	1	4	Tam Kırım	3	1	4,50	3,00	2,90	39,15
90	1	4	Tam Kırım	3	1	7,50	3,00	2,00	45,00
150	1	2	Tam Kırım	5	7	7,00	2,40	1,90	31,92
153	2	3	Tam Kırım	5	3	1,50	2,70	4,70	19,03

## **2.5. Duraylılık Analizleri (Şev Stability Analizleri)**

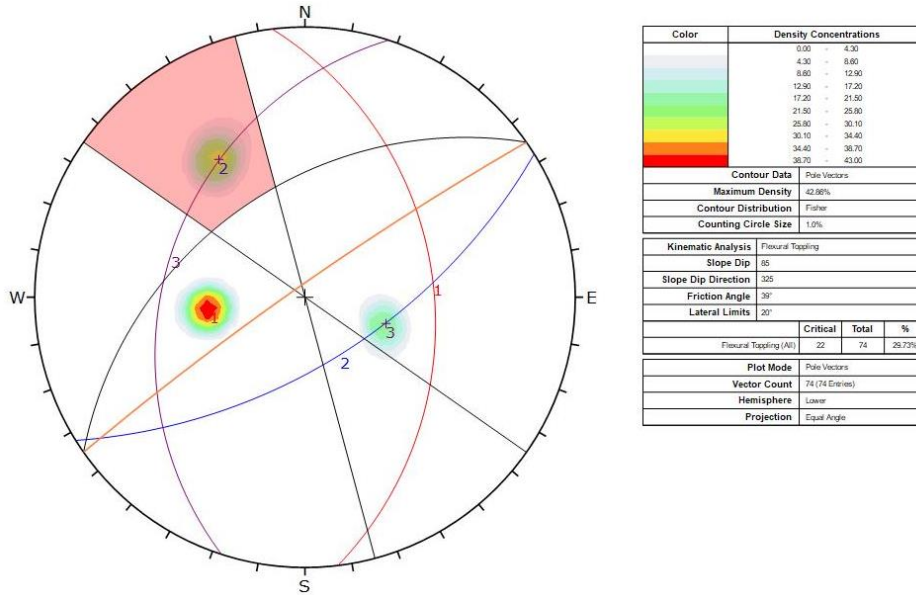
İnceleme alanında belirlenen yamaçların duraylılığının değerlendirilmesinde; kinematik analiz yöntemi, limit denge yöntemi ve sayısal analiz yöntemi kullanılmıştır. Her bir alan için kritik şev açısı belirlenmiş olup, bu değerlere göre ilgili riskli bloklara ve bölgelere uygulanacak müdahale ve koruma yöntemleri tespit edilmiştir.

### **2.5.1. Kinematik Analiz Yöntemi ile Duraylılık Analizlerinin Değerlendirilmesi**

Kaya kütlelerinde duraysızlık modelleri daha çok süreksizlik denetimli olup, düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıklar gelişmektedir. Ancak yoğun eklemli kaya kütlelerinde ileri derecede ayrışmanın da etkisi ile dairesel yenilmeler meydana gelebilmektedir. Duraysızlıkların süreksizlikler tarafından kontrol edildiği kaya kütlelerinde yaygın olarak tercih edilen duraylılık analiz yöntemi kinematik analiz yöntemidir. İlk defa Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen ve daha sonra Goodman (1989) ve Wyllie ve Mah (2002) tarafından geliştirilen bu yöntem, kaya kütlelerinde düzlemsel, devrilme ve kama tipinde meydana gelebilecek olası duraysızlıkların belirlenmesinde kullanılmaktadır.

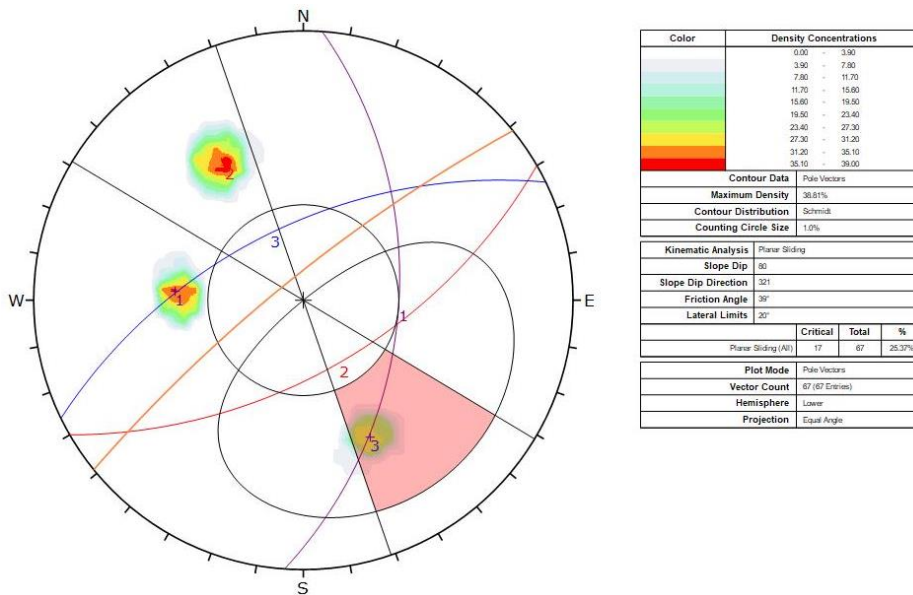
Bu yöntemde, üç ana parametre esas alınmaktadır: yamaç yönelimi, süreksizlik yönelimi ve süreksizlik yüzeylerinin sürtünme açısı. İnceleme alanında yer alan andezitik tüfler dört ayrı bölgeye ayrılarak değerlendirilmiş, dasitik breşler ise genel bir analiz kapsamında ele alınmıştır. Saha ölçüm detayları Bölüm 2.2’de sunulmuştur.

Bu bölümde ise, yapılan kinematik analizlerin sonuçları verilmiş; her bir bölge için güvenli şev açıları ve muhtemel yenilme türleri belirlenmiştir. Kinematik analiz yöntemiyle yapılan duraylılık değerlendirmelerine ilişkin sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Şekil 70’ye göre 1. Bölgede sadece 2 nolu eklem setine bağlı Devrilme Türü duraysızlık olasılığı beklenmekte olup, düzlemsel ve kama türü duraysızlık oluşmamaktadır. En büyük güvenli şev açısı  $63^{\circ}$  olarak belirlenmiştir.

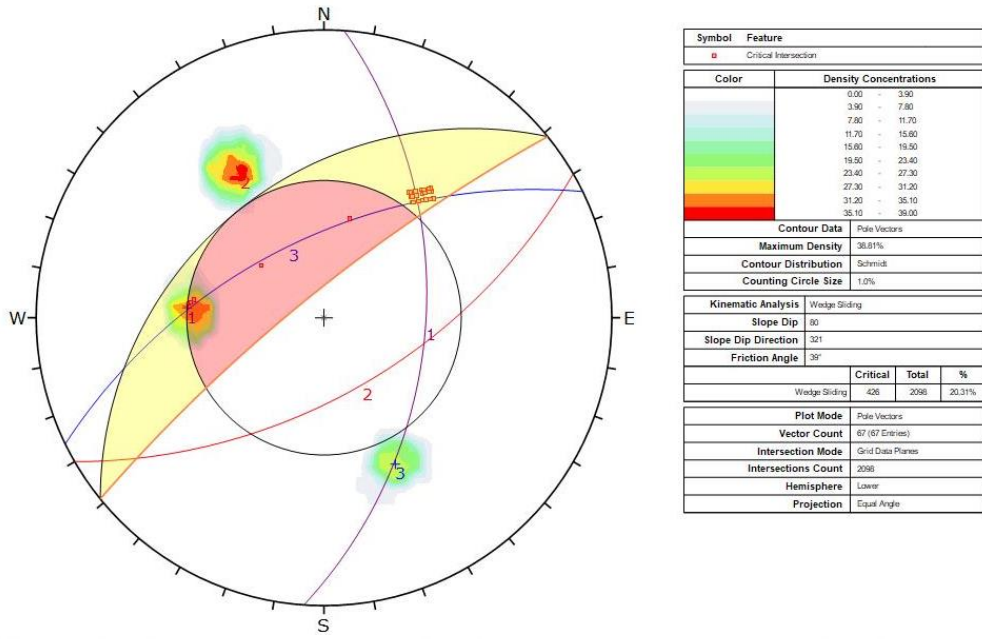


Şekil 70. Andezitik tuf'e ait 1. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık

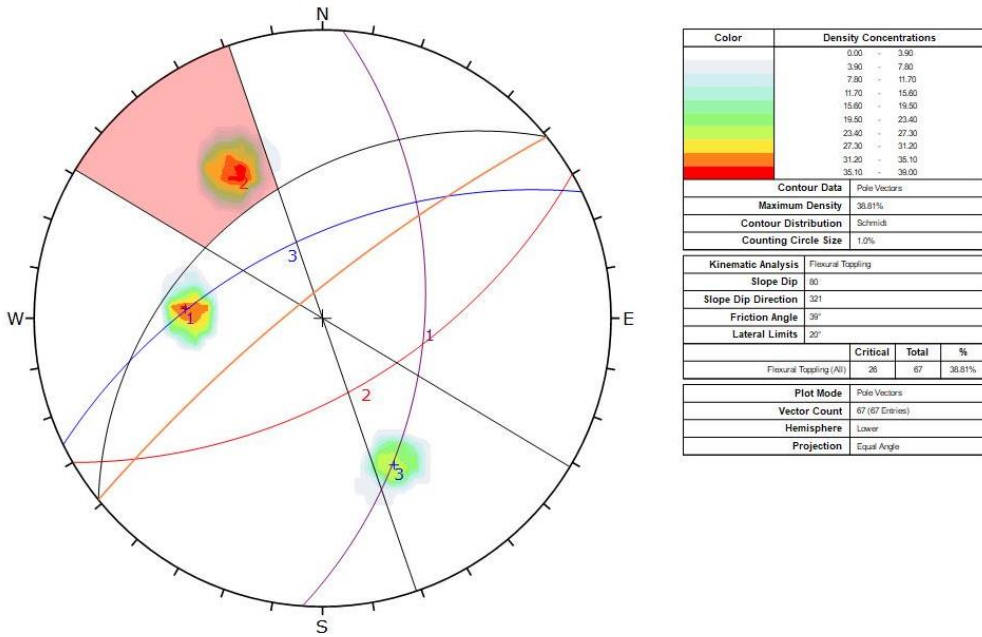
2. Bölgeye ait kinematik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 71'e göre, bu bölgede 3 numaralı eklem setine bağlı düzlemsel tip duraysızlık olasılığı bulunmakta ve söz konusu duraysızlık türü için belirlenen maksimum güvenli şev açısı  $56^\circ$ 'dir. Benzer şekilde, Şekil 72'de gösterildiği üzere, 1 ve 3 numaralı eklem setlerinin etkileşimiyle oluşabilecek kama türü duraysızlık olasılığı da mevcuttur. Bu durum için hesaplanan en büyük güvenli şev açısı  $49^\circ$  olarak belirlenmiştir. Son olarak, Şekil 73'te göre 2 numaralı eklem setine bağlı devrilme tipi duraysızlık riski söz konusudur. Bu yenilme türü için öngörülen maksimum güvenli şev açısı ise  $64^\circ$ 'dir.



Şekil 71. Andezitik tuf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve düzlemsel tip duraysızlık

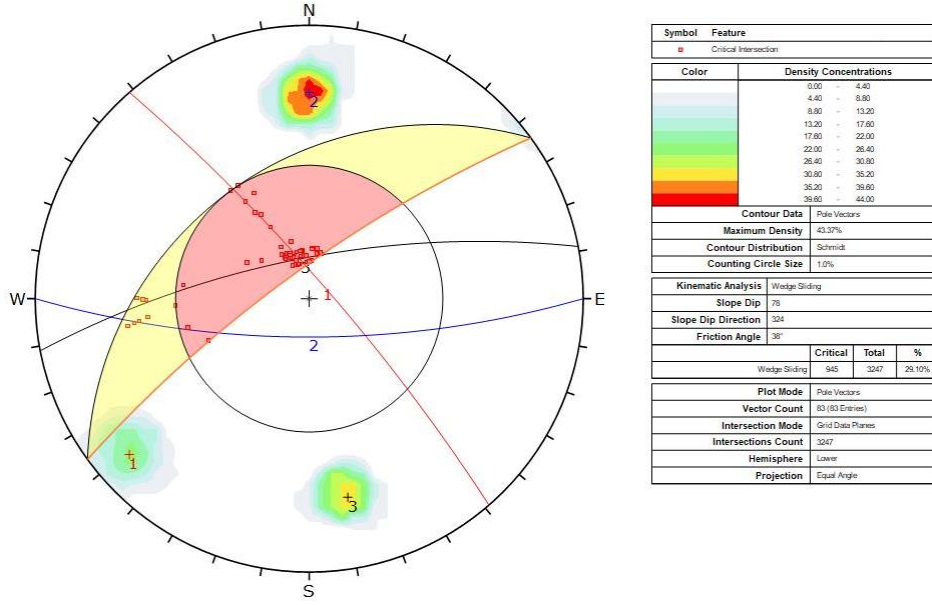


Şekil 72. Andezitik tuf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık

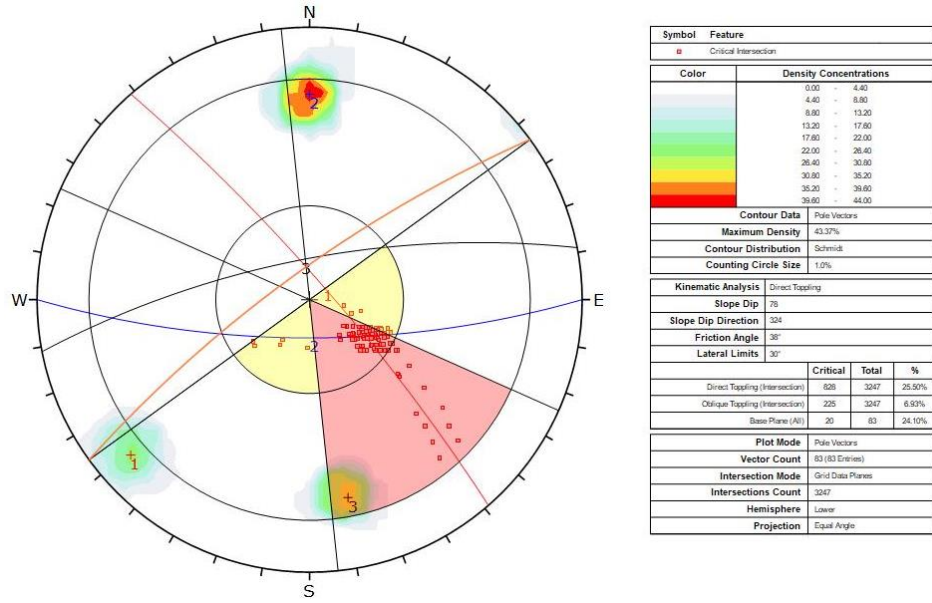


Şekil 73. Andezitik tuf'e ait 2. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık

3. Bölgeye ait kinematik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 74'de göre 1 ve 3 numaralı eklem setlerine bağlı kama tipi duraysızlık olasılığı bulunmaktadır. Bu duraysızlık türü için belirlenen maksimum güvenli şev açısı  $38^{\circ}$ 'dir. Ayrıca, Şekil 75'te gösterildiği üzere, 2 numaralı eklem setine bağlı devrilme tipi duraysızlık riski söz konusudur. Bu durum için hesaplanan en büyük güvenli şev açısı ise  $17^{\circ}$  olarak belirlenmiştir.



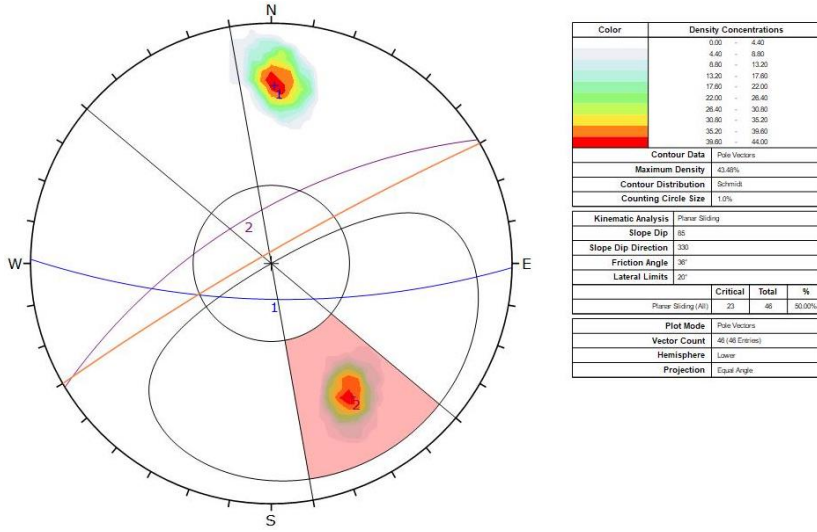
Şekil 74. Andezitik tuf'e ait 3. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık



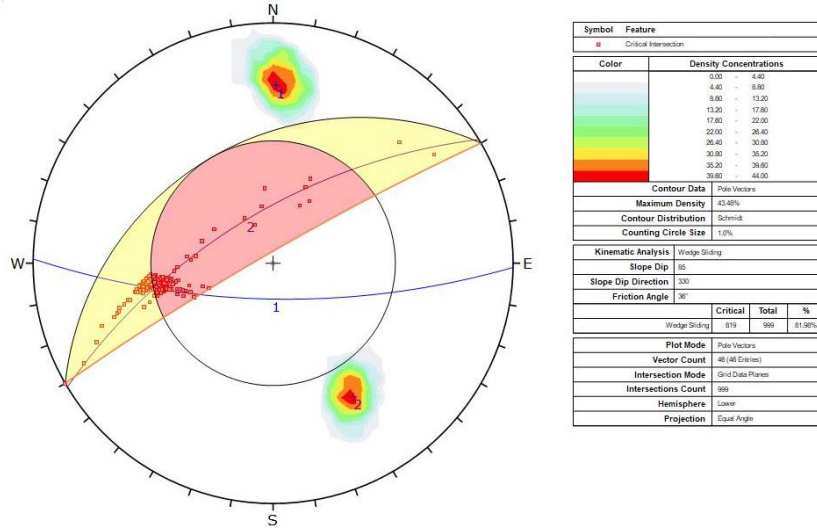
Şekil 75. Andezitik tuf'e ait 3. bölgedeki süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık

4. Bölgeye ait kinematik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Şekil 76'ya göre 1 ve 3 numaralı eklem setlerine bağlı kama tipi duraysızlık meydana gelmekte; ayrıca devrilme tipi duraysızlık olasılığı da söz konusudur. Bu analiz sonucunda belirlenen maksimum güvenli şev açısı 38°'dir. Aynı bölgede, Şekil 77'ye göre 1 numaralı eklem setine bağlı devrilme tipi duraysızlık meydana gelmekte olup, bu durum için belirlenen en büyük güvenli şev açısı 21°'dir.

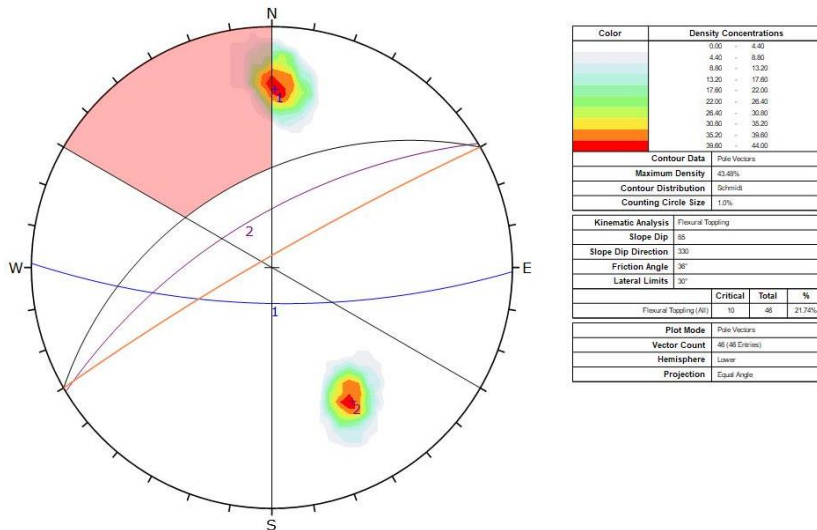




Şekil 78. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve düzlemsel kayma türü duraysızlık



Şekil 79. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve kama türü duraysızlık



Şekil 80. Dasitik breşler'e ait süreksizlik setlerinin dağılımı ve devrilme türü duraysızlık

Kinematik analiz yöntemiyle süreksizlik denetimli olarak yapılan duraylılık analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; andezitik tuf kaya kütesinden oluşan ve dört bölgeye ayrılmış inceleme alanında ve dasitik breş bölgesinde olası yamaç duraysızlıkları belirlenmiştir:

- 1. Bölgede, yalnızca 2 numaralı eklem setine bağlı devrilme türü duraysızlık olasılığı tespit edilmiştir. Bu bölgede düzlemsel ve kama tipi duraysızlık oluşmamaktadır. Buna göre güvenli şev açısı  $63^\circ$  olarak belirlenmiştir.
- 2. Bölgede, düzlemsel, kama ve devrilme türü tüm duraysızlık tiplerine rastlanmaktadır. Olası duraysızlıkların önlenmesi için en büyük güvenli şev açısının  $49^\circ$  olarak alınması yeterli olacaktır.
- 3. Bölgede, hem kama hem de devrilme türü duraysızlıklar gözlemlenmektedir. Olası duraysızlıkların ortadan kalkması için en büyük güvenli şev açısının  $17^\circ$  olarak alınması gerekmektedir. Bu bölgede fleksürel devrilme değil, doğrudan devrilme tipi duraysızlık belirlenmiştir. Yamaç yönelimiyle ters yönde eğimli blokların doğrudan devrilme riski taşınması nedeniyle, şev açısı mümkün olduğunca yatırılmalı veya düşme tehlikesi bulunan bloklar sahadan temizlenmelidir.
- 4. Bölgede, kama ve devrilme türü duraysızlıklar birlikte gözlenmiştir. Bu bölge için önerilen en büyük güvenli şev açısı  $21^\circ$ 'dir. Tıpkı 3. bölgede olduğu gibi burada da doğrudan devrilme söz konusudur. Bu nedenle, şev açısının düşürülmesi ya da tehlikeli blokların temizlenmesi gerekmektedir.
- Dasitik breşlerin yer aldığı (orta zon) bölgede, düzlemsel, kama ve devrilme türü tüm duraysızlık tiplerine rastlanmaktadır. Olası duraysızlıkların ortadan kaldırılması için en büyük güvenli şev açısının  $47^\circ$  olması gerekmektedir. Bu alanda yapılması planlanan palyelendirme uygulamasında, şev açısının  $47^\circ$ 'nin altında tutulması durumunda yamaç duraylı hale gelecektir.

### **2.5.2. Limit Denge Analiz Yöntemi ile Duraylılık Analizlerinin Değerlendirilmesi**

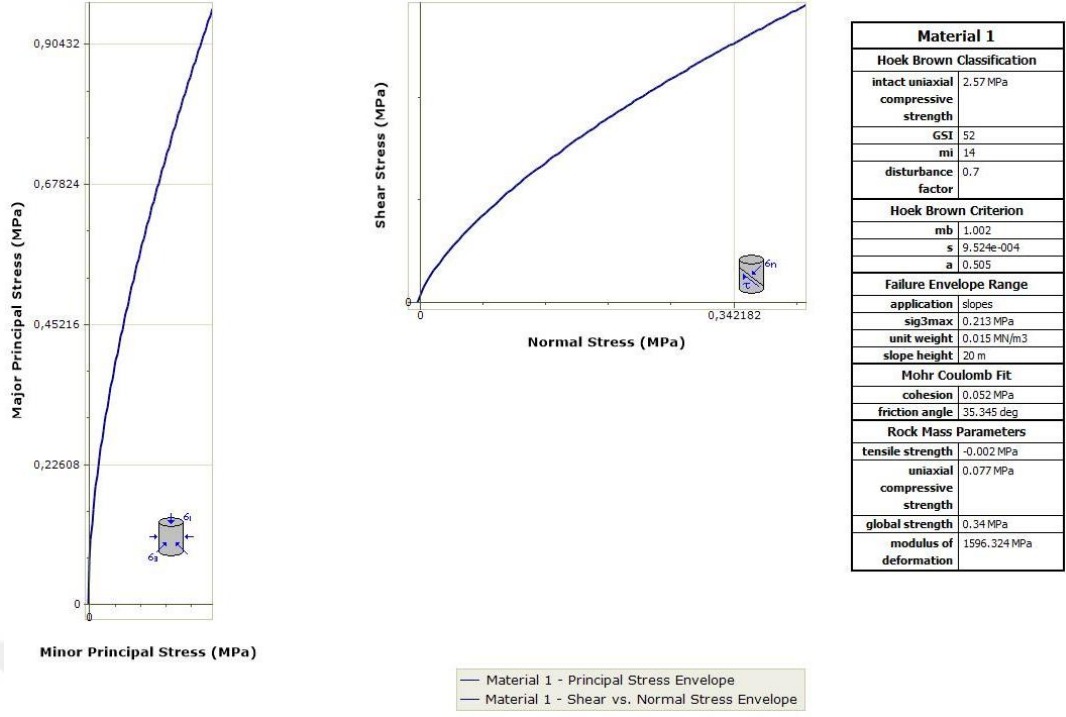
Şev stabilitesinin değerlendirilmesinde yaygın olarak tercih edilen limit denge analizleri, güvenlik katsayısının (F) hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntem, eğimli bir yüzeyde yer alan bloğun, kaymaya neden olan kuvvetlerle bu harekete karşı koyan kuvvetler arasında denge halinde olduğunu varsayan "limit denge" ilkesine dayanmaktadır (Goodman, 1991; Alemdağ vd., 2015).

Analizler sonucunda elde edilen F değerleri; Şevin yüksekliği, yönelimi ve basamak genişliği gibi parametrelerin yeniden değerlendirilmesine imkan tanıyarak, optimum Şev tasarmnn yapılmasını mümkün kılmaktadır.

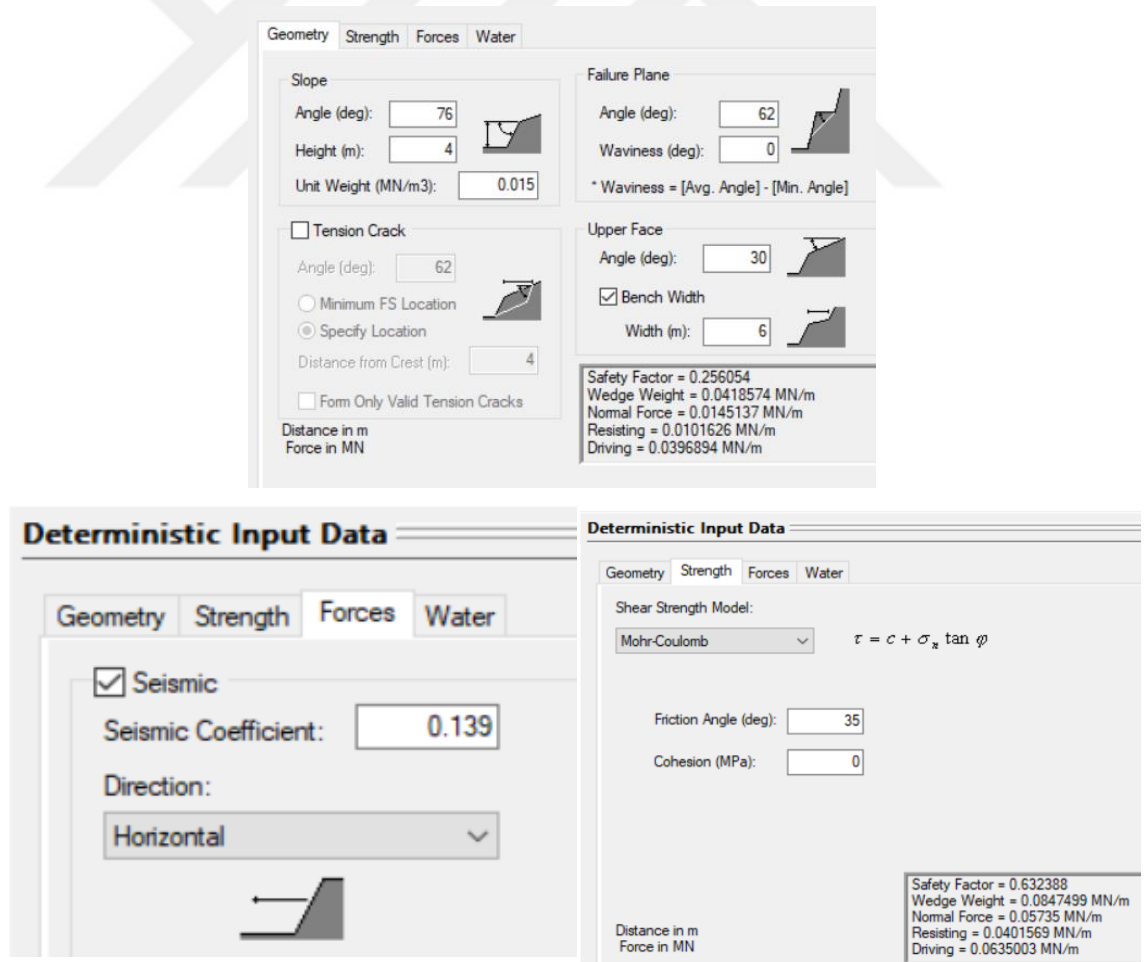
Bu çalışmada, kinematik analizler sonucunda dasitik breşlerde (Orta bölge) meydana gelen muhtemel düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıklar mevcut olup (Şekil 81), bu duraysızlıklardan inceleme alanında RocPlane (Rocscience, 2020) bilgisayar programı kullanarak iki boyutlu limit denge analizleri yapılmış ve güvenlik katsayıları belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan sürtünme açısı saha çalışmalarında yapılan süreksizlik incelemeleri ve alınan blok örneklerden elde edilen dayanım ve fiziksel özellikler yardımıyla Hoek-Brown yenilme kriteri dikkate alınarak kaya kütle özellikleri belirlenmiştir (Şekil 82). Limit denge analizinde dinamik yük olarak, Sille Vadisi ve civarnn yatay etkin yer ivmesi Türkiye Deprem Tehlike Haritasından alınarak 0.139g olarak belirlenmiştir. Düzlemsel tip yenilmelerin limit denge analizlerinde kullanılan girdi parametreleri Şekil 83'te ve analizler sonucunda elde edilen F değerleri ise Şekil 84-86'da verilmiştir.



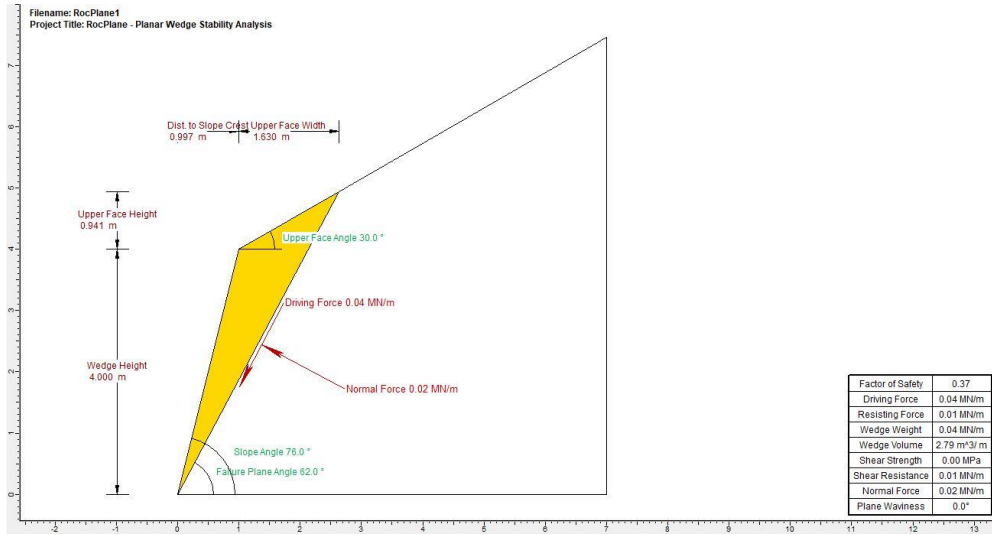
Şekil 81. İnceleme alanında dasitik breşlerin gözlemlendiği olası duraysızlık alanlarının görünümü



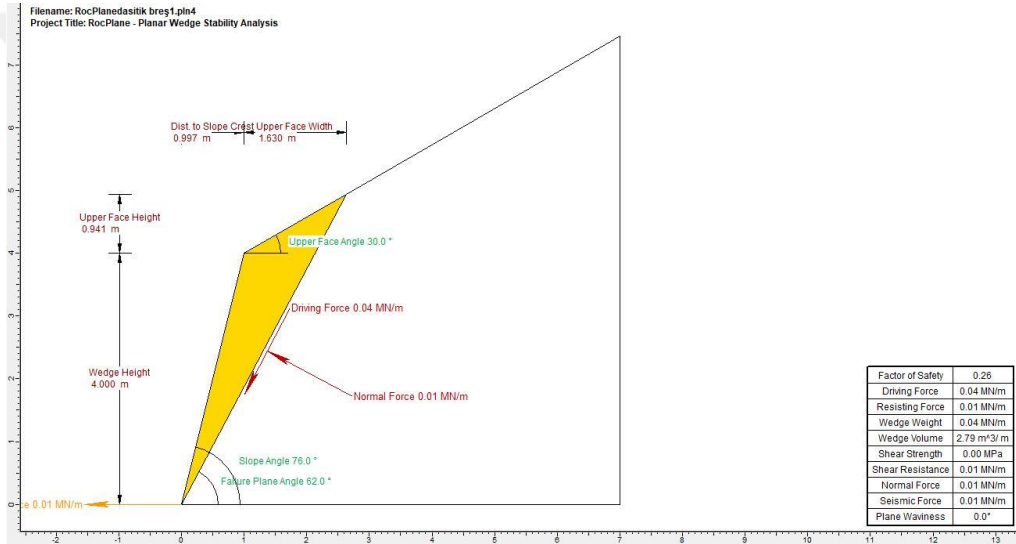
Şekil 82. Dasitik breşlerin kaya kütle özellikleri



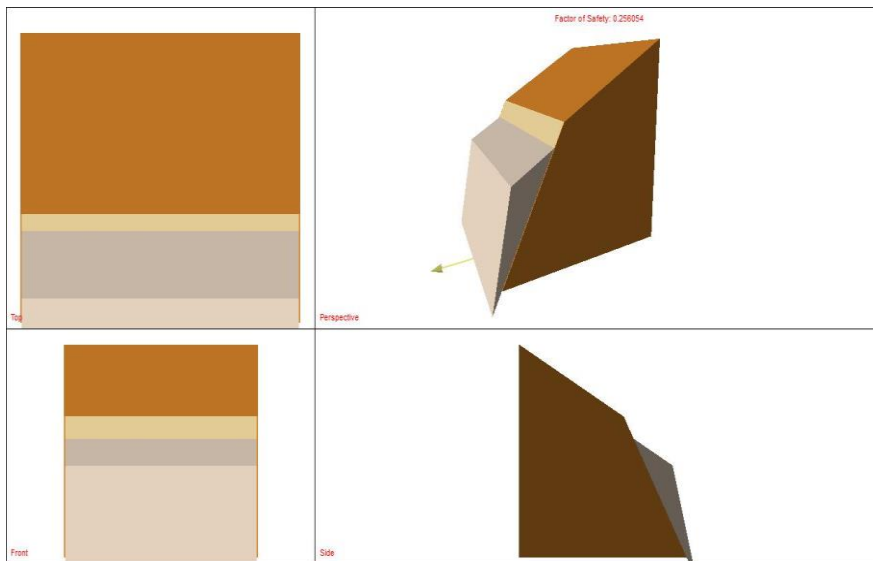
Şekil 83. Dasitik breşler için limit denge analizinde kullanılan parametreler



Şekil 84.Dasıtik breşlerin düzlemsel kayma mekanizması



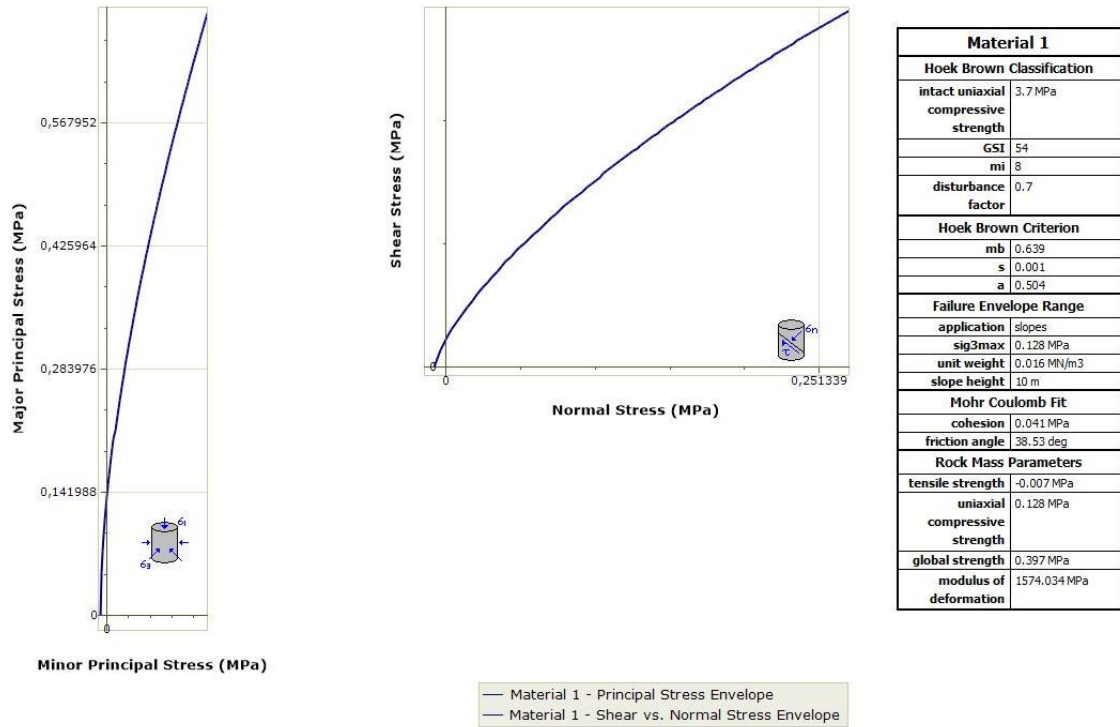
Şekil 85.Dasıtik breşlerin düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde)



Şekil 86.Dasıtik breşlerin 3 D düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde)

Dasitik breşlerde (çalışma alanı orta zonda) yapılan saha incelemeleri ve laboratuvar deneyleri sonucunda yapılan duraysızlık değerlendirmeleri öncelikle kinematik analiz yöntemi ile değerlendirilmiş olup, düzlemsel, devrilme ve kama türü duraysızlıkların olduğu belirlenmiştir. İnceleme alanında yenilme zonlarındaki bloklar limit denge analizlerinden düzlemsel yenilme analizi ile değerlendirilmiş ve güvenlik sayısı F: 0.37 olarak bulunmuştur. Sismik yük etkisi altında yapılan analizlerde ise güvenlik sayısının F: 0.26 olduğu belirlenmiştir. Bu durum blokların düşmüş ve düşme olasılığı çok yüksek olduğunu ifade etmektedir. Yani inceleme alanında (Orta zon) dasitik breşlerin olduğu güzergahta kaya kütesinin ayrılmış ve eklem setleri içermesi sebebi ile hem doğal olarak hem de sismik yük etkisi altında duraysız olduğu limit denge ve kinematik analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Yapılan kinematik analiz sonuçlarında belirlenen en büyük güvenli şev açısı  $47^\circ$  olarak belirlenmiş olup, inceleme sahasında oluşturulacak şev düzenlemelerinde  $45^\circ$  lik şev tasarımlarında duraysızlık beklenmemektedir. Ayrıca düşmesi olası bloklar kırım ve temizleme veya koruma yapıları ile önlem alınabilir.

İnceleme alanının en alt kotunda akma şeklinde dom yapılarında oluşmuş dasitik tüfler bulunmakta olup, saha incelemeleri ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile belirlenmiş kaya kütle mühendislik özellikleri Şekil 87’de verilmiştir.



Şekil 87. Dasitik tüflerin kaya kütle özellikleri

Dasitik tüflerde dom yapılarında oluşmuş ayrışma ve süreksizlik düzlemleri dikkate alınarak yapılan düzlemsel kayma RocPlane (Rocscience, 2020) bilgisayar programında değerlendirilmiş olup, iki boyutlu limit denge analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde Şekil 88’de verilen parametreler kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçları doğal yamaç durumu ve sismik yük etkisi altında değerlendirilerek güvenlik sayıları belirlenmiştir (Şekil 89-91).

İnceleme alanında yenilme zonlarındaki bloklar limit denge analizlerinden düzlemsel yenilme analizi ile değerlendirilmiş ve güvenlik sayısı F: 0.93 olarak bulunmuştur. Sismik yük etkisi altında yapılan analizlerde ise güvenlik sayısının F: 0.71 olduğu belirlenmiştir. Bu durum blokların düşmüş ve düşme olasılığı çok yüksek olduğunu ifade etmektedir. Yani inceleme alanında (alt zon) dasitik tüflerin olduğu güzergahta kaya kütlelerinin ayrılmış ve eklem setleri içermesi sebebi ile hem doğal olarak hem de sismik yük etkisi altında duraysız olduğu limit denge analiz yöntemleri ile belirlenmiştir.

**Deterministic Input Data**

Geometry Strength Forces Water

Slope  
 Angle (deg): 70  
 Height (m): 4  
 Unit Weight (MN/m<sup>3</sup>): 0.015

Failure Plane  
 Angle (deg): 40  
 Waviness (deg): 0  
 \* Waviness = [Avg. Angle] - [Min. Angle]

Tension Crack  
 Angle (deg): 70  
 Minimum FS Location  
 Specify Location  
 Distance from Crest (m): 2  
 Form Only Valid Tension Cracks

Upper Face  
 Angle (deg): 5  
 Bench Width  
 Width (m): 5

Distance in m  
 Force in MN

Safety Factor = 0.93288  
 Wedge Weight = 0.0047499 MN/m  
 Normal Force = 0.05735 MN/m  
 Resisting = 0.0401569 MN/m  
 Driving = 0.0635003 MN/m

**Deterministic Input Data**

Geometry Strength Forces Water

Seismic  
 Seismic Coefficient: 0.139  
 Direction: Horizontal

Geometry Strength Forces Water

Shear Strength Model:  
 Mohr-Coulomb  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$

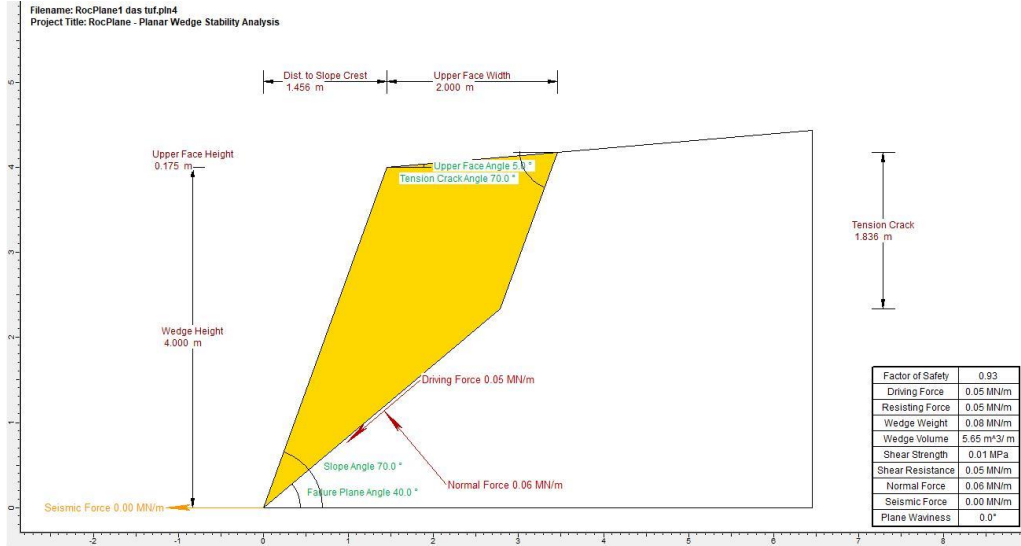
Friction Angle (deg): 30  
 Cohesion (MPa): 0

Distance in m  
 Force in MN

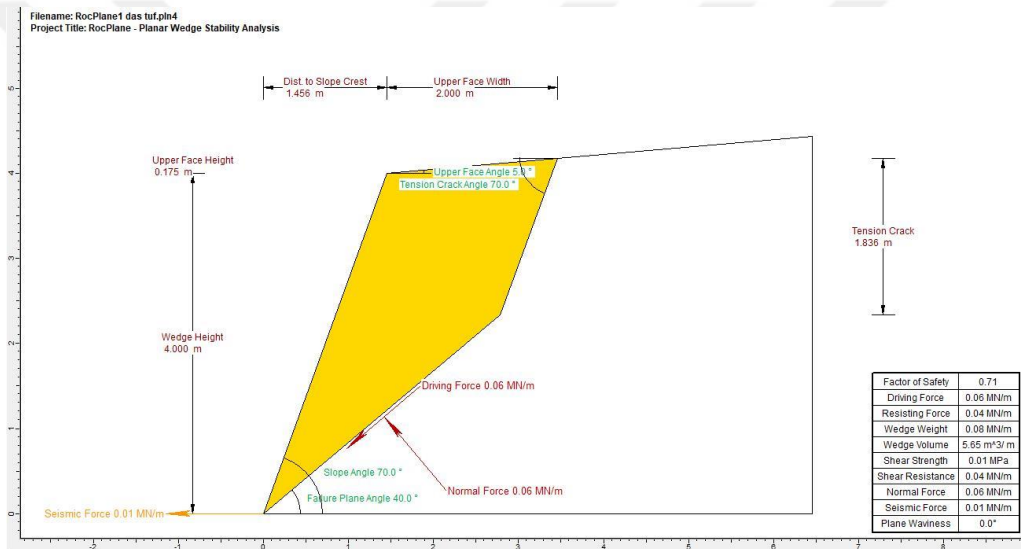
Safety Factor = 0.5311  
 Wedge Weight = 0.2047499 MN/m  
 Normal Force = 0.0649222 MN/m  
 Resisting = 0.0507228 MN/m  
 Driving = 0.3544762 MN/m



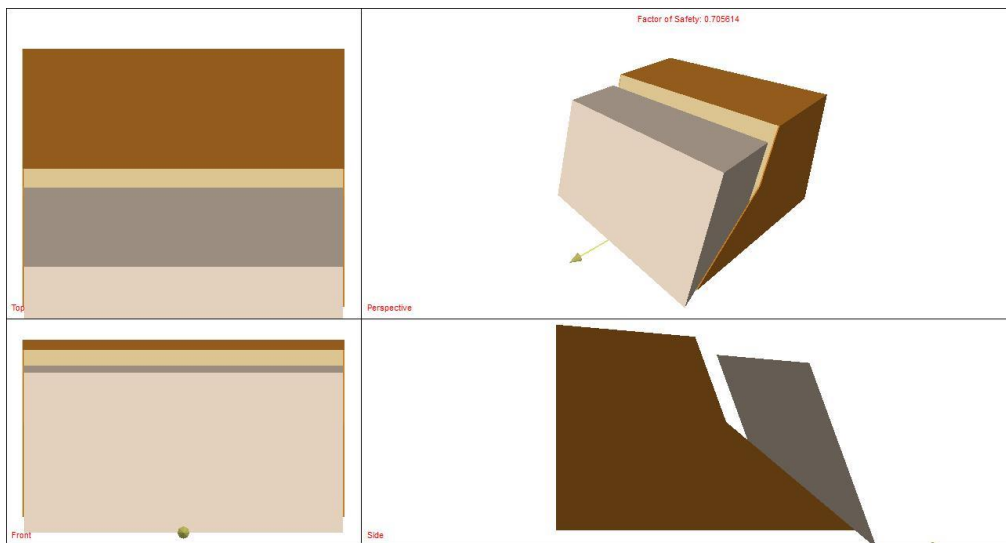
Şekil 88. Limit denge analizlerinde kullanılan dayanım ve geometri parametreleri ve analiz edilen kütle



Şekil 89. Dasitik tüflerin düzlemsel kayma mekanizması



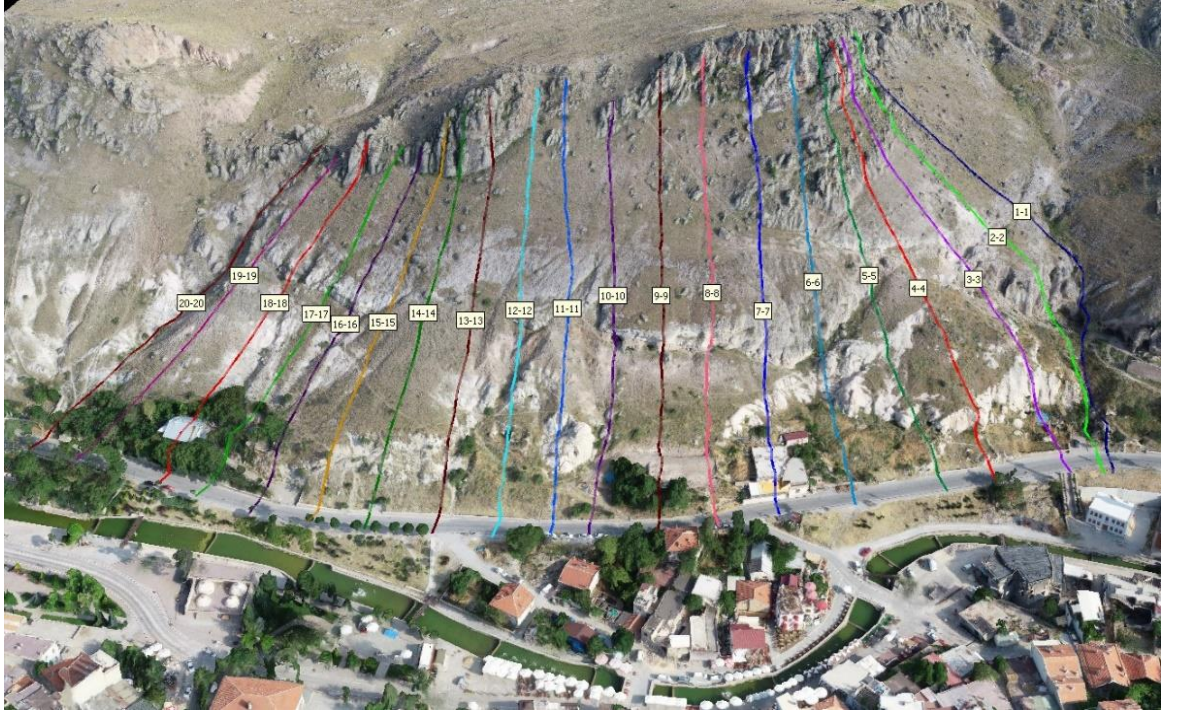
Şekil 90. Dasitik tüflerin düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde)



Şekil 91. Dasitik tüflerin 3 D düzlemsel kayma mekanizması (Sismik yük etkisinde)

## 2.5.2. Yamaçların Sayısal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi

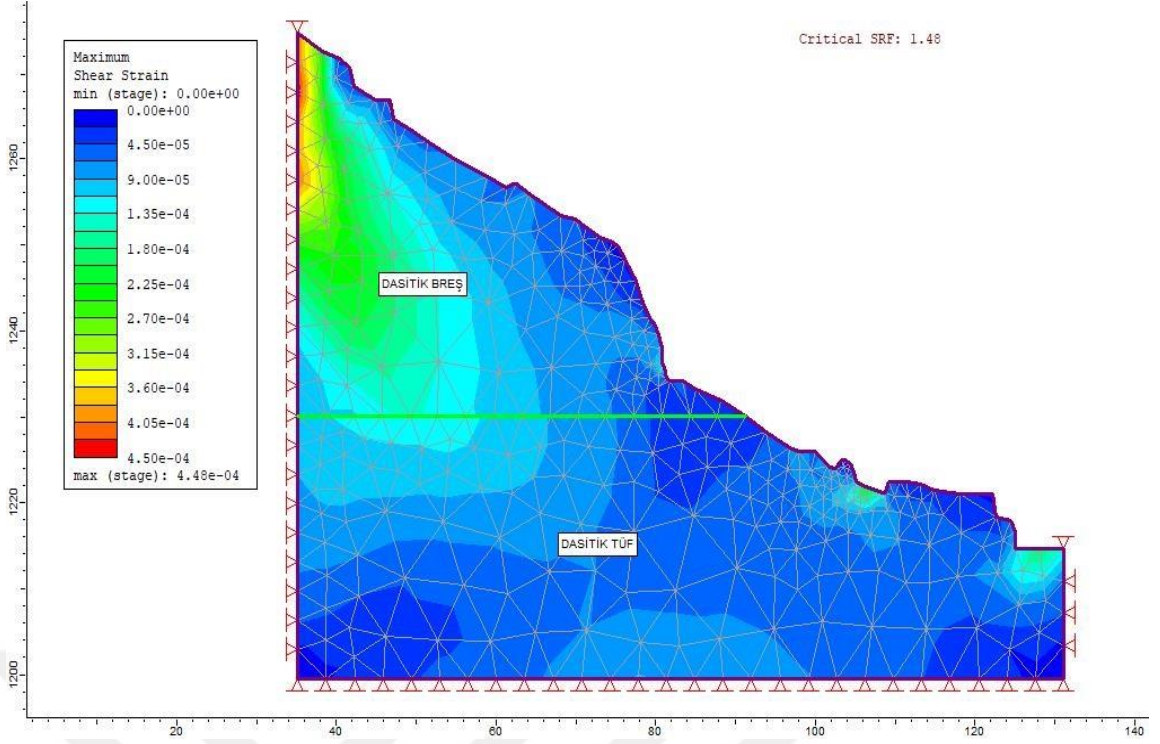
Sille Vadisi çalışma alanı güzergahında (Şekil 92) litolojik olarak dasitik breş ve dasitik tuf birimlerini karakterize eden 7 nolu kesit hattındaki topoğrafyada gelişebilecek duraysızlığı belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi “RS2 11.0” (Rocscience, 2020) programından yararlanılmış ve kritik SRF (Gerilme azaltma faktörü) değeri ile toplam yer değiştirme analizleri yapılmıştır (Şekil 94-Şekil 97). Oluşturulan modellerde Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yenilme kriteri kullanılarak gerilme-deformasyon analizleri yapılmış ve plastik yenilmeler araştırılmıştır. Sayısal analizlerde sismik yükler de dikkate alınmış ve bölgenin deprenselliği dikkate alınarak etkin yer ivmesi 0.139g olarak kullanılmıştır. Sayısal analizde kullanılan parametreler Şekil 93’te verilmiştir.



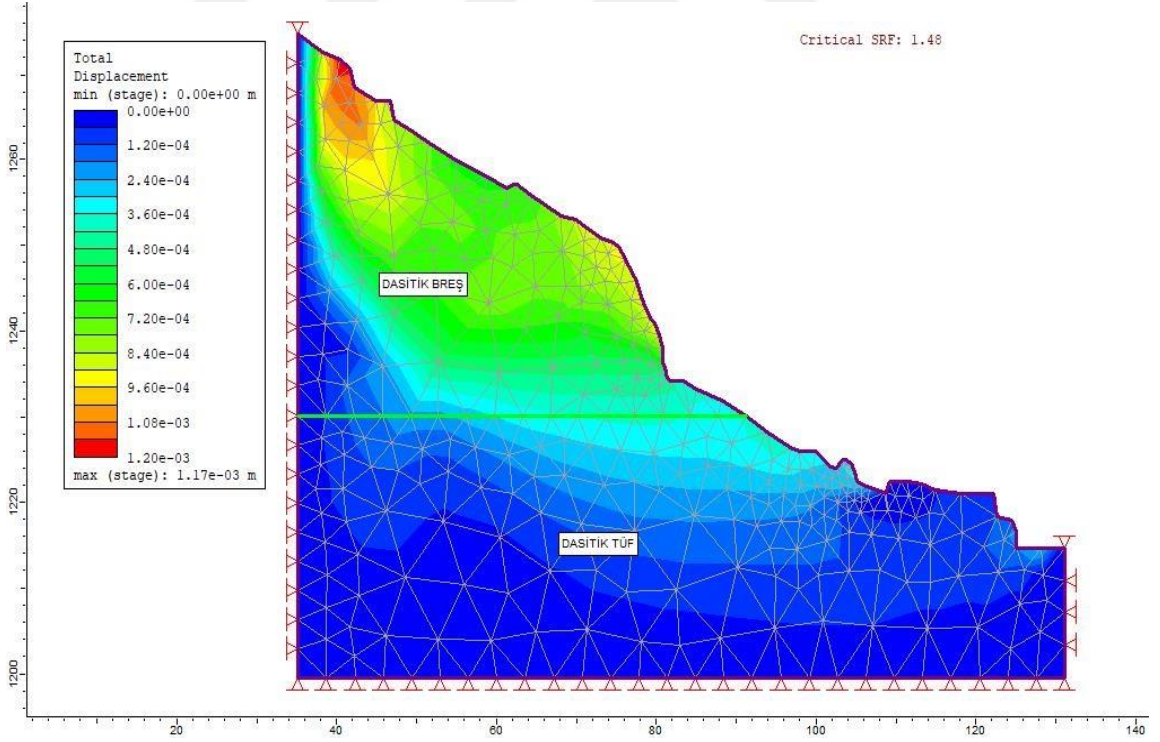
Şekil 92. İnceleme alanını karakterize eden kesit hatları

Dastık Breş		Dastık Tuf		
Name:	Dastık Breş	Name:	Dastık Tuf	
Fill:		Fill:		
Hatch:		Hatch:		
Initial Conditions	Stiffness	Strength	Hydraulic Properties	Datum Dependency
Failure Criterion:	Generalized Hoek-Brown			
Type	Data	Type	Data	
Material Type	Plastic	Material Type	Plastic	
Peak Strength		Peak Strength		
Compressive Strength (MPa)	2.57	Compressive Strength (MPa)	3.7	
mb Parameter	1.002	mb Parameter	0.639	
s Parameter	0.000952	s Parameter	0.001	
a Parameter	0.505	a Parameter	0.504	
Residual Strength		Residual Strength		
Residual mb Parameter	1.002	Residual mb Parameter	0.639	
Residual s Parameter	0.000952	Residual s Parameter	0.001	
Residual a Parameter	0.505	Residual a Parameter	0.504	
Dilation Parameter	0	Dilation Parameter	0	
Apply SSR (Shear Strength Reduction)	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Apply SSR (Shear Strength Reduction)	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	
Tensile Cutoff Type	None	Tensile Cutoff Type	None	

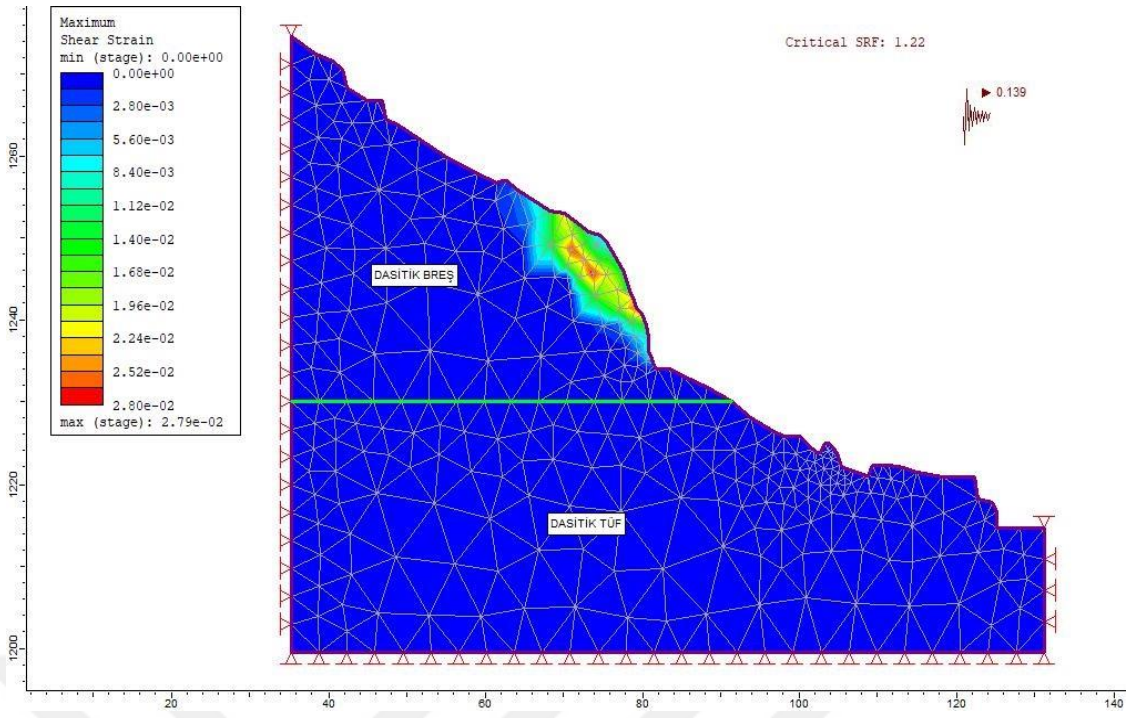
Şekil 93. Sayısal analizde kullanılan parametreler



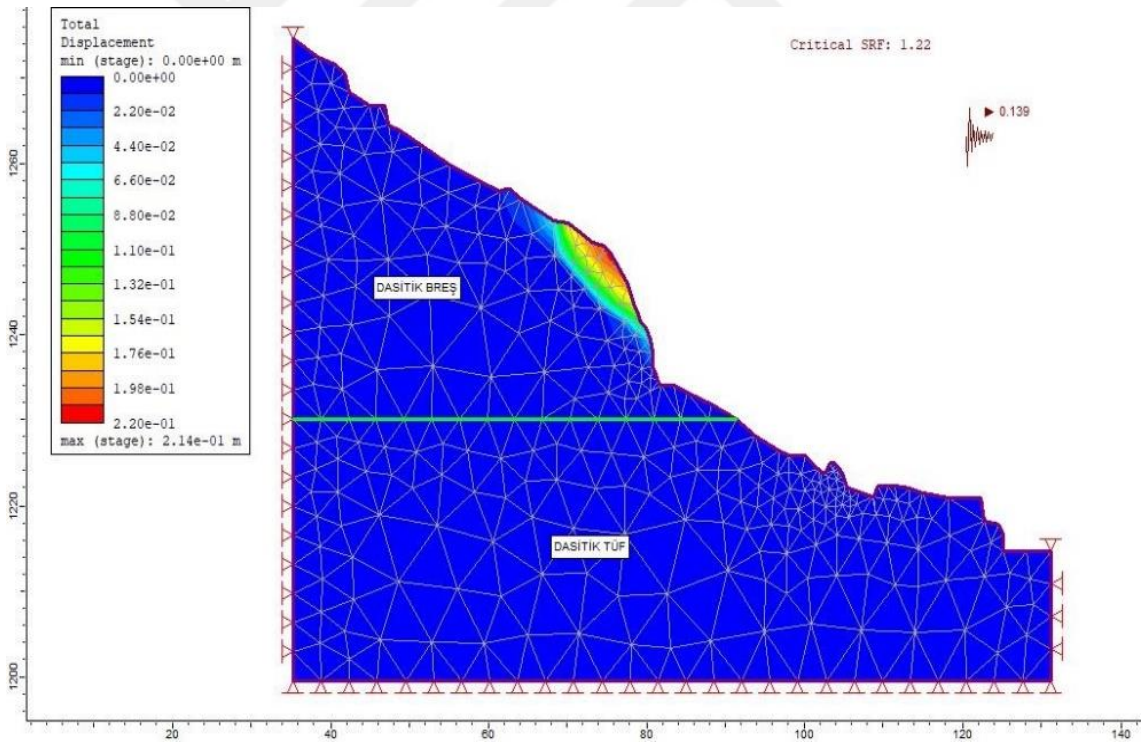
Şekil 94. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait maksimum kesme gerilmesi analizi (7 Nolu Kesit hattı)



Şekil 95. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait deformasyon analizi (7 Nolu Kesit hattı)



Şekil 96. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait maksimum kesme gerilmesi analizi (Sismik yüklü)



Şekil 97. Dasitik breş ve dasitik tüflere ait deformasyon analizi (Sismik yüklü)

İnceleme alanında, dasitik breş ve dasitik tüflerin oluşturduğu topoğrafyanın genel durumunu değerlendirmek amacıyla seçilen 7 numaralı kesit hattında yapılan sayısal analiz sonucunda güvenlik sayısı (SRF) 1.48 olarak hesaplanmıştır. Deformasyon analizine göre, topoğrafyada meydana gelen toplam yer değiştirme 0.12 cm'dir. Bölgenin

deprenselliği dikkate alınarak sismik yük etkisi altında yapılan analizlerde ise güvenlik sayısı SRF 1.22, toplam yer değiştirme ise 21.4 cm olarak belirlenmiştir.

Kısa süreli şev ve yamaçlarda limit denge koşulu (SRF:1) üstünde çıkan güvenlik sayılarının güvenli olduğu değerlendirilir. Uzun süreli şev ve yamaçların tasarımlarında sismik yük etkisi altında güvenlik sayısının SRF: 1.2'in üzerinde olması incelenen topoğrafyanın duraylı olduğunu ifade etmektedir. İnceleme sahasını karakterize eden 7 nolu kesitte sismik yük etkisi altında yapılan analizlerde güvenlik sayısı SRF: 1.22 olarak belirlenmiş olup, uzun süreli yamaçların dengesi için global stabilite açısından duraulı olduğunu ifade etmektedir. Ancak yapılan toplam yer değiştirme analizinde yüksek eğime sahip dasitik breşlerin olduğu zonda meydana gelen maksimum yer değiştirme 21.4 cm olup, bu durum olası bir deprem durumunda blok kopmalarına ve kaya düşmesine sebebiyet verecektir. Dasitik breşlerde hem kinematik analiz, hem de limit denge analizleri sonucunda mevcut kütlelerin duraysız olduğu belirlenmiş olup, bu durum yapılan toplam yer değiştirme analizini de doğrular niteliktedir. Dasitik breşlerde meydana gelen duraysızlığı önlemek için şevlerde uygun açılarda düzenleme veya iyileştirme yöntemleri kullanılarak olası kaya düşmelerini önlemek gerekmektedir. Bu durum yapılan kinematik analiz yöntemi ile değerlendirilmiş olup, yamaçlarda yüksek eğim açısına sahip alanların 45° eğime düşürülmesi durumunda bu duraysızlık ortadan kalkacaktır.

İnceleme alanında yapılan değerlendirmeler kapsamında çalışma sahası üç farklı litolojik birimden oluşmakta olup, bu birimler tavandan tabana andezitik tuf, dasitik breş ve dasitik tuf özelliğindedir. Kaya kütlelerinde belirlenen süreksizliklerin mühendislik özellikleri ve alınan blok örneklerde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen jeoteknik parametreler yardımıyla kinematik analiz, limit denge analizi ve sayısal analiz olmak üzere üç farklı analiz yöntemi ile yamaçların duraylılığı değerlendirilmiştir. Buna göre; andezitik tuf, dasitik breş ve dasitik tuf kaya kütlelerinde yapılan yamaç duraylılık analizlerinde incelenen bütün kaya kütleleri duraysız özelliktedir.

- I. Andezitik tüfler inceleme alanında dört farklı bölgeye ayrılmış olup, her bir bölge için yamaçlar kinematik analiz yöntemi ile değerlendirilmiş olup, mevcut haliyle bütün bölgeler duraysız çıkmaktadır. Bu duraysızlığı gidermek için her bir bölge için güvenli şev açıları belirlenmiştir. Bunlar;
  1. Bölgede sadece 2 nolu eklem setine bağlı devrilme türü duraysızlık olasılığı beklenmekte olup, düzlemsel ve kama türü duraysızlık oluşmamaktadır. Buna göre inceleme bölgesindeki güvenli şev açısı 63° olarak belirlenmiştir.

2. Bölgede düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıkların hepsine rastlanmakta olup, en büyük güvenli şev açısı  $49^\circ$  olarak alınması durumunda olası duraysızlıklar ortadan kalkmış olacaktır.
  3. Bölgede kama ve devrilme türü duraysızlıkların her ikisine de rastlanmakta olup, en büyük güvenli şev açısı  $17^\circ$  olarak alınması durumunda olası duraysızlıklar ortadan kalkmış olacaktır.
  4. Bölgede kama ve devrilme türü duraysızlıkların her ikisine de rastlanmakta olup, en büyük güvenli şev açısı  $21^\circ$  olarak alınması durumunda olası duraysızlıklar ortadan kalkmış olacaktır.
- II.** İnceleme alanında (Orta zon) dasitik breşlerin olduğu güzergahta kaya kütesinin ayrılmış ve eklem setleri içermesi sebebi ile hem doğal olarak hem de sismik yük etkisi altında duraysız olduğu limit denge ve kinematik analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Yapılan kinematik analiz sonuçlarında belirlenen en büyük güvenli şev açısı  $47^\circ$  olarak belirlenmiş olup, inceleme sahasında oluşturulacak şev düzenlemelerinde  $45^\circ$  lik şev tasarımlarında duraysızlık beklenmemektedir. Aynı durum dasitik tüfler içinde geçerlidir.
- III.** İnceleme sahasını karakterize eden 7 nolu kesitte sismik yük etkisi altında yapılan analizlerde güvenlik sayısı SRF: 1.22 olarak belirlenmiş olup, uzun süreli yamaçların dengesi için global stabilite açısından duraylı olduğunu ifade etmektedir. Ancak yapılan toplam yer değiştirme analizinde yüksek eğime sahip dasitik breşlerin olduğu zonlarda meydana gelen maksimum yer değiştirme 21.4 cm olup, bu durum olası bir deprem durumunda blok kopmalarına ve kaya düşmesine sebebiyet verecektir. Bu durumu ortadan kaldırmak için inceleme alanındaki yüksek eğimli yamaçlarda ya şevlendirme yapılarak  $45^\circ$ 'ye düşürülmesi ya da riskli bölgelere lokal müdahalelerin edilmesi durumunda duraysızlığın ortadan kalkması beklenmektedir.

### 3. KAYA DÜŞME ANALİZLERİ

#### 3.1. Kaya Düşme Analizlerine Genel Bakış

Kaya düşmesi tehlikesinin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler, çalışmanın yürütüldüğü alanın ölçeğine ve risk altındaki unsurların hassasiyetine göre farklılık göstermektedir. Bölgesel ölçekte yapılan ön değerlendirme çalışmalarında ampirik yöntemler, hızlı ve pratik çözümler sunmaları nedeniyle tercih edilmekte; ancak mühendislik uygulamaları gerektiren lokal sahalarda, daha detaylı ve güvenilir sonuçlar sunan deterministik ve olasılıksal yaklaşımlar (2D, 2.5D ve 3D analizler) kullanılmaktadır (Dorren, 2003; Guzzetti vd., 2002). Bu yöntemlerin seçimi, yalnızca jeolojik yapı ile sınırlı kalmayıp aynı zamanda topoğrafyanın genel morfolojisi ve risk sahasında bulunan yapıların özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

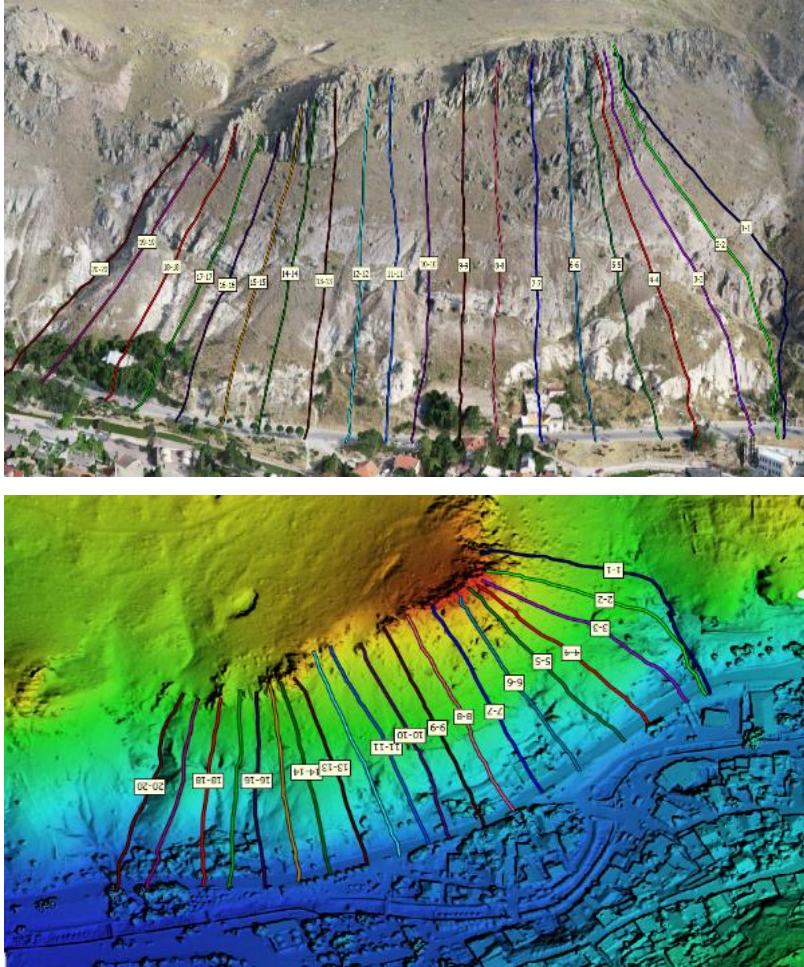
Kaya düşmelerinin modellenmesinde topoğrafik eğim, yüzey pürüzlülüğü ve malzeme türü gibi faktörler blok hareketinin karakterini doğrudan etkiler. Düşen blokların izlediği yol, temas noktalarında yaşanan enerji kayıpları ve sıçrama davranışı, hem yüzey şekline hem de zemin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Aglardi ve Crosta, 2003). 2D analizler, belirli bir kesit boyunca hızlı değerlendirme olanağı sunarken; 2.5D modeller daha geniş alanlarda, sınırlı yönelime sahip senaryoları içerir. 3D analizler ise arazinin üç boyutlu yapısını dikkate alarak daha gerçekçi enerji dağılımı ve sıçrama senaryoları üretir; ancak veri temini, yazılım becerisi ve işlem süresi açısından daha fazla kaynak gerektirir (Lan vd., 2007).

Sayısal kaya düşmesi simülasyonları, blokların potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşümü, temas noktalarındaki hız değişimi ve geri sıçrama davranışları gibi dinamik parametreleri analiz ederek güvenli alanların belirlenmesine katkı sağlar. Bu bağlamda, geri sıçrama katsayısı (coefficient of restitution), düşen bloğun bir yüzeye çarpma sonrası ne kadar enerji ile sıçrayacağını tanımlayan temel parametrelerden biridir (Bozzolo ve Pamini, 1986). Simülasyonlarla elde edilen bu parametreler, koruma yapılarının (enerji sönmüleyici bariyer, galeri, kaya tutucu toprakarme bariyer vb.) yerleşimi ve boyutlandırılması için kritik öneme sahiptir. Böylece risk altındaki bölgelerde mühendislik temelli kararların alınması sağlanır ve olası kaya düşmesi kaynaklı can ve mal kayıplarının önüne geçilebilir (Dorren, 2003).

### 3.2. 2D Kaya Düşme Analizleri

2D kaya düşme analizleri, arazinin belirli bir güzergahı boyunca alınan kesitler üzerinden iki boyutlu olarak gerçekleştirilen değerlendirmelerdir. Bu analizlerde, yamaç yüzeyinde veya düşme potansiyeli taşıyan blokların düşmeleri durumunda ulaşabilecekleri maksimum mesafe, hız ve çarpma anındaki toplam kinetik enerji, belirlenen kesit hattı boyunca hesaplanmaktadır. Çalışma alanındaki riskli blokların düşmesi durumunda ne kadar mesafe kat edebilecekleri, hangi hızla hareket edecekleri ve çarpma anında taşıyacakları toplam kinetik enerji değerlerini belirlemek amacıyla öncelikle 2D kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda, fotogrametrik yöntemlerle oluşturulan üç boyutlu hassas sayısal arazi modeli üzerine yapılan ön değerlendirmeler sonucunda, düşme riski taşıyan bloklar için en kritik 20 güzergah belirlenmiştir. Şekil 98’de, arazi üzerinde seçilen ve kaya düşme riski açısından ön plana çıkan bu güzergahlar gösterilmektedir. Belirlenen güzergâhların en kesitleri alınarak, RockFall 8 (RockScience Inc.) yazılımı aracılığıyla iki boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 98. 3D model üzerinde yamaçta belirlenen kritik kaya düşme güzergâhları

### 3.2.1. 2D Kaya Düşme Analizlerinde Parametrelerin Tanımlanması

Kaya düşme analizleri yapılırken belirlenen güzergahların geometrileri 3 boyutlu sayısal arazi modelinden  $\pm 5\text{cm}$  hassasiyet ile programa aktarılmıştır. Güzergâh boyunca bazı bölgelerde bitki örtüsü ve ağaçlar mevcuttur. Fakat maki bitki örtüsünün kaya düşmelerinde fazla bir etkisi olmadığından dikkate alınmamıştır. Ayrıca yamaçtaki ağaçlarda ince gövdeli olduğundan kaya düşmesi istatistiksel bir analiz olduğundan ağaçlar kesitlerden temizlenerek analize dahil edilmiştir. Böylece arazideki şev ve topografik değişim gerçeğe çok yakın bir biçimde idealleştirilmiştir. Kaya düşme analizlerinde güzergâh boyunca yamacın jeolojik yapısına bağlı olarak belirlenen malzeme parametreleri tanımlanmıştır.

Kaya düşme analizlerinde elde edilen sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olan temel parametreler, yüzeyle temas anında gerçekleşen enerji kayıplarını temsil eden geri sıçrama katsayıları ( $R_n$  ve  $R_t$ ) ile malzemenin içsel özelliklerinden biri olan sürtünme açısıdır. Düşen blokların topoğrafya ile temas ettikleri noktalarda meydana gelen enerji sönümlenmeleri, normal ( $R_n$ ) ve teğetsel ( $R_t$ ) geri sıçrama katsayıları aracılığıyla modellenir. Bu katsayılar, yamaçta hakim olan litolojik özelliklere göre her bir analiz kesitine uygun şekilde tanımlanmıştır. Söz konusu katsayıların belirlenmesi ise sahada gerçekleştirilen blok düşürme deneylerinden, geçmiş kaya düşmelerinin geri analizlerinden veya literatürde yaygın olarak kullanılan Rocscience firmasının yayımladığı Geri Sıçrama Katsayıları Tablosu'ndan (Coefficient of Restitution Table) yararlanılarak yapılabilmektedir (Akbaş, 2024). Sille Vadisi'ndeki çalışma alanında, normal ( $R_n$ ) ve teğetsel ( $R_t$ ) geri sıçrama katsayıları, daha önce düşmüş blokların izleri dikkate alınarak ve sahada yapılan blok düşürme deneylerinden elde edilen verilerle geri analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, çalışma alanında üç farklı litolojik birim bulunmaktadır: Andezitik tüf, dasitik breş ve dasitik tüf. Bu birimler, yamaç boyunca üstten aşağıya doğru sıralı şekilde yerleşmiştir. Bu nedenle, her bir kesitteki malzeme parametreleri, arazi üzerindeki litolojik dağılıma uygun biçimde tanımlanarak kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 99–101'de, arazideki yamaç yüzeyleri ile bu yüzeyler için tanımlanan malzeme parametreleri sunulmaktadır.



(a)

Existing Materials		Name	Color
Andezitik Tuf		Andezitik Tuf	
Asphalt [default]			
Bedrock outcrops [default]			
Clean hard bedrock [default]			
Dasitik Breş			
Dasitik Tuf			
Soil with vegetation [default]			
Talus Cover [default]			
Talus with vegetation [default]			

Coefficient of normal restitution (Rn)		RN	RT	Table
Mean	0,35	Standard Deviation	0,04	
Coefficient of tangential restitution (Rt)		RN	RT	Tutorial
Mean	0,85	Standard Deviation	0,04	
Friction Angle (Phi) [ degrees ]				Add
Mean	39	Standard Deviation	2	Delete
Slope Roughness [ degrees ]				Default
Mean = angle of segment		Standard Deviation	2	Copy
				Done

(b)

Şekil 99. (a) Andezitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri



(a)

Existing Materials		Name	Color
Andezitik Tuf		Dasitik Breş	
Asphalt [default]			
Bedrock outcrops [default]			
Clean hard bedrock [default]			
Dasitik Breş			
Dasitik Tuf			
Soil with vegetation [default]			
Talus Cover [default]			
Talus with vegetation [default]			

Coefficient of normal restitution (Rn)		RN	RT	Table
Mean	0,32	Standard Deviation	0,04	
Coefficient of tangential restitution (Rt)		RN	RT	Tutorial
Mean	0,82	Standard Deviation	0,04	
Friction Angle (Phi) [ degrees ]				Add
Mean	36	Standard Deviation	2	Delete
Slope Roughness [ degrees ]				Default
Mean = angle of segment		Standard Deviation	2	Copy
				Done

(b)

Şekil 100. (a) Dasitik breş yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri



(a)

Existing Materials		Name	Color
Andezitik Tuf		Dasitik Tuf	
Asphalt [default]			
Bedrock outcrops [default]			
Clean hard bedrock [default]			
Dasitik Breş			
Dasitik Tuf			
Soil with vegetation [default]			
Talus Cover [default]			
Talus with vegetation [default]			

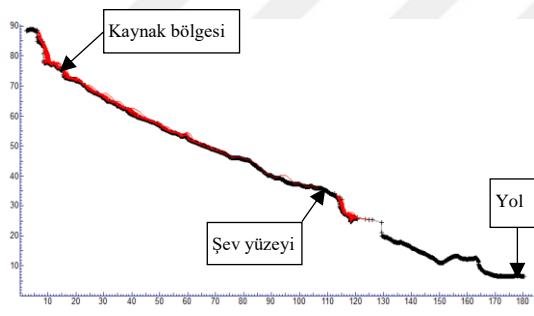
Coefficient of normal restitution (Rn)		RN	RT	Table
Mean	0,3	Standard Deviation	0,04	
Coefficient of tangential restitution (Rt)		RN	RT	Tutorial
Mean	0,8	Standard Deviation	0,04	
Friction Angle (Phi) [ degrees ]				Add
Mean	27	Standard Deviation	2	Delete
Slope Roughness [ degrees ]				Default
Mean = angle of segment		Standard Deviation	1	Copy
				Done

(b)

Şekil 101. (a) Dasitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri

### 3.2.2. 2D Kaya Düşme Analizlerin Detayları ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

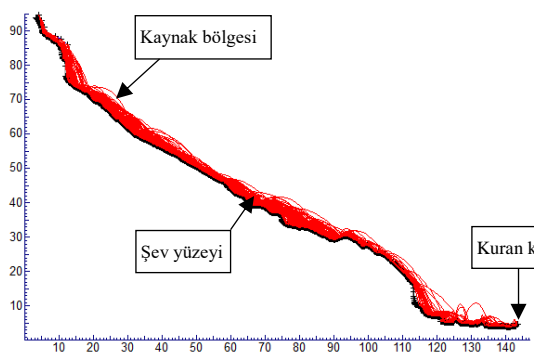
Arazi çalışması sırasında düşme riski yüksek olan ve daha önce düşmüş kaya blokların ortalama hacmi 5-6m<sup>3</sup> olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yaklaşık 200-300m<sup>3</sup> hacimlere sahip olduğu riskli bloklar da mevcuttur. Optimum çözüm önerisi belirleyebilmek için büyük hacimli bloklar önlem öneri bölümünde ayrıca değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan jeolojik rapordaki deney sonuçlarına göre, kayaların birim hacim ağırlığı en fazla 2265 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Buna göre güvenli tarafta kalmak için %10 artırarak 6,6 m<sup>3</sup> hacim ve 15000 kg ağırlığındaki kaya blokları için düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. 20 kritik güzergâh boyunca yapılan analizler sonucu kaya blokların sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji ve ulaşabilecekleri maksimum hız değerleri her bir güzergâh için 100 farklı olasılık ile çözümlenerek toplamda 2000 farklı kaya düşme analizi senaryosu gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme analizlerin detayları Şekil 102-104 arasında verilmiş olup 20 güzergahın tamamı için maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri Tablo 12’de verilmiştir.



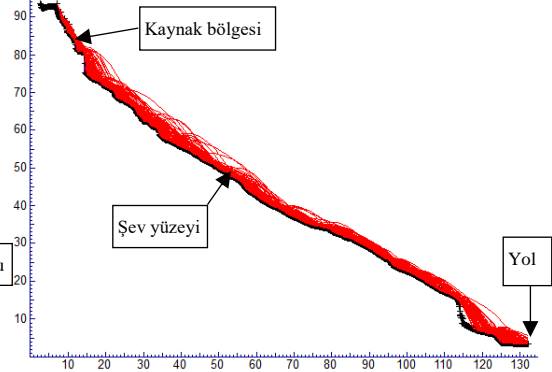
(1-1)



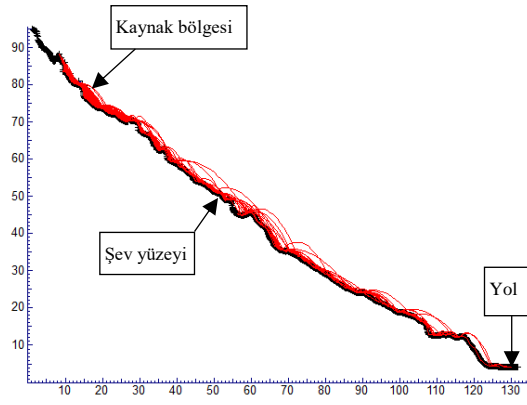
(2-2)



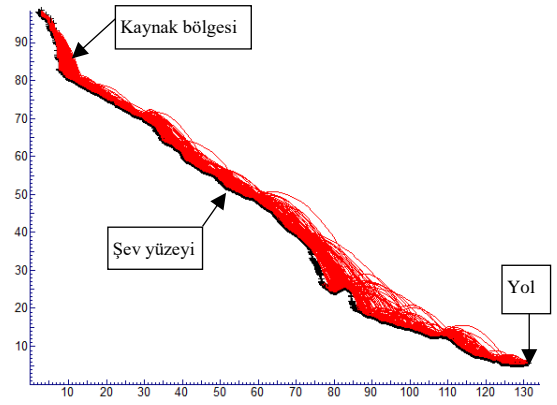
(3-3)



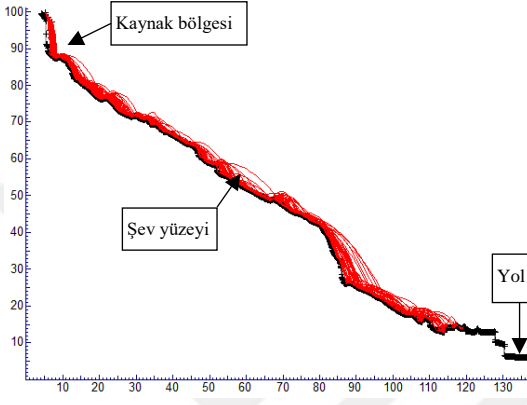
(4-4)



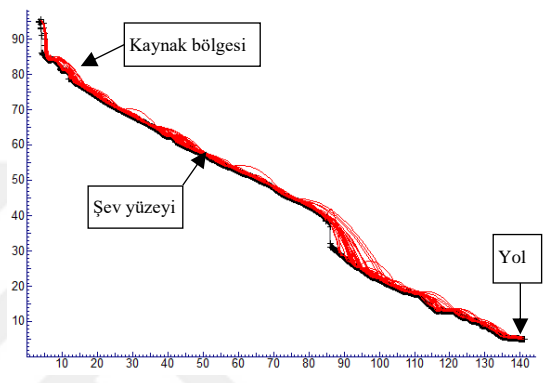
(5-5)



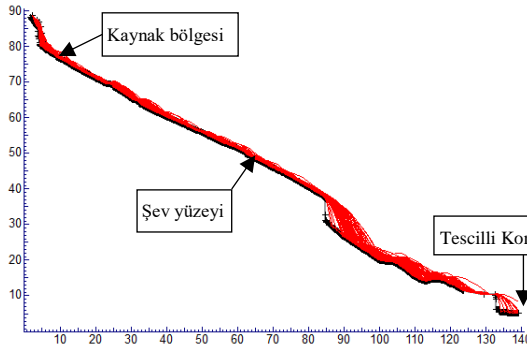
(6-6)



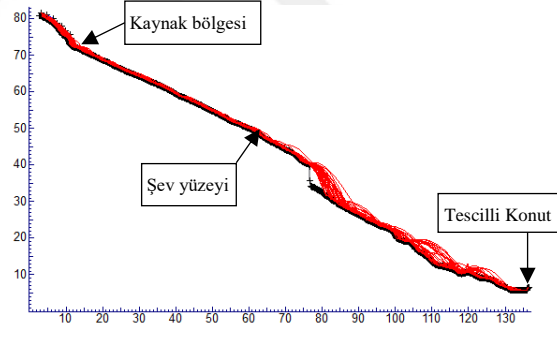
(7-7)



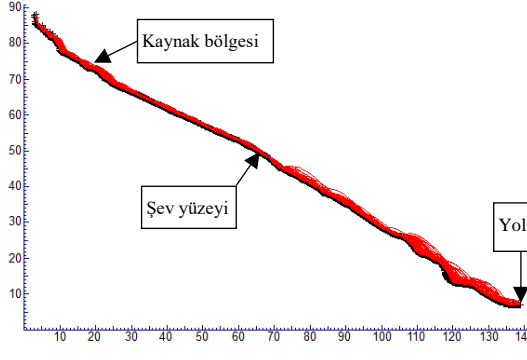
(8-8)



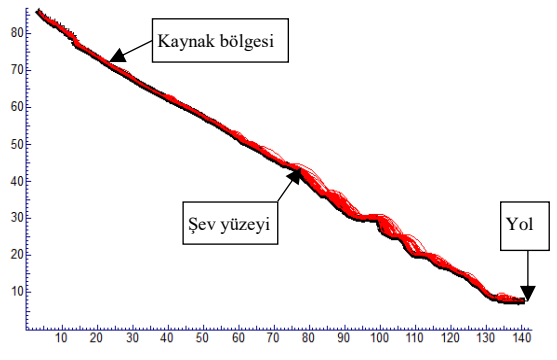
(9-9)



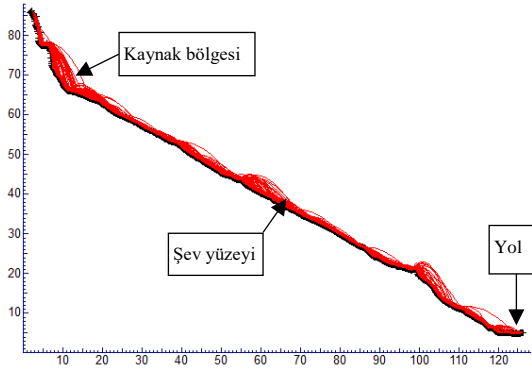
(10-10)



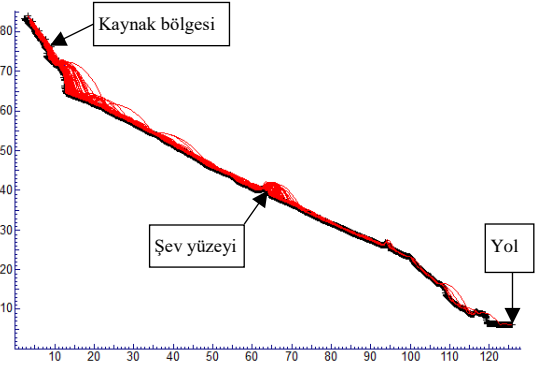
(11-11)



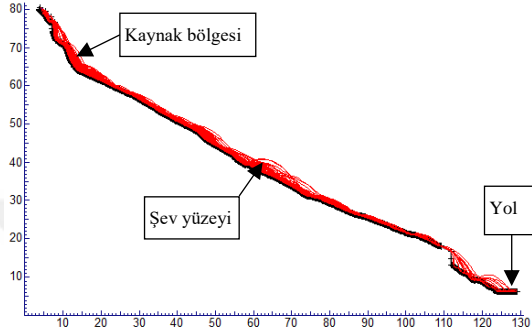
(12-12)



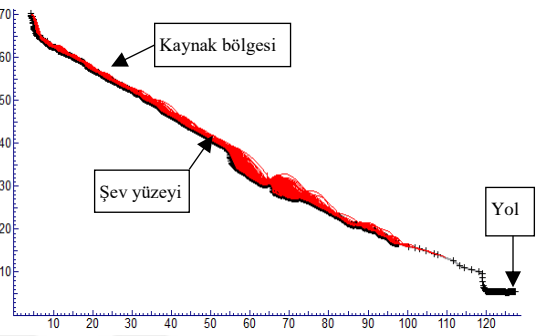
(13-13)



(14-14)



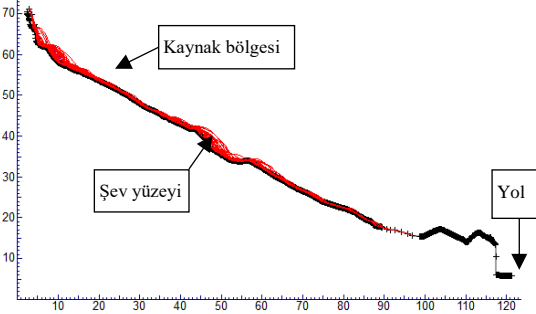
(15-15)



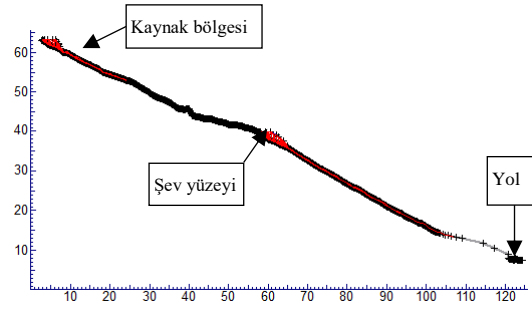
(16-16)



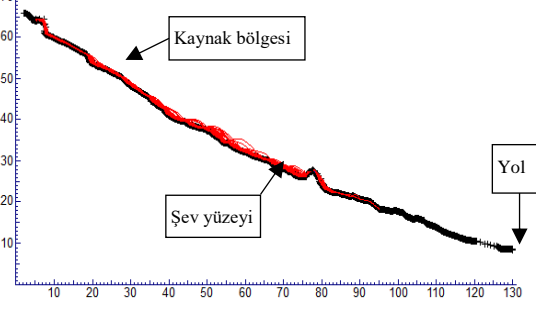
(17-17)



(18-18)

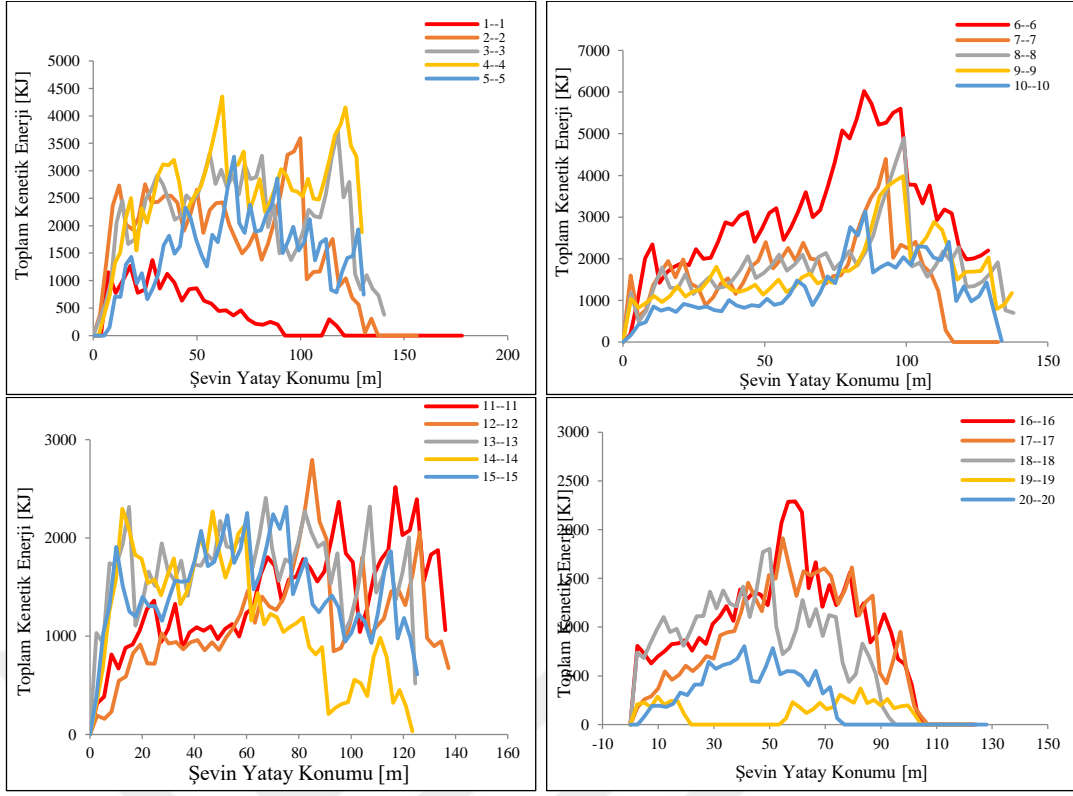


(19-19)

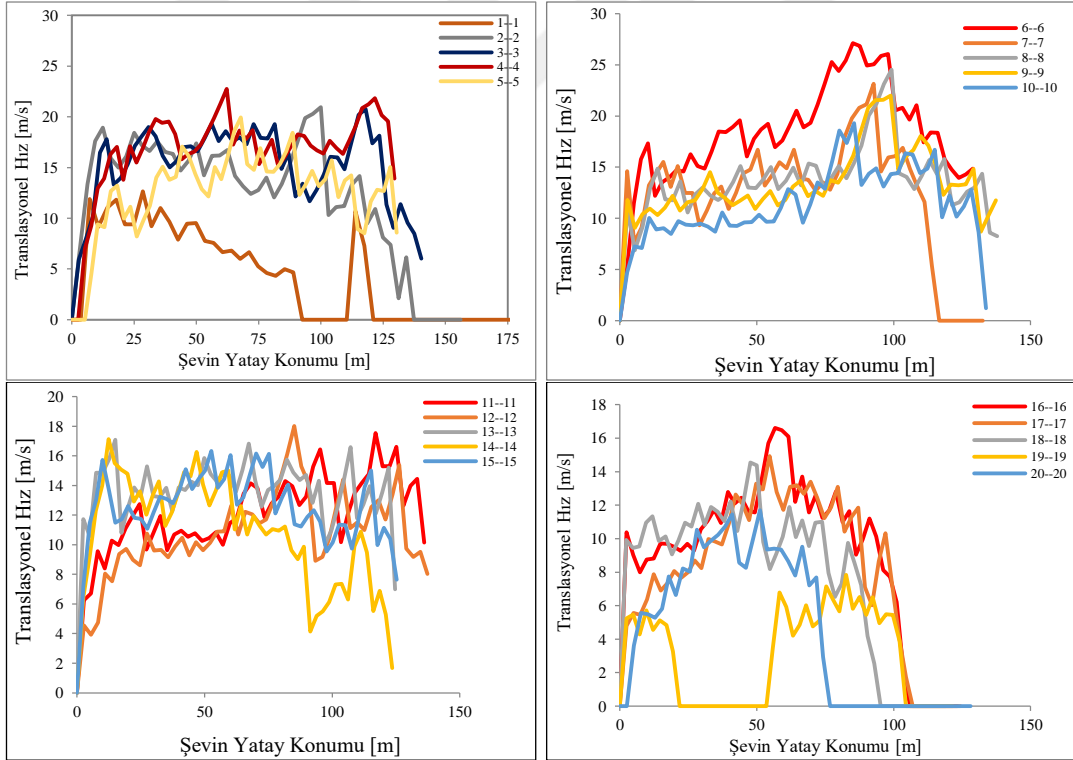


(20-20)

Şekil 102. Düşebilecek kaya blokları için güzergâh boyunca kaya düşme sırasında oluşabilecek senaryolar



Şekil 103. Kaya düşme analizleri sonucu elde edilen toplam kinetik enerji değerleri (kJ)



Şekil 104. Kaya düşme analizleri sonucu elde edilen yatay hız değerleri (kJ)

Tablo 12. Güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerindeki maksimum sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji vev maksimum hızı değerleri.

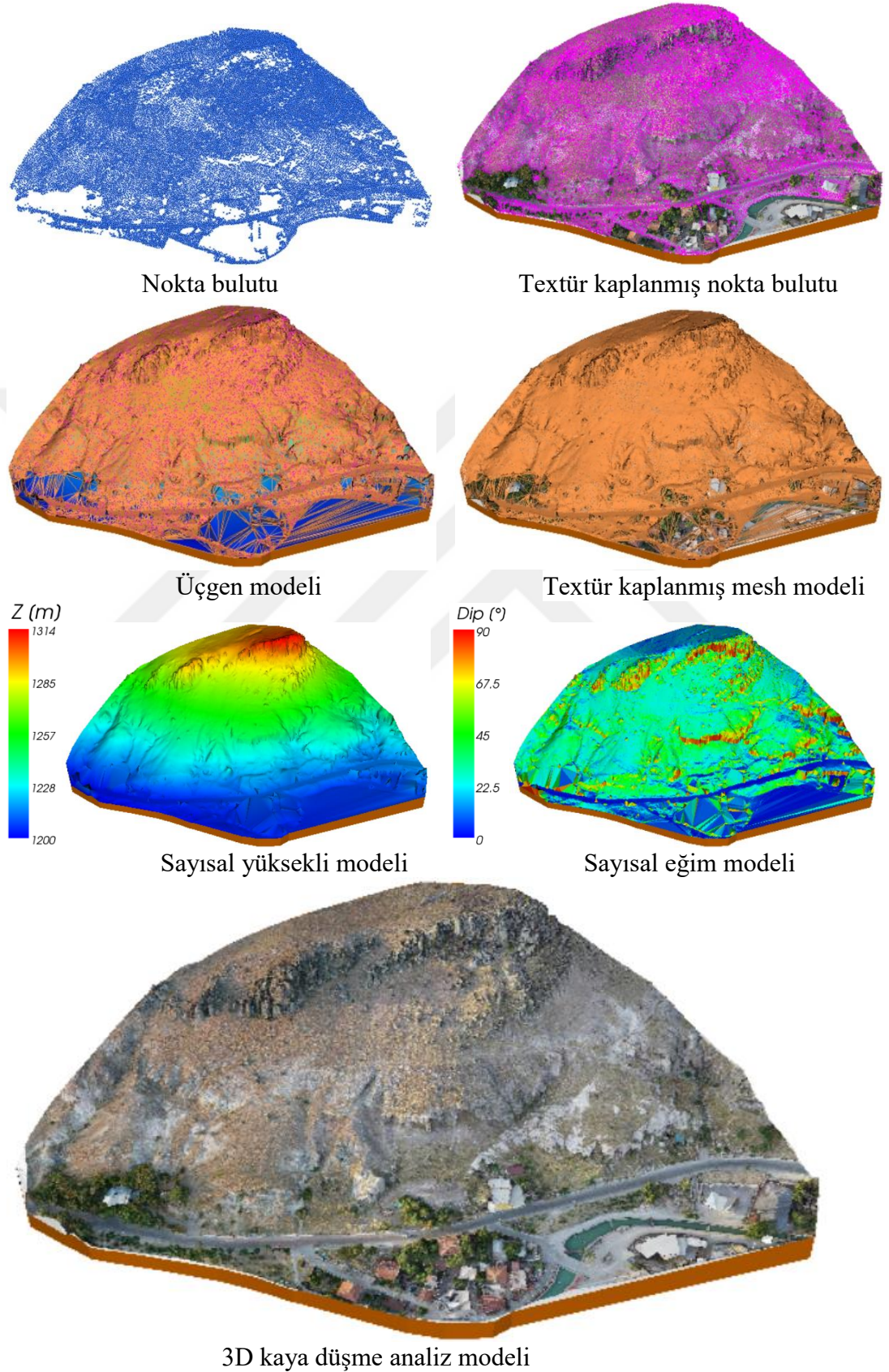
Kesit No:		1-1	2-2	3-3	4-4	5-5
15000 kg'lık kaya bloğu	Maksimum Sıçrama yüksekliği (m)	4.50	8.40	8.25	7.15	8.05
	Toplam kinetik enerji (kJ)	1,220.00	3,500.00	3,620.00	4,250.00	2,890.00
	Maksimum hız (m/sn)	11.87	20.11	20.80	25.50	18.15
Kesit No:		6-6	7-7	8-8	9-9	10-10
15000 kg'lık kaya bloğu	Maksimum Sıçrama yüksekliği (m)	15.33	25.65	10.35	8.30	7.35
	Toplam kinetik enerji (kJ)	6,000.00	4,250.00	4,720.00	3,675.00	3,055.00
	Maksimum hız (m/sn)	27.50	13.55	24.88	22.50	18.50
Kesit No:		11-11	12-12	13-13	14-14	15-15
15000 kg'lık kaya bloğu	Maksimum Sıçrama yüksekliği (m)	4.30	4.68	8.25	8.15	4.75
	Toplam kinetik enerji (kJ)	2,500.00	2,750.00	2,350.00	2,520.00	2,300.00
	Maksimum hız (m/sn)	17.15	18.15	16.50	15.85	15.30
Kesit No:		16-16	17-17	18-18	19-19	20-20
15000 kg'lık kaya bloğu	Maksimum Sıçrama yüksekliği (m)	5.15	2.85	4.35	2.05	2.55
	Toplam kinetik enerji (kJ)	2,315.00	1,925.00	1,780.00	480.00	905.00
	Maksimum hız (m/sn)	15.55	14.30	13.20	7.25	15.00

### 3.3. 3D Kaya Düşme Analizleri

Günümüzdeki teknolojiler ile kaya düşme analizleri genellikle iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olarak yapılabilmektedir. 3D kaya düşme analizlerin en büyük avantajı ise sadece belirlenen güzergaha göre değil, arazinin yapısına bağlı olarak kaya bloklarının gidebileceği güzergahları istatistiksel olarak hesaplanabilmesidir. Ayrıca hesaplanan her güzergah boyunca sıçrama yüksekliği, hız ve kinetik enerji gibi değerleri verebilmektedir. 3D kaya düşme analizlerinde arazinin hassas bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Çünkü arazideki geometrik değişimler ve litolojik farklılıklar kaya düşme analiz sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Ancak unutulmaması gereken bir husus da şu ki, 3D kaya düşme analizleri nokta bulutu üzerine çalıştığından çok fazla yoğun nokta bulutunu çalıştıramamaktadır. Dolayısıyla nokta bulutu modelinden noktalar minimize edilerek 3D kaya düşme analizleri yapılabilecektir. Bu da analizlerin hassasiyetini 2D analizlerine göre bir miktar düşürmektedir. Dolayısıyla en iyi çözümlene yapabilmek için hem 2D hem de 3D analizleri birlikte yaparak, her iki tip analiz sonuçları değerlendirildikten sonra önlem yapısını belirlemektir.

Çalışma alanında gerçekleştirilen 3D kaya düşme analizleri kapsamında, ilk aşamada hazırlanan yüksek hassasiyetli fotogrametrik modelden elde edilen nokta bulutu, RocPro3D yazılımına aktarılarak üç boyutlu nokta bulutu modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu nokta bulutu üçgenleme işlemine tabi tutulmuş ve araziye gerçeğe en yakın şekilde temsil eden ideal bir üçgen ağ modeli elde edilmiştir. Modelleme sürecinin son aşamasında ise 3D kaya düşme analizleri için gerekli olan katı yüzey modeli, bozuk üçgenlerden arındırılmış ve optimize edilmiş sayısal yükseklik modeli, eğim ve bakı

modelleri, texture kaplanmış üçgen ağ modeli ile 3D kaya düşme analiz modeli oluşturulmuştur. Söz konusu modellerin şematik görünüşleri Şekil 105'te sunulmuştur.



Şekil 105. 3D kaya düşme analizi için oluşturulan sayısal modelin bileşenleri

### 3.2.1. 3D Kaya Düşme Analizlerinde Parametrelerin Tanımlanması

RocPro3D yazılımı içerisinde tanımlanan  $R_n$ ,  $R_t$  ve  $k$  gibi geri sıçrama parametrelerinin altında yer alan “variability (değişkenlik)”, “limit velocity (sınır hız)” ve “limit variability (sınır değişkenlik)” gibi girdiler, 3D analizlerde olasılıksal hesaplamalarda kullanılan değişkenlerdir. Bu parametreler, yamaç üzerinde yer alan farklı litolojik birimlerin fiziksel özelliklerine göre bölgesel farklılık gösterebilir. Sahada özellikle yuvarlanma zonu boyunca belirgin heterojenlikler mevcutsa, deterministik yaklaşımların yerine olasılıksal analizlerin kullanılması modelin gerçekçiliğini önemli ölçüde artıracaktır. Örneğin, sürtünme ya da sınır hız gibi bir parametreye atanan sabit bir değer, analiz sırasında tanımlanan değişkenlik oranı doğrultusunda rastgele değişkenlik gösterebilir. Bu tür olasılıksal parametreler tanımlanırken, arazinin litolojik çeşitliliği dikkate alınmalı ve parametrelerde sık değişim beklenen durumlarda değişkenlik oranı artırılmalıdır. Ayrıca, “lateral (yatay)” ve “vertical (düşey)” sapma değerleri, kaya bloğunun yüzeye çarpma anında yatay ya da düşey düzlemde ne kadar sapma gösterebileceğini ifade eder (Kara, 2020). 3D kaya düşme analizlerinde kullanılan parametreler Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. 3D kaya düşme analizinde kullanılan parametreler (Kara, 2020).

<b>Doğrultma Katsayıları;</b>
Normal geri verme katsayısı ( $R_n$ )
Teğetsel geri verme katsayısı ( $R_t$ )
Değişkenlik $d_r$
Limit Hız $V_r$ (lim) [m/s]
Limit Değişkenlik $d_r$ (lim) [%]
<b>Yanal Sapma;</b>
Değişkenlik $D_{qh}$ [°]
Limit Hız $V_{qh}$ (lim) [m/s]
Limit değişkenlik $D_{qh}$ (lim) [°]
<b>Geritepme Katsayıları</b>
Değişkenlik $D_{qv}$ [°]
Limit Hız $V_{qv}$ (lim) [m/s]
Limit Değişkenlik $D_{qv}$ (lim) [°]
<b>Sürtünme Katsayısı: kayma (kütle) veya yuvarlanma (rijit blok)</b>
$k$ değeri [-]
Değişkenlik $D_k$ [%]
Limit Hız $V_k$ (lim) [m/s]
Limit değişkenlik $D_k$ (lim) [%]
<b>Geçiş Parametreleri</b>
$b_{lim}$ açısı [°]
$b_{lim'}$ açısı [°]

2D ve 3D kaya düşme simülasyonlarında, geri sıçrama katsayıları ( $R_n$  ve  $R_t$ ) ile sürtünme açısı, kaya bloğunun sıçrama yüksekliği üzerinde doğrudan etkili olup, bu

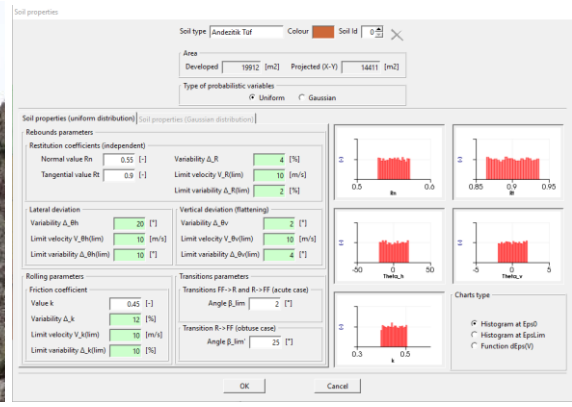
durum dolaylı olarak blok hızını ve çarpma anındaki kinetik enerjiyi de belirlemektedir. Normal ve teğetsel geri sıçrama katsayıları (Coefficient of Normal and Tangential Restitutions), topografya ile temas eden blokların yüzeyde ne kadar enerji kaybedeceğini tanımlamakta ve analiz yazılımına girdi parametresi olarak dahil edilmektedir. Bu katsayıların değeri, hem düşen bloğun fiziksel özelliklerine hem de çarptığı yüzeyin litolojik karakterine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Söz konusu parametreler; doğrudan sahada gerçekleştirilen blok düşürme testleriyle, daha önce düşmüş blokların yerinde gözlemlenmesiyle yapılan geri çözümleme çalışmalarıyla ya da literatürde önerilen standart katsayı tabloları (örneğin Rocscience Coefficient of Restitution Table) aracılığıyla belirlenebilmektedir (Kara, 2020).

Sille Vadisi'ndeki çalışma alanında, normal ( $R_n$ ) ve teğetsel ( $R_t$ ) geri sıçrama katsayıları, daha önce düşmüş blokların izleri dikkate alınarak ve sahada yapılan blok düşürme deneylerinden elde edilen verilerle geri analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, çalışma alanında üç farklı litolojik birim bulunmaktadır: Andezitik tüf, dasitik breş ve dasitik tüf. Bu birimler, yamaç boyunca üstten aşağıya doğru sıralı şekilde yerleşmiştir. Bu nedenle, her bir kesitteki malzeme parametreleri, arazi üzerindeki litolojik dağılıma uygun biçimde tanımlanarak kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde, limit hız ve limit değişkenlik gibi analiz girdileri de yazılımın sunduğu öneri aralıkları çerçevesinde, arazi yapısı ve litolojik çeşitlilik göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Şekil 106-108'de RocPro3D yazılımı kullanılarak oluşturulan yamaç yüzeyleri ile bu yüzeyler için tanımlanan malzeme parametreleri, Şekil 109'da ise 3D katı ve tekstür kaplanmış modellerin görüntüleri sunulmuştur.

Arazi çalışması sırasında düşme riski yüksek olan ve daha önce düşmüş kaya blokların ortalama hacmi  $5-6\text{m}^3$  olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yaklaşık  $200-300\text{m}^3$  hacimlere sahip olduğu riskli bloklar da mevcuttur. Optimum çözüm önerisi belirleyebilmek için büyük hacimli bloklar önlem öneri bölümünde ayrıca değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan jeolojik rapordaki deney sonuçlarına göre, kayaların birim hacim ağırlığı en fazla  $2265\text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Buna göre güvenli tarafta kalmak için %10 artırarak  $6,6\text{ m}^3$  hacim ve  $15000\text{ kg}$  ağırlığındaki kaya blokları için 3D düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.



(a)

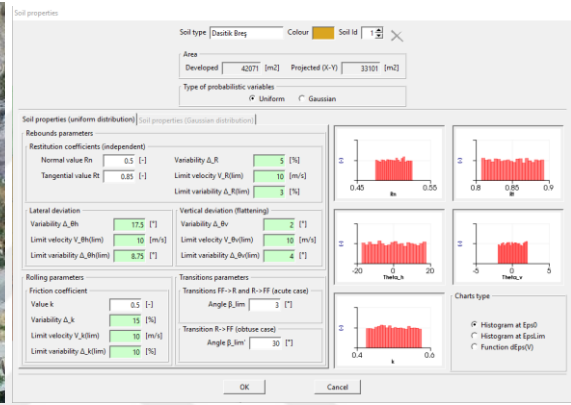


(b)

Şekil 106. (a) Andezitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri



(a)

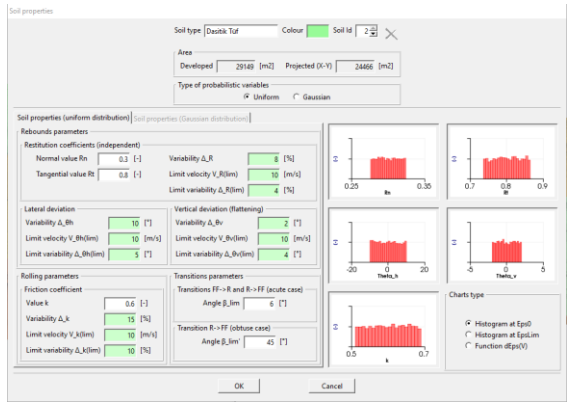


(b)

Şekil 107. (a) Dasitik breş yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri

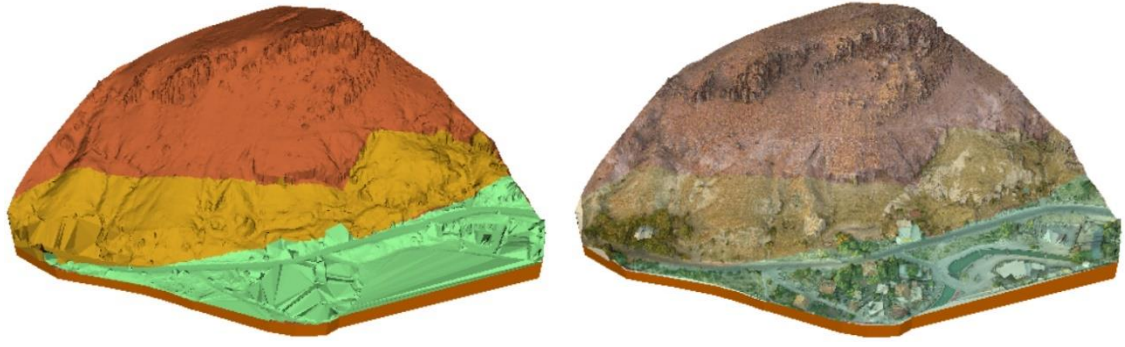


(a)



(b)

Şekil 108. (a) Dasitik tuf yamaç yüzeyi ve (b) bu yüzeye ait tanımlanan malzeme parametreleri



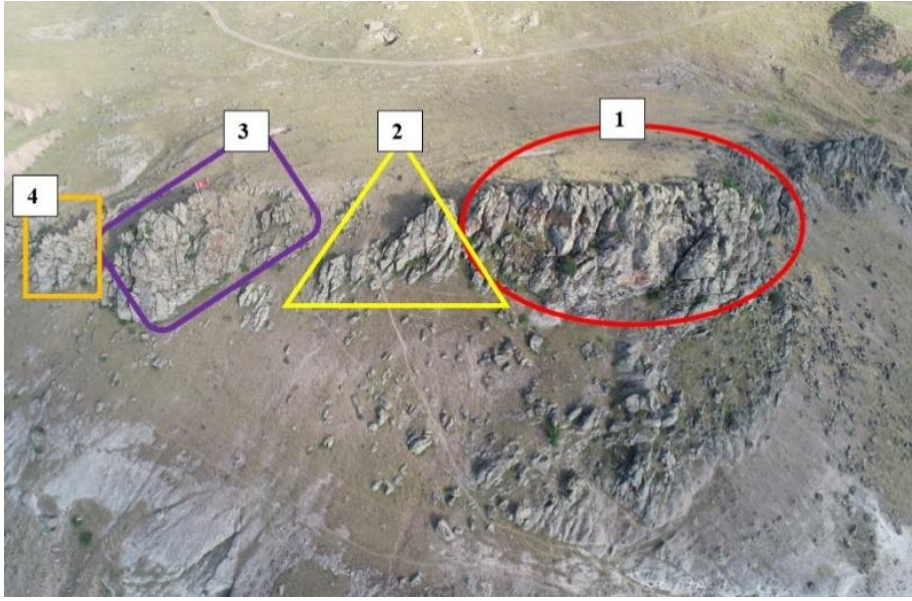
Şekil 109. Arazi parametrelerinin tanımlandığı 3D katı ve tekstür kaplanmış modelleri

### 3.3.2. 3D Kaya Düşme Analizlerinin Detayları ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

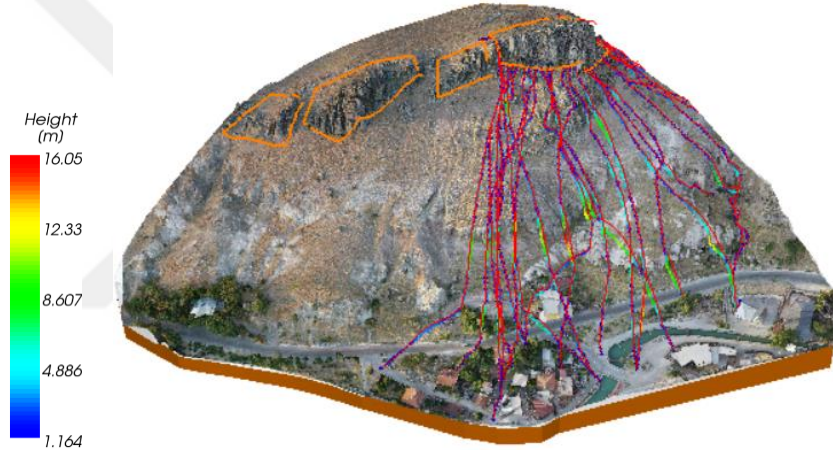
Çalışma kapsamında, kaya düşmesi riskinin belirlenmesine yönelik olarak iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere iki farklı yöntemle kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. 3D analizler sırasında; jeolojik, jeomekanik, gözlemlsel riskli kaya bloklarının tespit çalışmasında arazide belirlenen tüm potansiyel düşme kaynak bölgeleri, gerçek koordinatlarıyla birlikte RocPro3D yazılımına aktarılmıştır. Ayrıca güvenli tarafta kalmak adına, söz konusu riskli bölgeler zirvelerin en üst kotlarında tanımlanarak analizlere dahil edilmiştir. Dört ayrı bölgeye ayrılan potansiyel kaynak alanı, her bir kaynak bölge için 50 farklı kaya bloğu için düşme analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 110).

Ancak her bölgeye ait analiz sonuçlarının üst üste binmesi nedeniyle ortaya çıkan karmaşık görsellerin okunabilirliği azaldığından, ilk etapta her bölge için analizler ayrı ayrı yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, sıçrama yüksekliği, yatay hız ve toplam kinetik enerji değerleri hesaplanarak, ilgili sonuç haritaları Şekil 111-122 arasında sunulmuştur. Buna ek olarak, tüm riskli bölgeleri kapsayacak şekilde çalışma alanı genelinde bütünsel 3D kaya düşme analizleri de yapılmıştır. Elde edilen toplam kinetik enerji, hız, sıçrama yüksekliği, çarpma sayısı, durma mesafesi ve minimum durma süresi gibi parametrelere ait sonuçlar, 3D katı model üzerinde görselleştirilerek Şekil 123–127 arasında verilmiştir.

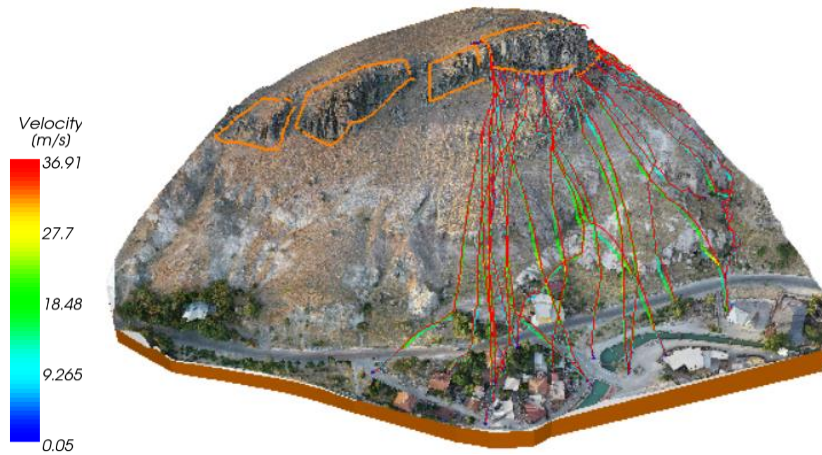
3D kaya düşme analizi sonuçlarına göre, riskli blokların yaklaşık %95'i yamaç altındaki konutlar, araç yolu, Kur'an kursu ve tescilli camiye ulaşmaktadır. Sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri incelendiğinde, tek bir koruma yapısının yeterli olmayacağı anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, blokların yamacın altına ulaşması durumundaki hasar potansiyeli 4. Bölümde sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş; elde edilen senaryolar doğrultusunda 5. Bölümde ıslah çözümleri değerlendirilmiş ve optimum ıslah yöntemi paketi belirlenmiştir.



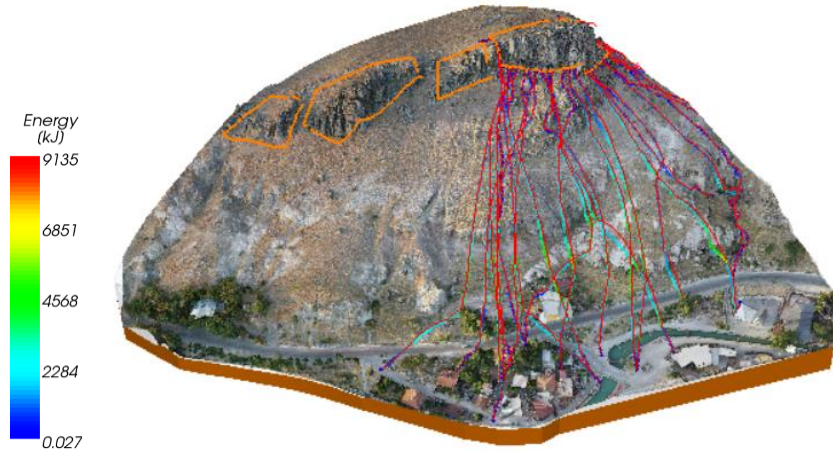
Şekil 110. Potansiyel kaya düşmesi kaynak alanların bölgelendirilmesi



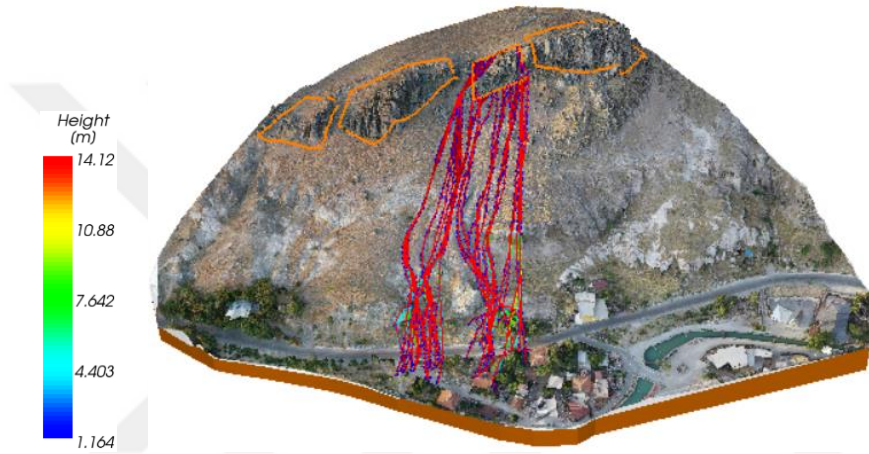
Şekil 111. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri



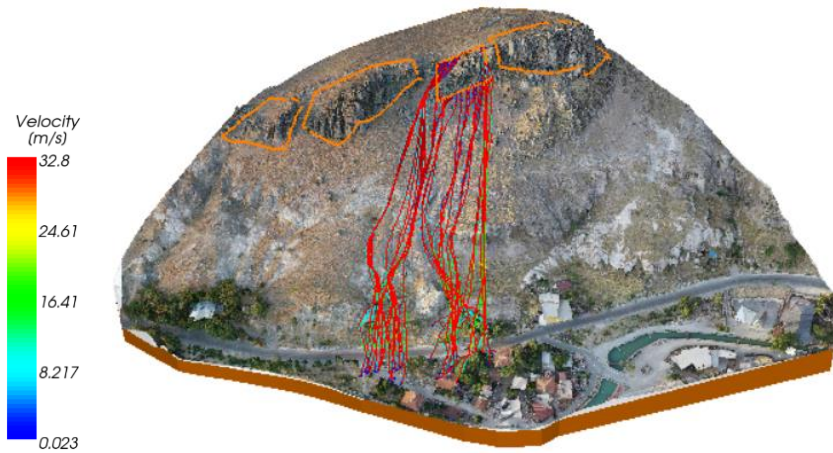
Şekil 112. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri



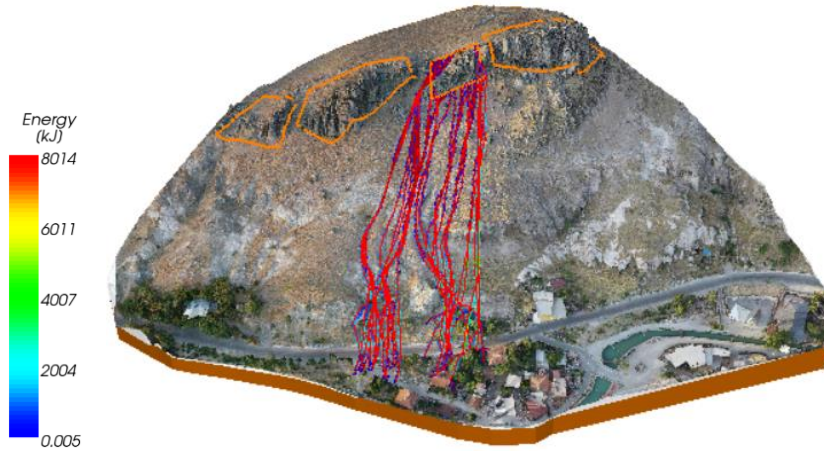
Şekil 113. 1.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri



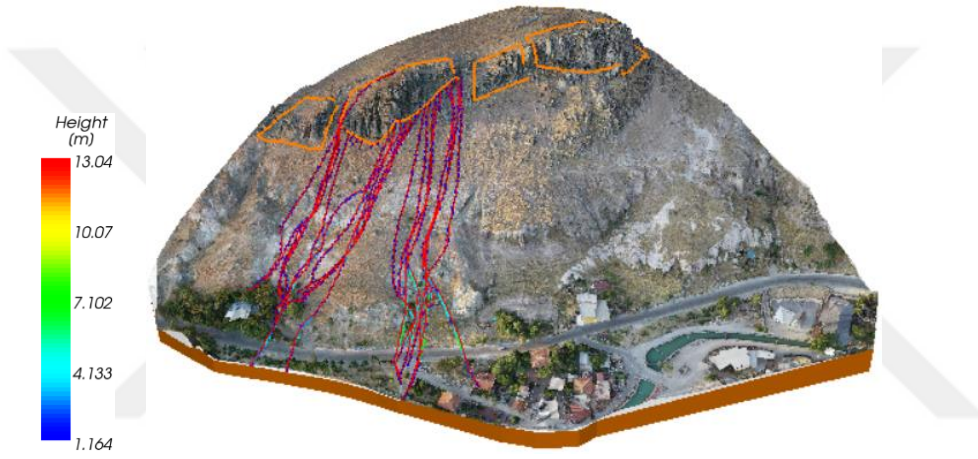
Şekil 114. 2.Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri



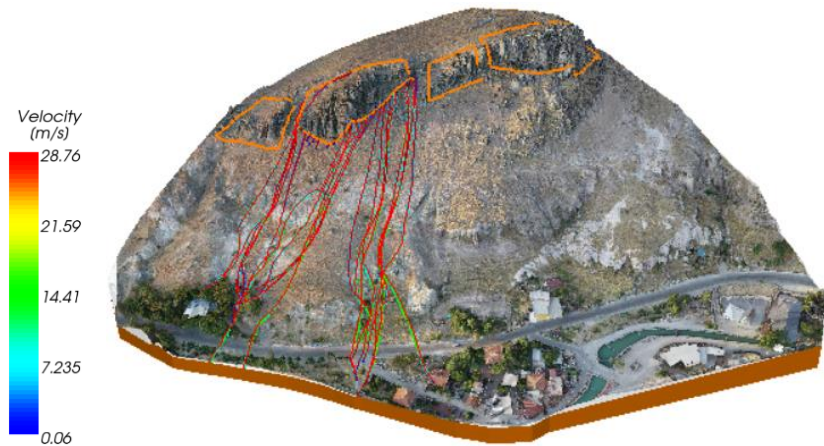
Şekil 115. 2. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri



Şekil 116. 2. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri



Şekil 117. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 118. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri



Şekil 119. 3. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri



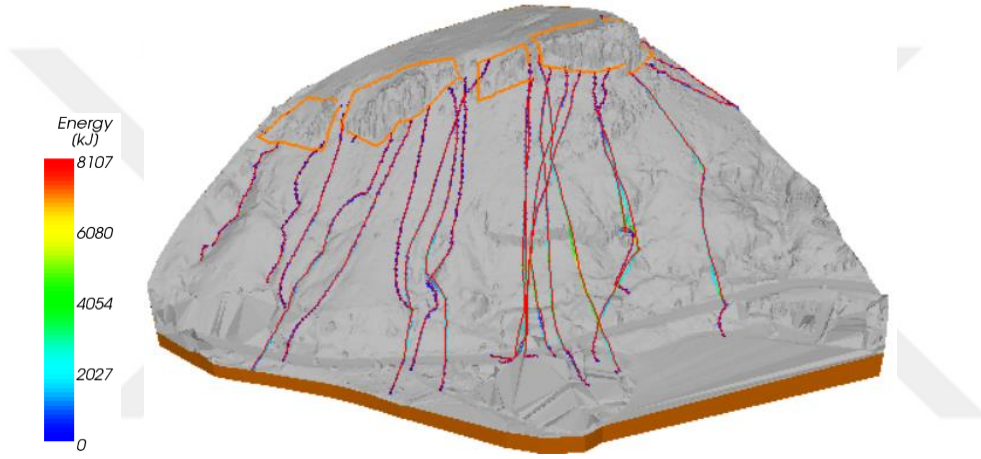
Şekil 120. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri



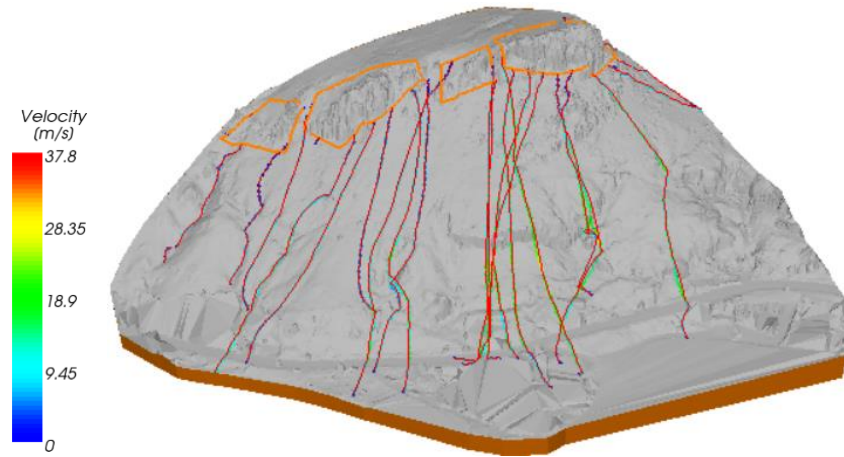
Şekil 121. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri



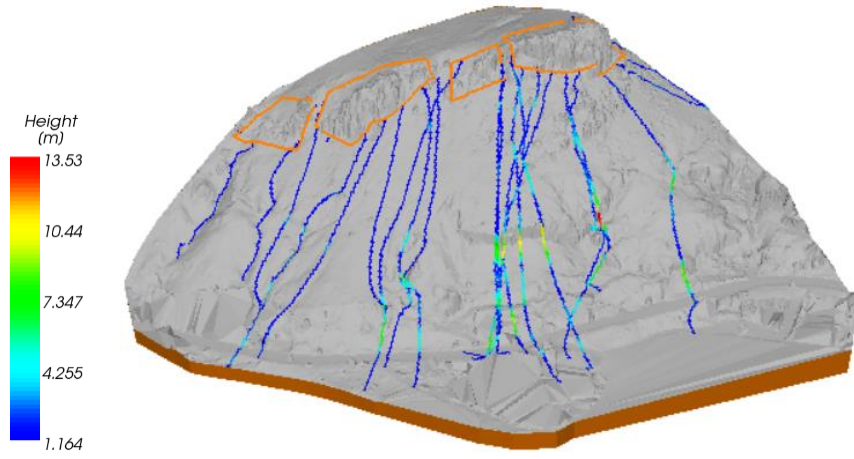
Şekil 122. 4. Bölge için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri



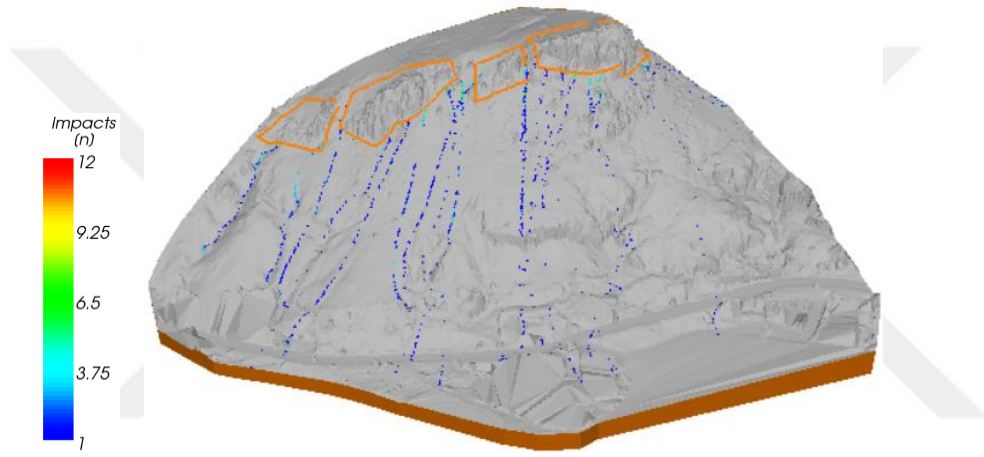
Şekil 123. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan kinetik enerji değerleri



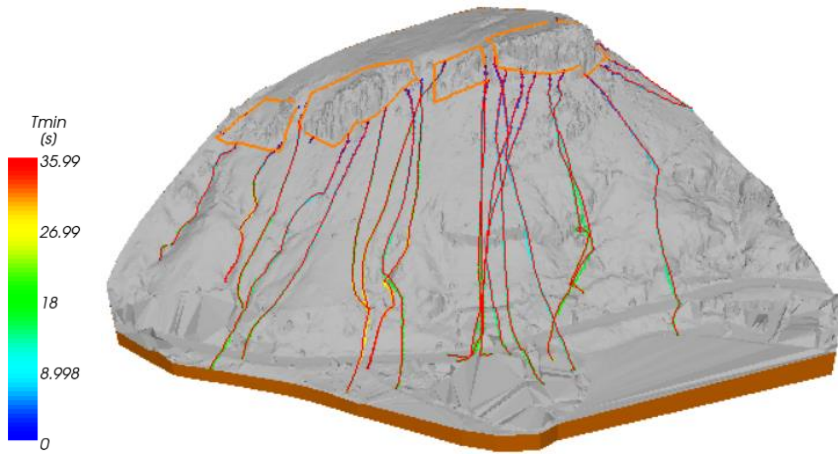
Şekil 124. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan hız değerleri



Şekil 125. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 126. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan çarpma sayısı değerleri



Şekil 127. Tüm bölgeler için 3D kaya düşme analizi sonucu hesaplanan minimum durma süresi değerleri

#### **4. KAYA DÜŞMESİ SONUCU OLUŞAN HASARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE SAYISAL ANALİZLERİ**

Yapılan kaya düşme analizleri sonucunda, yamaçtan kopan ve düşen kayaların %95'inin altta bulunan konuk evine, %80'inin Kur'an kursuna ve %50'den fazlasının da tescilli cami minaresine çarptığı görülmüştür. Kaya bloklarının düşmesi sırasında kazandığı hız, sıçrama yüksekliği ve kinetik enerji değerleri, riskli kaya bloğuna göre Bölüm 3.2'de iki boyutlu olarak, Bölüm 3.3'te ise üç boyutlu olarak hesaplanmıştır.

Bu bölümde, elde edilen sonuçlara göre düşen kaya bloklarının alttaki binalara çarpması durumunda hangi boyutta hasar oluşturacağı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu çalışmanın bir diğer amacı ise ıslah çalışması sırasında hangi boyuttaki kaya bloğunun binalara zarar vereceğini ve hasar düzeyinin ne olduğunu ortaya koymaktır. Bunun için yamacın altında bulunan tescilli bir yığma konuk evi, talebeler tarafından aktif olarak kullanılan bir betonarme Kur'an kursu ve yamacın hemen altında yer alan 500 yıllık tarihi Çay Camii'nin kesme taştan yapılan minaresinin sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar analizlerini doğrulamak amacıyla, Şubat 2020'de söz konusu bölgede yamaçtan kopan ve binanın tavanı parçalayarak eve giren kaya parçasının verdiği hasarın doğrulanması yapılmıştır. Daha sonra, bahsi geçen ve yamacın hemen altında bulunan üç tescilli yapının farklı kaya boyutlarına göre doğrusal olmayan darbe analizleri ile hasar düzeyleri irdelenmiştir. Yapılan modelleme ve analiz detayları bu bölümde verilmiştir. Modelleme ve sonlu eleman analizlerinde malzeme ve yük etkisi için yapılan kabuller sırasıyla açıklanmıştır.

##### **4.1. Tescilli Yapıların Kaya Düşmesine Karşı Hasar Analizi**

Tescilli yapıların kaya düşmesine karşı hasar analizi, tarihi ve kültürel öneme sahip yapıların güvenliğinin değerlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu yapıların çoğu, günümüz mühendislik tasarım standartlarına uygun inşa edilmediğinden, kaya düşmesi gibi ani ve dinamik yükler altında önemli hasar riski taşımaktadır. Kaya bloklarının kinetik enerjisi, düşme yüksekliği, çarpma açısı ve yapıların malzeme özellikleri, hasarın büyüklüğünü ve yapının maruz kalacağı deformasyon seviyesini belirleyen ana faktörlerdir. Kaya bloklarının tescilli yapılar üzerindeki etkisi, blokların düşme sırasında kazandıkları kinetik enerji, hız ve sıçrama yüksekliği gibi parametrelerle ilişkilidir. Ayrıca yapının malzeme özellikleri (taş, ahşap, harç türü vb.) ve yapısal bütünlüğü, hasarın türünü belirleyen diğer önemli etmenlerdir (Liv d., 2024).

Yapılan kinematik analizler, limit denge analizleri ve şev stabilite analizleri sonucunda, yukarıdan düşme riski taşıyan birçok kaya bloğunun varlığı tespit edilmiştir. Bu kaya bloklarının harekete geçmesi durumunda kat edebilecekleri mesafe, sıçrama yükseklikleri ve kazandıkları hız ile çarpma anındaki kinetik enerji değerleri, 2D ve 3D kaya düşme analizleri ile hesaplanmıştır. Bu analizlere bağlı olarak, düşen blokların alt kısmında bulunan tescilli yapılara ne düzeyde hasar verebileceği ve bu yapıların maruz kalacakları hasar durumlarını incelemek amacıyla, Çay Camii Minaresi, Kur'an Kursu ve konuk evi için Sonlu Eleman Modelleri (SEM) oluşturulmuştur.

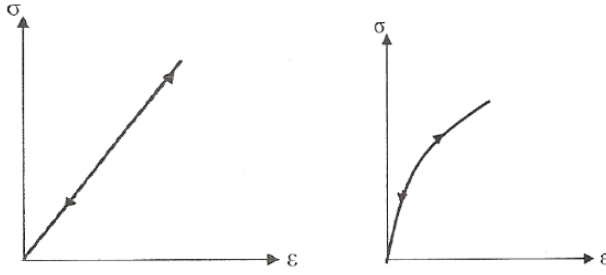
Farklı hacimlere sahip düşen kaya bloklarının analizleri şu aşamalarla gerçekleştirilmiştir:

İlk olarak 5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğu, ardından 1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğu, daha sonra 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya blokları analiz edilmiştir. Bu analizlerin temel amacı; hangi boyuttaki kaya bloklarının yapıların taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarında ne tür hasarlara yol açabileceğini belirlemek ve bu doğrultuda ıslah çalışmaları veya kaya kırım yöntemleri gibi müdahale tekniklerini tanımlamaktır. Analiz sonuçlarına göre hangi boyuttan daha küçük bir blok veya başka bir deyişle hangi bloğun yapılarda ne kadar hasar oluşturacağı görülmüştür. Bu verilere dayanarak uygun önlem yapıları ve müdahale yöntemleri belirlenmiştir.

#### **4.2. Lineer ve Lineer Olmayan Elastik Malzeme Modeli**

Lineer malzemeler, yük altında gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin birbirleriyle doğru orantılı olarak değiştiği durumları tanımlamak için kullanılır. Bu tür malzemeler, düşük deformasyon hızlarında ve sabit yüklemelerde doğru sonuçlar sağlarken, yüksek deformasyon hızlarının söz konusu olduğu darbe, patlama ve deprem gibi ani yüklemelerde bazı malzemelerin davranışını yeterince temsil edemez. Lineer olmayan elastik malzeme modelleri ise elastik özellik gösterirken, gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişki tamamen doğrusal bir orantı sergilemez. Bu modeller, malzemenin elastik sınırlar içinde yük altında deformasyona uğramasını açıklamada başarılıdır; ancak beton gibi gevrek malzemelerin yüksek deformasyon hızlarında gösterdiği karmaşık davranışları tam anlamıyla yansıtamaz. Lineer ve lineer olmayan malzeme modellerinin temel farkları, malzemenin yük altındaki davranışını temsil etme kapasitelerinden kaynaklanır. Lineer modeller, düşük hızdaki yüklemelerde etkin sonuçlar verirken; lineer olmayan modeller, daha geniş bir deformasyon aralığında

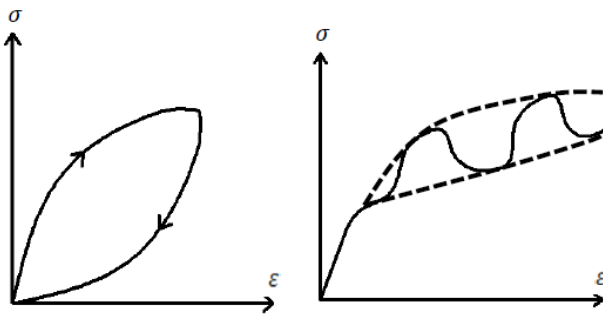
malzeme özelliklerini açıklamak için kullanılır. Bu modellerin karşılaştırmalı grafikleri ve detaylı açıklamaları Şekil 128’de sunulmuştur (Coşğun , 2014).



Şekil 128. Elastik ve Lineer olmayan elastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

#### 4.2.1. Viskoelastik ve Viskoplastik Malzeme Modeli

Viskoelastik davranış, sabit gerilmeler altında zamana bağlı olarak şekil değiştirme miktarının artışıyla açıklanabilir. Bu model, özellikle uzun süreli yüklemelerde malzemenin zamana bağlı deformasyonlarını açıklamada kullanılır. Viskoplastik malzeme modeli ise yüksek şekil değiştirme hızlarının ortaya çıktığı darbe, patlama ve ani yükleme durumlarının analizinde tercih edilir. Bu model, şekil değiştirme hızının malzeme dayanımı üzerindeki etkisini dikkate alır ve bu nedenle betonarme elemanların ani yükleme altındaki davranışlarını daha doğru bir şekilde temsil edebilir (Murtiadi, 1999). Viskoelastik ve viskoplastik malzeme modellerinin davranış farkları ve uygulama alanları, Şekil 129’da gösterilmiştir (Coşğun , 2014).

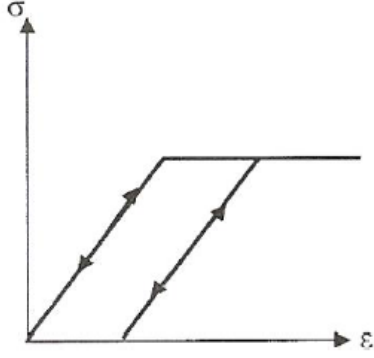


Şekil 129. Viskoelastik ve viskoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

#### 4.2.2. Elastoplastik Malzeme Modeli

Bu modelde, malzeme maruz kaldığı gerilmeler akma gerilmesinin altında kaldığı sürece Hooke cismi gibi doğrusal elastik bir davranış sergiler. Ancak gerilme değeri akma sınırına ulaştığında, malzemenin şekil değiştirmesi sınırsız hale gelir. Teorik olarak, akma gerilmesinin üzerindeki gerilme değerlerinin net bir karşılığı bulunmamaktadır. Bu

model, genellikle betonarme çeliğinin gerilme-şekil değiştirme davranışını idealize etmek amacıyla sayısal modellemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 130) (Coşğun , 2014).



Şekil 130. Elastoplastik malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

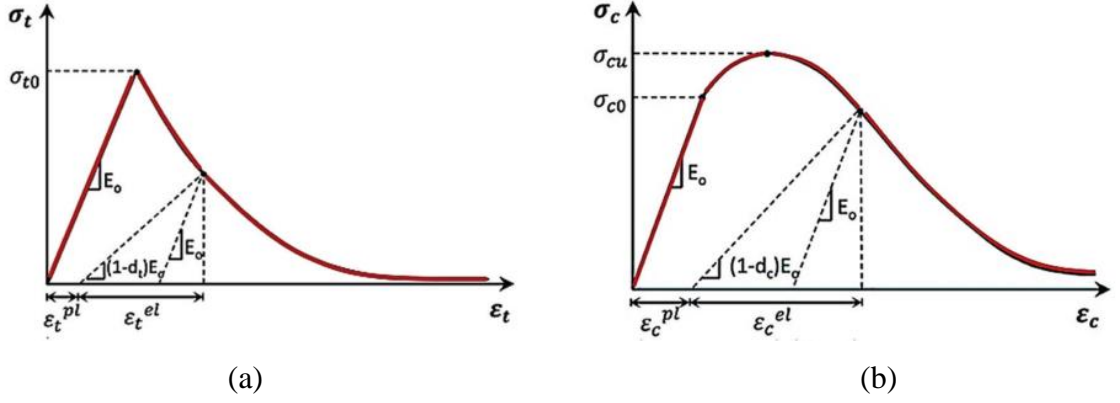
#### 4.2.3. Mekanik Hasar Malzeme Modeli

Bu malzeme modeli, yük altında şekil değiştiren malzemenin dayanımında ve dolayısıyla rijitliğinde bir azalma meydana geldiği varsayımına dayanır. Bu davranışı matematiksel olarak ifade etmek için, skaler veya vektörel bir hasar parametresi tanımlanır (Murtiadi, 1999). Bu model, betonun yük altındaki mekanik davranışını açıklamak için yaygın olarak kullanılan ve CDP (Concrete Damage Plasticity) modeli olarak bilinen mekanik bir hasar malzeme modeli olarak kabul edilmektedir (Coşğun , 2014).

##### 4.2.3.1. Malzeme Modellerinin Özellikleri

Kaya düşmesi sırasında yığma veya betonarme bir binada oluşabilecek hasarların incelenmesi için, sayısal hasar analizlerinde doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek adına uygun malzeme modelinin doğru seçilmesi kritik bir öneme sahiptir. Sonlu eleman modellemesinde beton, donatı ve tuğla malzemelerinin davranışlarını idealize etmek için birçok farklı malzeme modeli mevcuttur. Betonarme yapıların modellenmesinde, basınç yüklemesi altında meydana gelen ezilme ve çekme yüklemesi altında oluşan çatlamları doğru bir şekilde temsil edebilmek amacıyla, ABAQUS yazılımında yer alan Concrete Damage Plasticity (CDP) Modeli kullanılmıştır. Bu model, beton malzemenin plastikleşme ve hasar davranışlarını tanımlamak için tasarlanmış doğrusal olmayan bir analiz yöntemidir. CDP malzeme modeli tanımlanırken, basınç yüklemesi altında betonun aksel basınç dayanımı ve bu yükler altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi esas alınarak parametreler tanımlanır (Şekil 131a). Ayrıca, betonun çekme dayanımı ve çekme yükleri altında oluşan gerilme-şekil değiştirme davranışı da dikkate alınır ve bu

parametreler analiz sürecinde kullanılır (Şekil 131b) (Coşğun, 2014). Bu yaklaşımla, kaya düşmesi veya ani darbe yükleri gibi dinamik durumlarda betonarme ve yığma yapıların hasar davranışlarının daha gerçekçi ve doğru bir şekilde modellenmesi amaçlanmıştır.

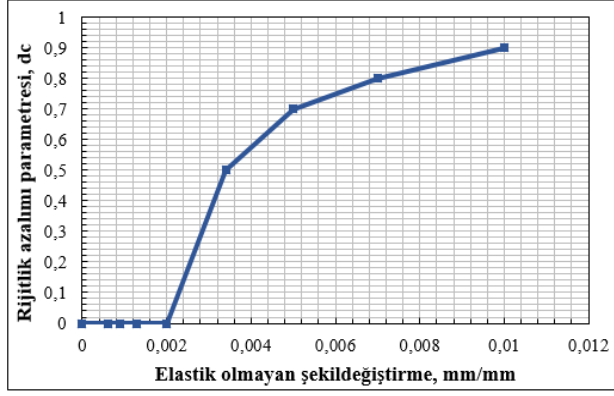


Şekil 131. Eksenel (a) çekme ve (b) basınç yüklemesinde, betonun idealleştirilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Coşğun, 2014)

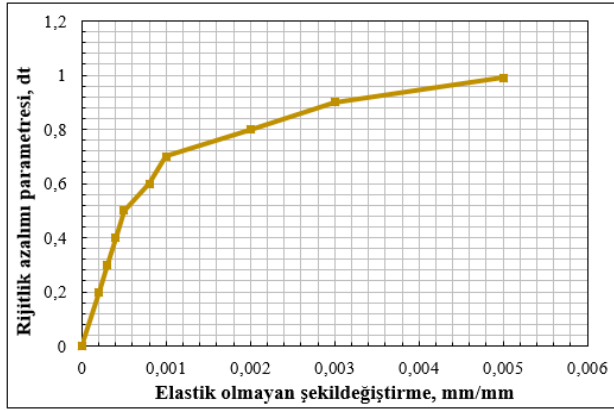
ABAQUS yazılımında Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modeli tanımlanırken, betonun mekanik davranışını daha doğru bir şekilde temsil edebilmek için belirli parametreler kullanılmaktadır. Bu parametreler, malzemenin plastikleşme ve hasar davranışlarını modellemek için kritik bir rol oynar:

- Dilatasyon Açısı ( $\psi$ ):  $30^\circ$  olarak tanımlanmıştır ve bu parametre, plastik şekil değiştirme sırasında malzemenin hacim değiştirme eğilimini ifade eder.
- Dışmerkezlik ( $e$ ): 0.1 değeriyle tanımlanmış olup, akma yüzeyinin şekil parametresini belirler ve plastikleşme davranışını etkiler.
- $K_c$  Değeri: 0.667 olarak kabul edilmiştir ve bu değer, betonun akma yüzeyinin şekil faktörünü temsil eder.
- İki Eksenli ve Tek Eksenli Akma Gerilmesi Oranı ( $f_{bo}/f_{co}$ ): 1.16 olarak tanımlanmıştır ve bu oran, betonun iki eksenli gerilme durumunda taşıma kapasitesinin tek eksenli duruma göre farkını açıklar.

Betonun rijitliğinde meydana gelen azalmayı temsil eden  $d_c$  (basınç hasar parametresi) ve  $d_t$  (çekme hasar parametresi) değerleri, elastik olmayan şekil değiştirme davranışına bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu parametreler, betonun plastik bölgede nasıl bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi sergileyeceğini açıklar ve sayısal analizlerin doğruluğu için büyük önem taşır. Şekil 132 ve Şekil 133, analizde kullanılan  $d_c$  ve  $d_t$  parametrelerinin detaylı dağılımını göstermektedir (Coşğun, 2014). Bu tanımlamalar sayesinde, ABAQUS yazılımında yapılan analizlerin daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlar üretmesi sağlanmaktadır.



Şekil 132. Rijitlik azalımı parametresi (dc)-elastik olmayan şekil değiştirme eğrisi (Nasery, 2019)

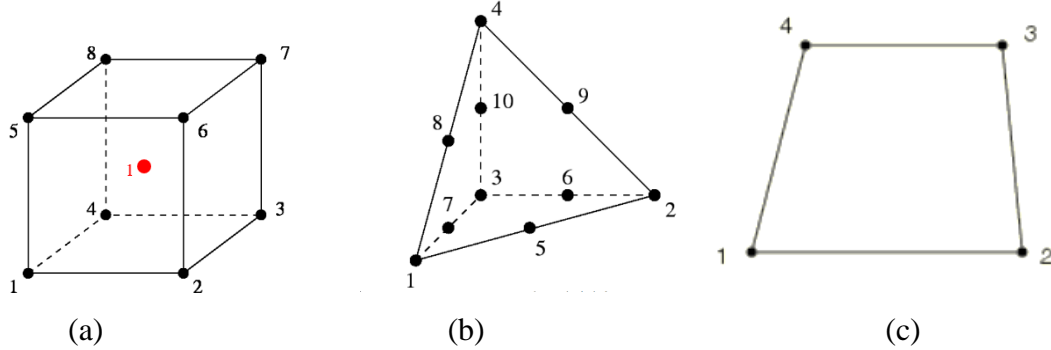


Şekil 133. Rijitlik azalımı parametresi (dt)-elastik olmayan şekil değiştirme eğrisi (Nasery, 2019)

#### 4.3. Modellemede Kullanılan Eleman Tipleri

Betonarme ve yığma yapıların sayısal analizinde, ABAQUS yazılımında 3 boyutlu sürekli katı model (3D Solid Model) tercih edilmiştir. Beton ve tuğla malzemelerinin modellenmesinde C3D8R eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi, köşelerinde 8 düğüm noktasına sahiptir ve her düğüm noktası için rijitlik matrisi oluşturularak analiz gerçekleştirilir. Ancak, her düğüm noktası için ayrı rijitlik matrisinin hesaplanması analiz sürecinde zaman kaybına yol açar. Bu nedenle, elemanın 8 düğüm noktası yerine, azaltılmış integrasyon yöntemi kullanılarak elemanın orta noktasında tek bir integrasyon noktası üzerinden hesaplama yapılmıştır (Şekil 134a). Bu yöntem analiz süresini kısaltırken, doğruluk ve verimliliği korumaktadır. Kaya bloğun modellenmesinde R3D4 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 134c). R3D4 Abaqus'ta rijit bir yüzeyi temsil eden, dört düğüm noktasına sahip üç boyutlu bir dörtgen elemandır. Deforme olmayan bir yapı olarak hareket eder ve sadece yer değiştirme ve dönme gibi rijit hareketleri dikkate alır. Genellikle temas analizlerinde, yük aktarımında ve rijit yapıların modellenmesinde kullanılır. Esnek hareketleri hesaba katmaz, sadece rijit bir gövde gibi davranır.

Minarenin merdiven yapısının modellenmesinde ise C3D10M elemanı kullanılmıştır(Şekil 134b). Bu eleman, 10 düğüm noktasına sahip, üç boyutlu, ikinci dereceden bir tetrahedral katı elemandır ve karmaşık geometrilerin hassas bir şekilde temsil edilmesine olanak tanır.



Şekil 134. (a) C3D8R, (b) C3D10M ve (c) R3D4 eleman tipi

#### 4.4. Tescilli Yapıların Sonlu Elemanlar ile Geometrik Modellenmesi

Bu bölümde, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak düşen kaya bloklarının tescilli yapılar üzerindeki hasar potansiyeli analiz edilmiştir. Bu kapsamda, yamacın alt kısmında yer alan tescilli bir konuk evi, öğrenciler tarafından aktif olarak kullanılan bir Kur'an kursu ve 500 yıllık tarihi Çay Cami minaresi için üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur.

Analizlerin güvenilirliğini artırmak ve doğruluğunu sağlamak amacıyla, Şubat 2020'de bölgede gerçekleşen bir kaya düşmesi olayı incelenmiş ve saha gözlemleriyle elde edilen veriler kullanılarak hasar değerlendirmesi yapılmıştır. Farklı hacim ve kinetik enerjiye sahip kaya bloklarının oluşturduğu hasar düzeyleri, doğrusal olmayan darbe analizleri ile irdelenmiş ve yapı elemanlarının maruz kaldığı gerilme dağılımları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

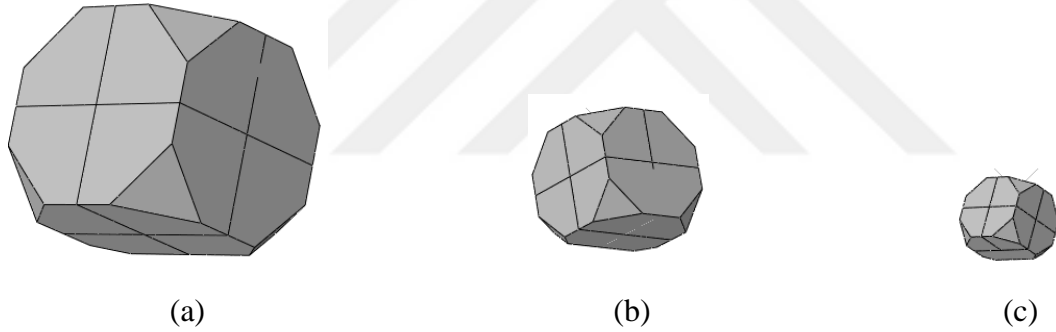
Yapıların geometrik boyutları, saha çalışmalarında gerçekleştirilen yerinde ölçümler ve proje paftalarından elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiş ve sonlu eleman modellerine entegre edilmiştir. Modelleme sürecinde kabul edilen malzeme özellikleri, yük etkileri ve analiz parametreleri detaylı bir şekilde açıklanarak, elde edilen sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır.

Hasar analizleri yapılacak olan yapıların sonlu eleman paket programında nümerik modellerini oluşturmak için kullanılan malzeme bilgileri Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.

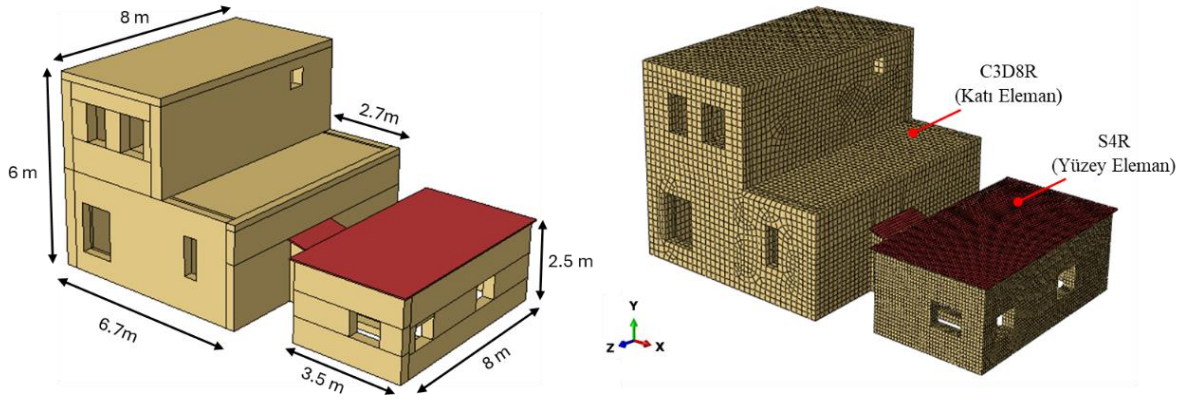
Özellik	Malzeme		
	Tuğla	Beton	Taş
$E_0$ (MPa)	1500	27094	3000
Poisson oranı, $\nu$	0.2	0.2	0.2
Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2390	2400	2300
Basınç dayanımı (MPa)	5	30	2.5
Çekme dayanımı (MPa)	0.5	3	0.25
Dilatasyon açısı, $\psi$	10	35	10
Eksantriklik, $e$	0.01	0.01	0.01
Maks. çekme hasar parametresi, $dt$	0.99	0.99	0.99
Maks. basınç hasar parametresi, $dc$	0.99	0.99	0.99
Çekme meridyeni üzerindeki ikinci gerilme değişkeninin basınç meridyeni üzerindeki oranı, $Kc$	0.667	0.667	0.667
Başlangıç iki eksenli basınç akma gerilmesinin başlangıç tek eksenli basınç akma gerilmesine oranı, $f_{bo} / f_{co}$	1.16	1.16	1.16
Viskozite Parametresi	0.002	0.002	0.002

Analizler kapsamında kaya parçasını temsil edecek olan ve literatürde kabul görmüş blok şeklin geometri Şekil 135'te verilmektedir. Çalışma kapsamında yapılacak hasar analizlerindeki farklı hacimlere sahip kaya blokları aynı geometriye sahip olup hacme bağlı kenar ölçüleri değişmektedir.

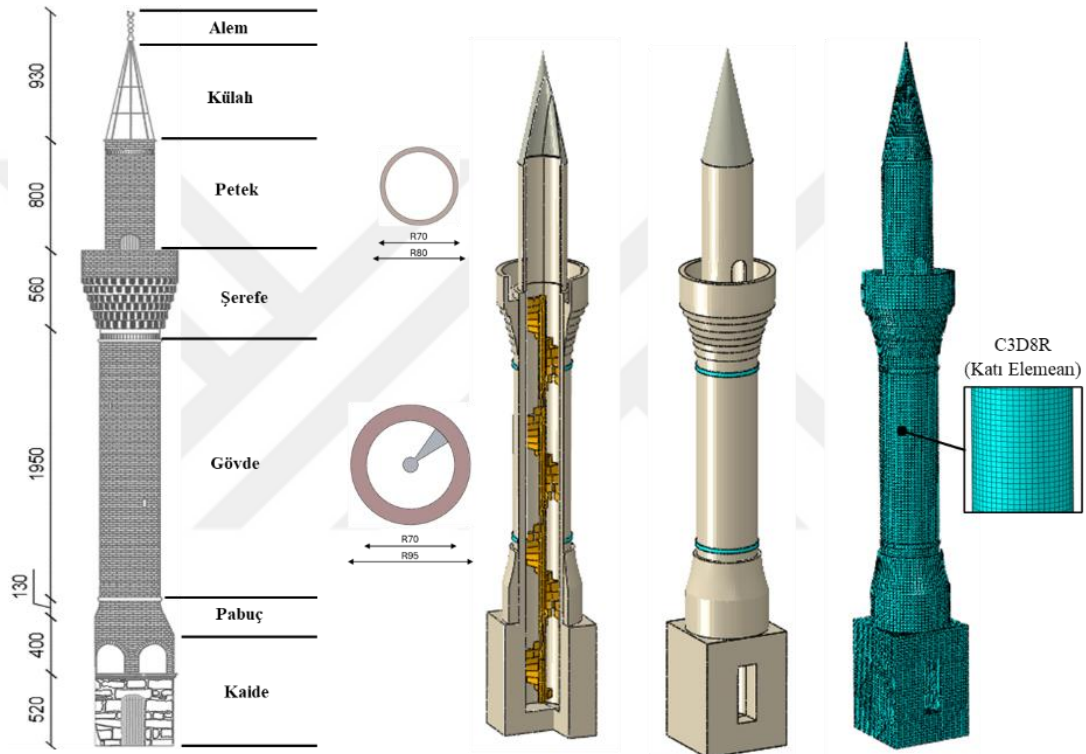


Şekil 135. (a) 5m<sup>3</sup>, (b) 1m<sup>3</sup> ve (c) 0.1m<sup>3</sup>'lük kaya parçasının temsile edecek blok geometrisi

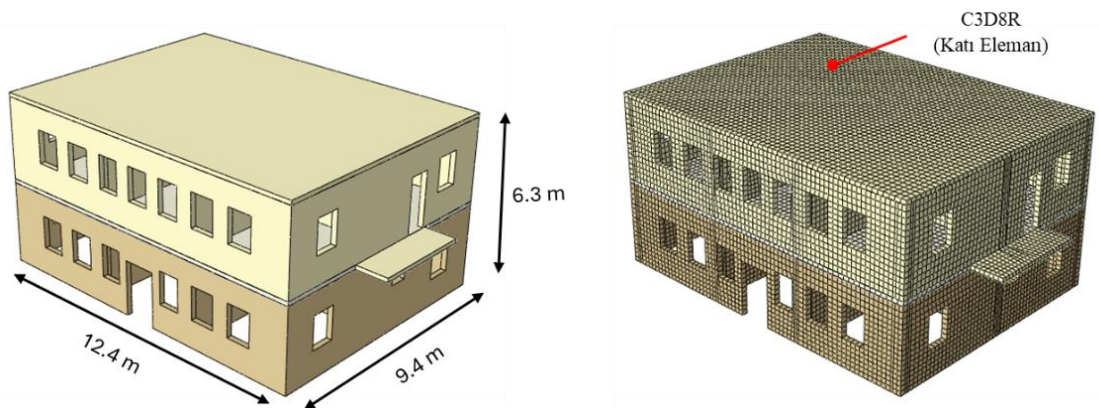
Oluşturulan modellerin sonlu elemanlar geometri özellikleri Şekil 136'da sunulmuştur. Ağ sıklığı (mesh), sonlu eleman modellemesinin kritik unsurlarından biridir. Seçilen eleman türlerinin yoğunluklarının ve şekillerinin doğru tanımlanması yalnızca analizlerin tamamlanıp tamamlanamayacağını değil, aynı zamanda sonuçların hızını ve doğruluğunu da doğrudan etkiler. Sonlu elemanlar için ağ sıklığı (mesh) boyutunun uygunluğunu değerlendirmek amacıyla yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Modelin büyüklüğü dikkate alınarak gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucunda kullanılan eleman tipi ve boyutu Tablo 15'te ayrıntılı olarak verilmiştir.



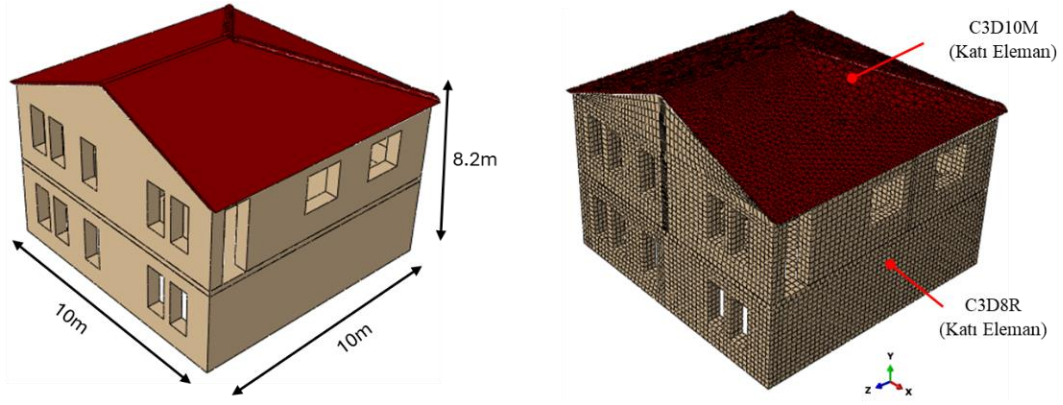
(a)



(b)



(c)



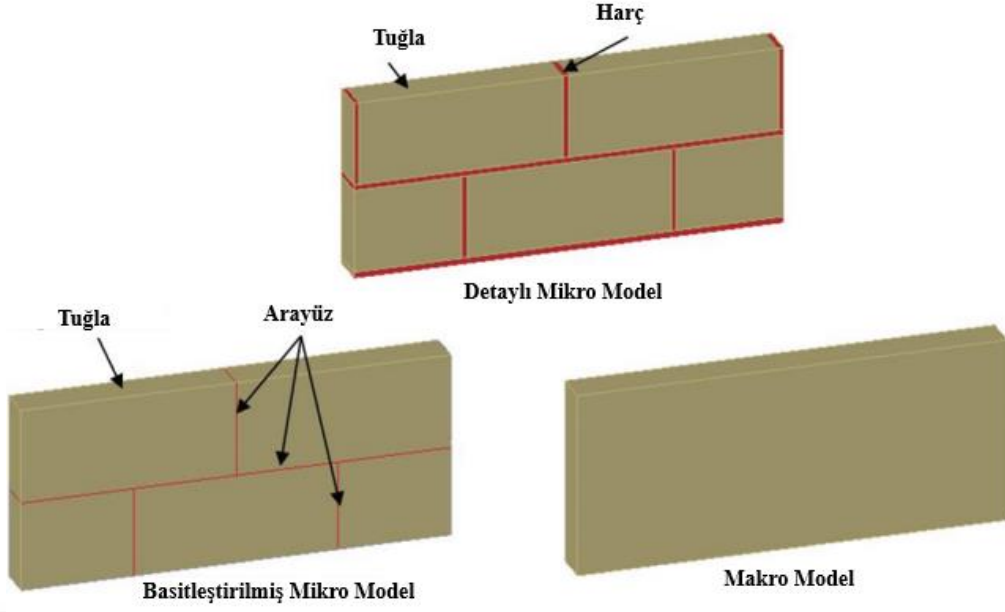
(d)

Şekil 136.Sonlu eleman 3D modelleri üzerinde gösterilen geometri özellikleri ve ağ sıklığı (mesh) (a) doğrulama çalışması için modellenen ev , (b) Çay Camii minaresi, (c) Kuran kursu ve (d) ise Tescilli konuk evi

Tablo 15. Sonlu eleman modellerinde kullanılan eleman tipi ve büyüklükleri.

Yapı	Eleman tipi	Parça	Eleman sayısı	En büyük eleman (mm)
Doğrulama için modellenen ev	C3D8R	Duvarlar	30323	20
	S4R	Çatı	3000	10
	R3D4	Kaya	1867	10
Çay Cami minaresi	C3D8R	Minare(merdiven hariç)	60844	10
	C3D10M	Merdiven	4231	20
	R3D4	Kaya	1867	10
Kuran kursu	C3D8R	Duvarlar + çatı	22441	18
	R3D4	Kaya	1867	10
Tescilli konuk evi	C3D8R	Duvarlar	26790	20
	S4R	Çatı	1738	30
	R3D4	Kaya	1867	10

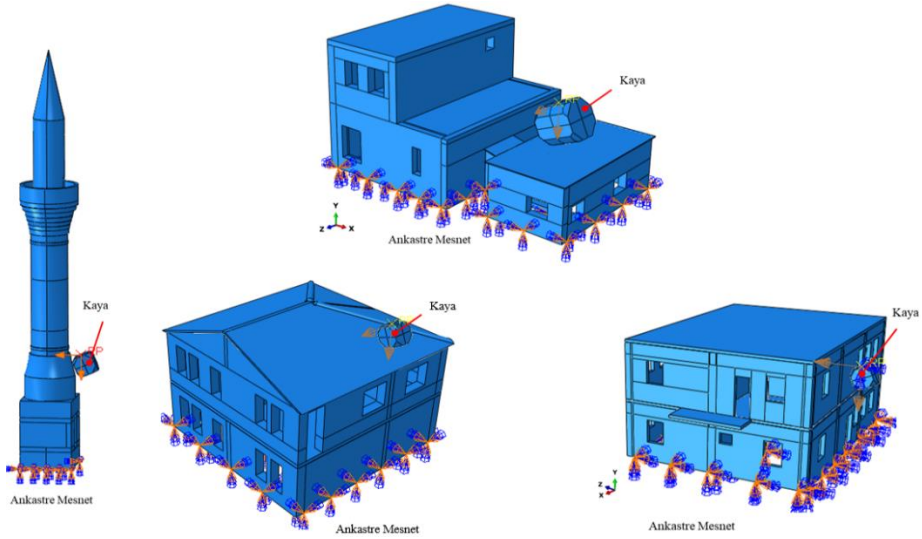
Abaqus'ta mikro ve makro modelleme, yapı elemanlarının analizinde kullanılan iki temel yaklaşımdır(Şekil 137). Mikro modelleme, yığma duvarları oluşturan tuğla ve harç malzemelerinin ayrı ayrı modellenerek malzeme için detaylı davranışlarının incelenmesini sağlar. Ancak bu yöntem daha fazla bellek kullanımı, yüksek işlemci gücü ihtiyacı ve uzun çözüm süreleri gerektirir. Makro modelleme ise yığma duvarların homojen ve izotropik bir malzeme olarak kabul edilmesiyle gerçekleştirilir ve daha geniş ölçekli yapı analizlerinde zaman ve kaynak tasarrufu sağlar. Bu çalışmada, yığma duvarların geometrik ve mekanik özellikleri dikkate alınarak makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Duvarlar tekil bir malzeme elemanı olarak tanımlanmış ve malzeme parametreleri (elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluk vb.) modele entegre edilmiştir. Bu yaklaşım, yığma duvarların statik ve dinamik yükler altındaki genel davranışlarının incelenmesine ve yapısal performansın güvenilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Nasery vd., 2023).



Şekil 137. Yığma yapı modelleme teknikleri (Nasery vd., 2023)

Çalışmada betonarme ve yığma duvar elemanlar arası bağlantıların tam bağlı olduğundan ve darbe ve kaya düşmesi gibi yüklere karşı bir bütün şeklinde davranış sergilediğine göre sonlu elemanlar modelleminde birbiriyle bağlı olan elemanların birlikte çalışmasını sağlayan birleşim aracı olan Tie özelliği kullanılmıştır. Yapının temeli en az zemine bir metre derinlikte gomulu olduğunu simule etmek için ankestre mesnetler atılarak modellenmiştir (Şekil 138).

Düşen ve düşmesi muhtemel olan kaya bloğunu binada oluşturacak hasarın tespit edilmesi için ilk önce riskli bloklar tespit edilmiş. Riskli bloklar Bölüm 2.2 ve Bölüm 2.5'teki kinematik analizler ile değerlendirdikten sonra Bölüm 3.2'de iki boyutlu ve Bölüm 3.3'te üç boyutlu kaya düşme analizlerle binaya çarpma anındaki maksimum hız ve kinetik enerjileri hesaplanmıştır. Elde edilen hız, kinetik enerji ve bloğun kütlesi dikkate alınarak çarpma şeklinde birebir gerçek modelle olan sonlu eleman modeline aynı sıçrama yüksekliğine sahip bölgede çarptırılarak lineer olmayan darbe analizi sonucu yapılarda oluşacak hasarlar tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 138.Sonlu eleman modeli sınır şartları ve kaya çarpma konumları

Yapılan analizler kaya düşme sırasında binaya çarpmadan önceki enerjiler dikkate alınarak yapılmıştır. Bunu sonlu eleman programına tanımlamak için kinetik enerji formülünden yararlanarak çarpan cismin kütlesi ve hızına bağlı olarak istenilen enerji değerleri tanımlanmıştır. Farklı yapılar için kaya düşmesi sonlu elemanlar analiz matrisi muhtemel düşecek kaya hızı, kaya kütlesi, kaya hacmi ve çarpma anındaki kaya enerjisi farklı senaryolara ait detaylı bir şekilde Tablo 16’da verilmiştir.

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

Bu eşitlikte:

Ek : kinetik enerji(J),

m : kütle (kg),

v: hızı (m/sn) temsil etmektedir.

Tablo 16. Farklı yapılar için kaya düşmesi sonlu elemanlar analiz matrisi.

Yapı	Kaya hızı (m/s)	Kaya kütlesi (kg)	Kaya hacmi (m <sup>3</sup> )	Çarpma anındaki kaya enerjisi (KJ)
Doğrulama Modeli	15	10000	4.35	1125
		2300	1	258.7
Konuk Evi	15	11500	5	1293.7
		230	0.1	25.9
		2300	1	209.6
Kur'an Kursu	13,5	11500	5	1047.9
		230	0.1	20.9
		2300	1	115
Minare	10	11500	5	575
		230	0.1	11.5

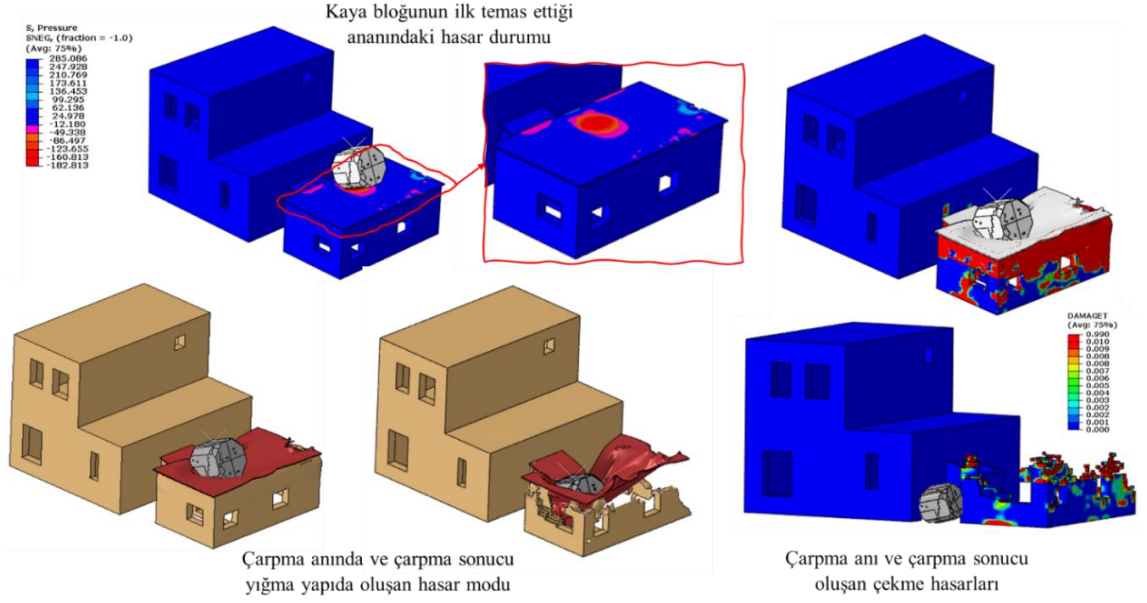
#### 4.5. Doğrulama Çalışması

Sonlu elemanlar analizlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla, saha verileri ve gerçek olaylardan elde edilen bilgiler analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Bu kapsamda, Şubat 2020’de gerçekleşen gerçek bir kaya düşmesi olayı (Şekil 139), modelleme sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek için önemli bir referans olarak ele alınmıştır. Gerçek olayda, yamaçtan kopan bir kaya bloğu, belirli bir yükseklikten serbest düşüşle hareket ederek kazandığı kinetik enerji ve çarpma hızı sayesinde bir konutun tavanını delip içeriye girmiştir. Bu olaydan elde edilen saha gözlemleri, hasarın türü, çarpma bölgesi ve yapısal deformasyon verileri titizlikle analiz edilerek sayısal modelleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Doğrulama sürecinde, düşen kaya bloğunun hız değeri, kütlesi, hacmi ve çarpma anındaki enerji miktarı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Ayrıca, yapının malzeme özellikleri (dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi) modelde birebir temsil edilmiştir. Gerçek olayla elde edilen hasar türü ve çarpma sonrası deformasyon şekilleri, sonlu elemanlar analizinden elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu doğrulama çalışması, sayısal modellemenin saha koşullarını ve gerçek olayları büyük ölçüde yansıttığını ve analizlerin güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Elde edilen uyumluluk, ilerleyen analizlerde farklı kaya boyutlarının ve yapı elemanlarının maruz kalabileceği hasarların güvenle tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Sonlu elemanlar kaya düşme doğrulama analizi sonucunda elde edilen hasar modları, çarpma anı ve çarpma sonucun oluşan çekme hasarları Şekil 140’te verilmiştir.



Şekil 139. Şubat 2020, Konya Sille’de gerçekleşen 10 ton ağırlığındaki kaya düşmesi (URL-3)



Şekil 140. Sonlu elemanlar yöntemiyle kaya düşmesi hasar analizi için yapılan doğrulama çalışmasına ait analiz sonuçları

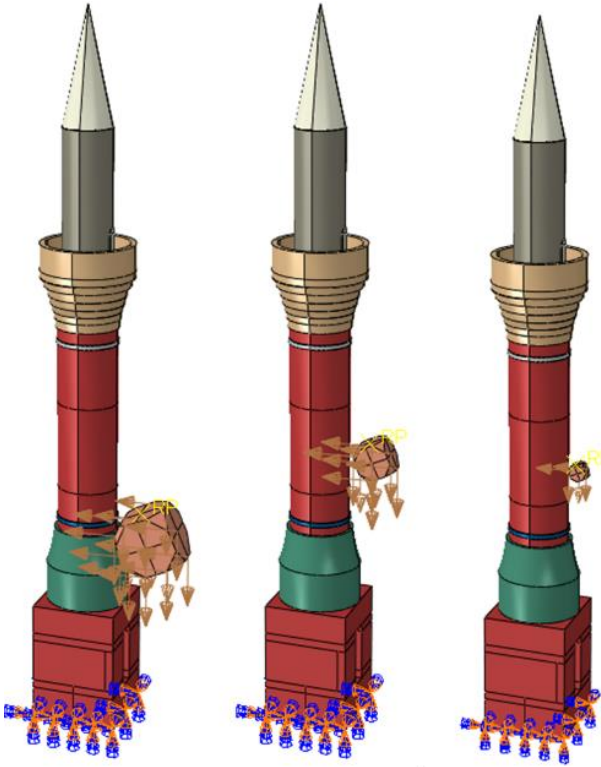
Sonuç olarak, doğrulama süreci modellenen senaryoların mühendislik açısından geçerliliğini kanıtlamış ve saha gözlemleriyle örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Şubat 2020’de Konya Sille’de gerçekleşen 10 ton ağırlığındaki kaya düşmesi olayına ait saha verileri, sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılmış ve çarpma anında meydana gelen hasar mekanizmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Gerçek olayda, kaya bloğunun düşmesi sonucu yapıların çatı ve üst kat elemanlarında ciddi hasarlar meydana gelmiş, bazı bölgelerde taşıyıcı elemanlar dahi işlevini yitirmiştir. Sayısal modelleme analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiş; özellikle kaya bloğunun ilk temas noktalarında yüksek gerilme yoğunlaşmaları gözlemlenmiştir. Yapısal deformasyonlar ve hasar modları, gerçek saha gözlemleriyle büyük oranda tutarlılık göstermiştir .

Analiz sonuçlarında, çarpma anında çatıda lokal delinmeler, taşıyıcı elemanlarda plastik deformasyonlar ve yığma yapıların hassas bölgelerinde çekme hasarları tespit edilmiştir. Gerçek olaydan elde edilen gözlemlerle birlikte, modelleme sonuçları bu tür riskli bölgelerde uygulanması gereken güçlendirme teknikleri ve koruyucu önlemler hakkında güvenilir veriler sunmuştur. Bu doğrulama çalışması, sonlu elemanlar analizlerinin gelecekte benzer yapıların risk değerlendirmelerinde, güçlendirme projelerinin oluşturulmasında ve koruma stratejilerinin belirlenmesinde etkin ve güvenilir bir araç olarak kullanılabilceğini açıkça göstermektedir.

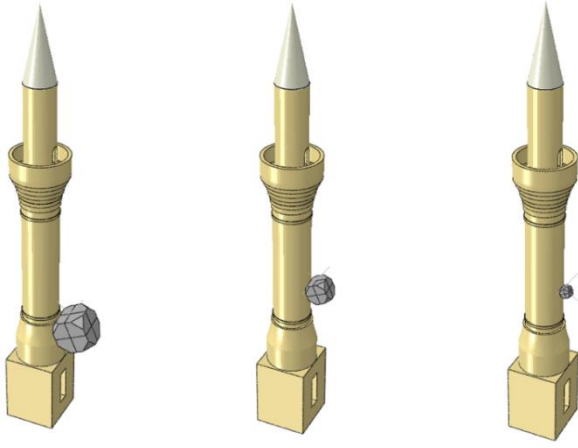
#### 4.6. Farklı Kaya Bloklarına Göre Çay Cami Minaresinin Hasar Analizleri

Çay Camii minaresinin hasar analizi, 5 m<sup>3</sup>, 1 m<sup>3</sup> ve 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloklarının çarpması sonucu oluşabilecek yapısal hasarların değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, blokların fiziksel ve jeomekanik özellikleri saha çalışmalarından elde edilen verilerle belirlenmiş ve elastisite modülü ile poisson oranı literatürdeki yığılma birimlere önerilen değerlerden alınmıştır (Nasery vd., 2023).

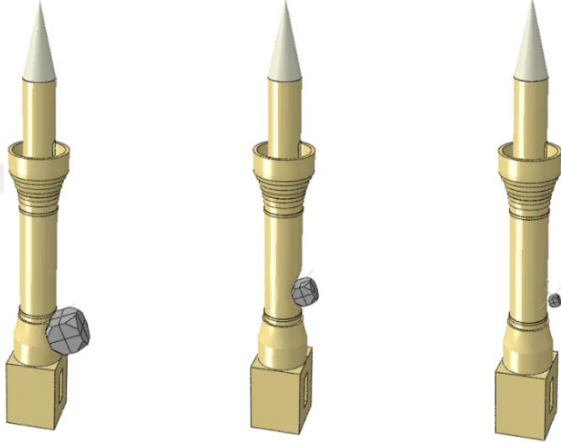
Bloğun çarptığı yüzey ve bölgeleri, Bölüm 3.2’de verilen 2D ve Bölüm 3.3’te verilen 3D kaya düşme analizlerinden elde edilmiştir. Kaya düşme analizlerinden de görüldüğü gibi, herhangi bir koruma yapısı olmaksızın, en kritik senaryoda düşen blokların binalara çarpma ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde en kritik durum senaryoları ele alınarak 5 m<sup>3</sup>, 1 m<sup>3</sup> ve 0.1 m<sup>3</sup> hacimli kaya bloklarının minareye çarpması durumunda ortaya çıkabilecek hasar düzeyleri analiz edilmiştir. Bu amaçla, minarenin ve riskli kaya bloklarının 3D sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve Şekil 141’de görselleştirilmiştir. Lineer olmayan Explicit kaya düşme analizi sonuçları doğrultusunda elde edilen hasar modu Şekil 142’de, çekme ve basınç gerilmeleri nedeniyle yapıda oluşan hasar bölgeleri ve elemanlardaki dağılımlar Şekil 143-144’te sunulmuştur. Ayrıca, farklı boyutlardaki kaya bloklarının çarpma etkisiyle meydana gelen hasar oranları Tablo 17’de özetlenmiştir.



Şekil 141. Çay Cami minaresinin (5-1-0.1)m<sup>3</sup>’lük kaya bloklarının düşmesi durumunda 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri

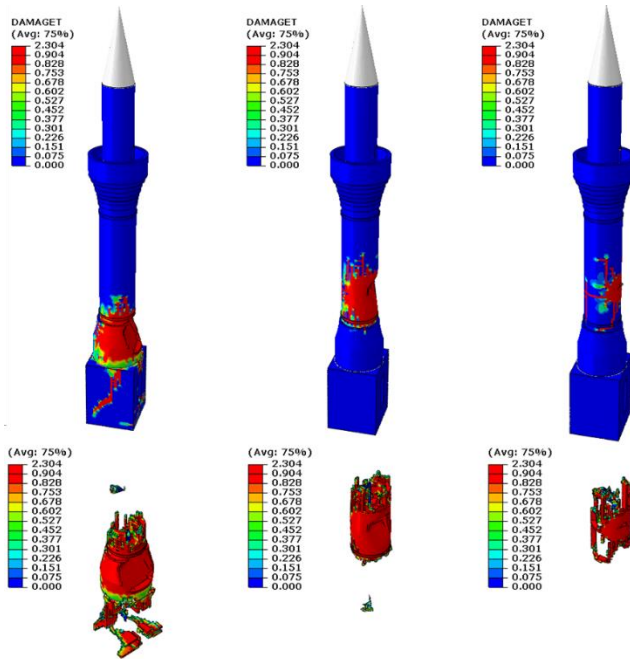


a) Çarpma anında minarede oluşan hasar modu

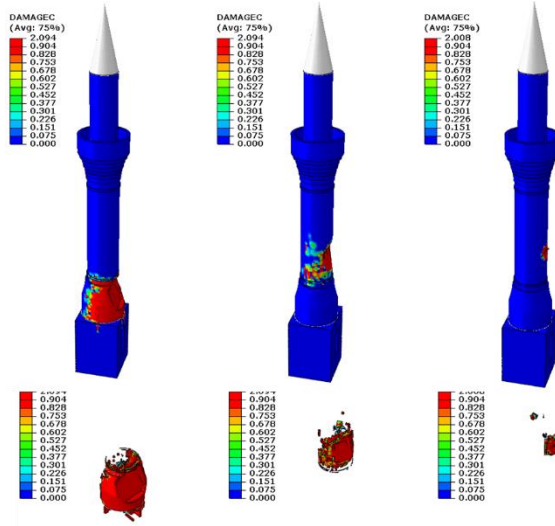


b) Çarpma sonrası minarede oluşan hasar modu

Şekil 142. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapılarda oluşan hasar modu



Şekil 143. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı



Şekil 144. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, 5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloklarının çarpması durumunda, minarenin pabuç ve kaide kısmında ve temel bölgelerinde geniş çaplı deformasyonlar ve kırılmalar meydana gelmiştir. Çarpmanın etkisiyle minare yapısının %15.4'ü hasar almış, taşıyıcı elemanlarında ağır hasar ve stabilite kaybı gözlemlenmiştir. 1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğu ise minare yapısının %9.1'inde daha lokal ancak ciddi hasarlara yol açmıştır. Özellikle minarenin alt ve orta bölgelerinde çekme gerilmeleri yoğunlaşmış, bazı bölgelerde taşıyıcı sistemde kırılmalar ve çatlaklar oluşmuştur. Yapısal bütünlük kısmen korunmuş olsa da analizler bu tür bir darbenin minarenin stabilitesi için ciddi bir risk taşıdığını göstermektedir. 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya blokları, daha sınırlı bir etkiye sahip olmasına rağmen, minarenin yüzeyinde lokal çatlaklar ve yüzeysel hasarlar oluşturmuştur. Bu hasarlar, minare yapısının %3.7'sine denk gelmektedir. Çekme gerilmelerinin etkisiyle minarenin gövde kısmında ve bağlantı noktalarında küçük deformasyonlar tespit edilmiştir. Her ne kadar genel yapı bütünlüğü korunmuş olsa da, minarenin narin yapısı göz önüne alındığında bu tür hasarların doğrudan yıkıma sebep olabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 17. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu Çay Cami minaresinde oluşan hasar dağılımı.

Çarpan Kaya hacmi (m <sup>3</sup> )	Yapının hacmi (m <sup>3</sup> )	Hasar görmüş hacim (m <sup>3</sup> )		Hasar hacmi oranı (%)	
		Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
5	49.6	7.66	5.57	15.4	11.2
1		4.5	1.3	9.1	2.6
0.1		1.84	0.3	3.7	0.6

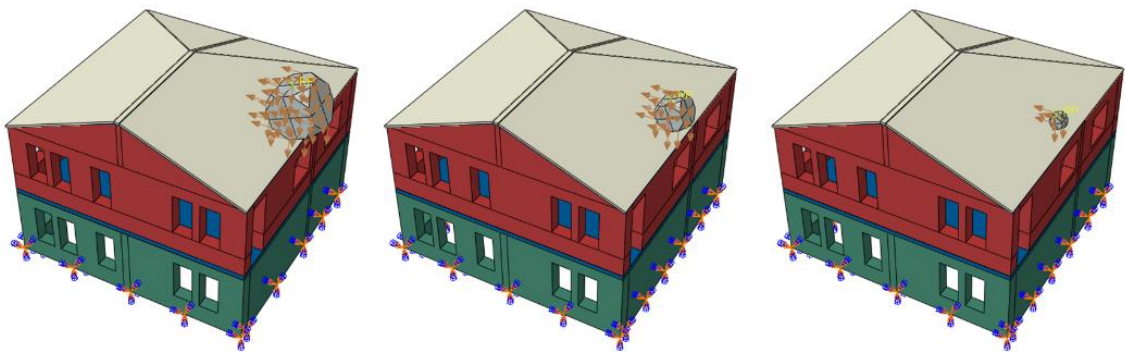
Not: Çarpan kaya hacmi yapının dolu hacmini ifade etmektedir.

#### 4.7. Farklı Kaya Bloklarına Göre Konuk Evinin Hasar Analizleri

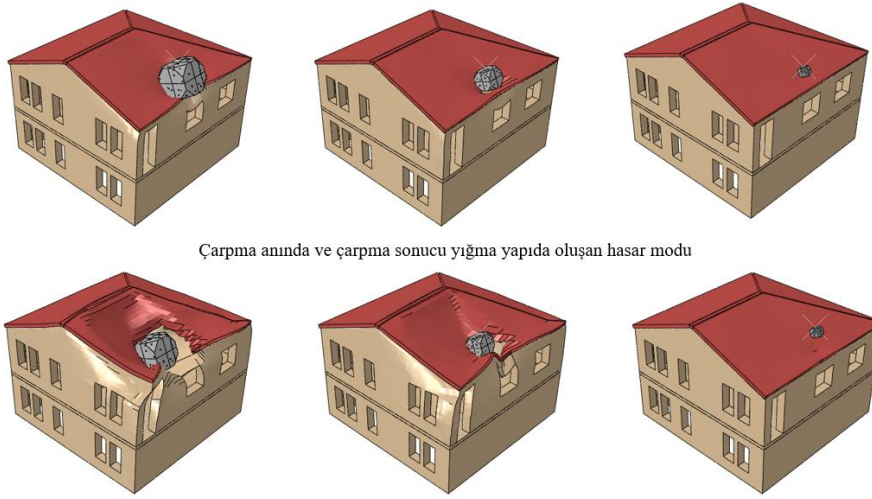
Hasar analizlerinde düşen kaya bloklarının fiziksel ve jeomekanik özellikleri jeolojik çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilmiş, elastisite modülü ile poisson oranı literatürdeki yığma birimlere önerilen değerlerinden alınmıştır (Nasery vd., 2023). Düşen blokların en kritik boyutları, arazide yapılan süreksizlik ara uzaklığı ölçümleri ve yüzey inceleme çalışmaları kapsamında belirlenmiştir. Kaya düşme analizlerinde belirtildiği gibi riskli bloklar  $5 \text{ m}^3$ ,  $1 \text{ m}^3$  ve  $0.1 \text{ m}^3$  olarak dikkate alınmış; bu blokların sırasıyla 11.500 kg, 2.300 kg ve 230 kg kütleyle sahip olduğu kabul edilmiştir.

Bloğun çarptığı yüzey ve bölgeleri, Bölüm 3.2’de verilen 2D ve Bölüm 3.3’te verilen 3D kaya düşme analizlerinden elde edilmiştir. Kaya düşme analizlerinden de görüldüğü gibi, herhangi bir koruma yapısı olmaksızın, en kritik senaryoda düşen blokların binalara çarpma ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde en kritik durum senaryoları ele alınarak  $5 \text{ m}^3$ ,  $1 \text{ m}^3$  ve  $0.1 \text{ m}^3$  hacimli kaya bloklarının binaya çarpması durumunda ortaya çıkabilecek hasar düzeyleri analiz edilmiştir. Bu amaçla, binanın ve riskli kaya bloklarının 3D sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve Şekil 145’te görselleştirilmiştir.

Lineer olmayan Explicit kaya düşme analizi sonuçları doğrultusunda elde edilen hasar modu Şekil 146’da, basınç ve çekme gerilmeleri nedeniyle yapıda oluşan hasar bölgeleri ve elemanlardaki dağılımlar Şekil 147-148’de sunulmuştur. Ayrıca farklı boyutlardaki kaya bloklarının çarpma etkisiyle meydana gelen hasar oranları Tablo 18’de özetlenmiştir.

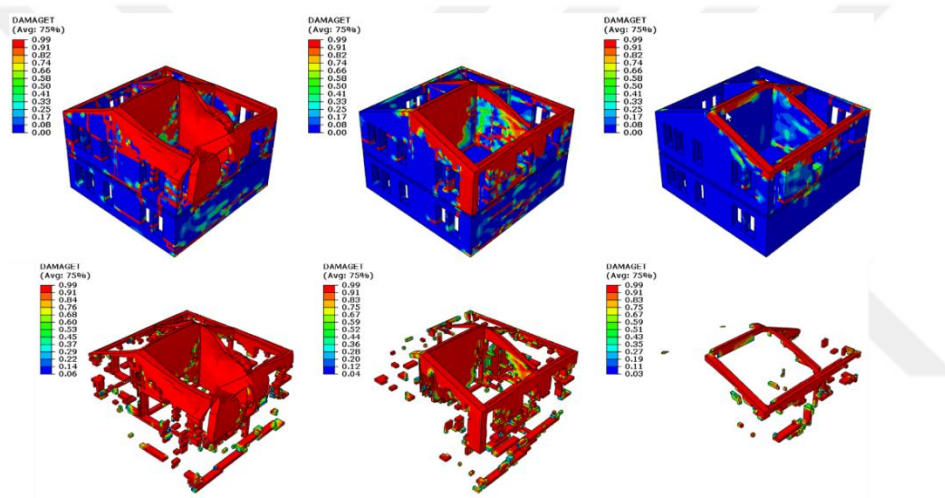


Şekil 145. Konut evinin  $(5-1-0.1) \text{ m}^3$  kaya bloklarının düşmesi durumundaki 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri

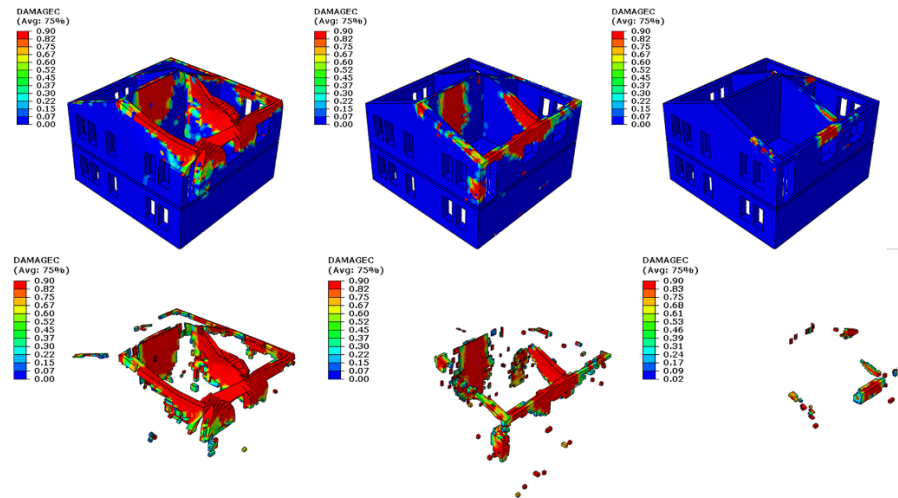


Çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu

Şekil 146. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu



Şekil 147. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı



Şekil 148. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, 5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloklarının çarpması durumunda konuk evinin hacimce %28.5'i hasar görmüştür. Çarpmanın etkisiyle yapının taşıyıcı elemanlarında geniş çaplı deformasyonlar meydana gelmiş ve yapısal stabilite büyük oranda kayıp olmuştur. Hasarın yoğunluğu yapının genel performansını ciddi şekilde etkilemiş ve göçme riski oluşturmuştur.

1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğu ise yapının %17.5'inde hasara yol açmıştır. Hasar daha lokal bölgelerde yoğunlaşmış olmasına rağmen, taşıyıcı elemanlarda önemli deformasyonlar ve çatlaklar meydana gelmiştir. Bu tür bir darbe yapının bütününde genel bir hasar oluşturmazsa da, yapısal güvenlik açısından kullanılmaz hale getirmiştir. 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya blokları, daha sınırlı bir etkiye sahip olmasına rağmen, yapının %5.6'sında hasar meydana getirmiştir. Her ne kadar çatı elemanlarında delici bir etki oluşmamış olsa da, kaya çarpması sonucu meydana gelen malzeme kaybı ve yüzeysel dökülmeler, yapının iç mekân güvenliğini tehdit edecek düzeyde risk oluşturmuştur.

Sonuç olarak, kaya bloklarının farklı hacimlerdeki çarpma etkileri, yapısal elemanlarda doğrudan temas bölgeleriyle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda çevresel elemanlara da yayılan gerilmeler nedeniyle ikincil hasarlara yol açmaktadır. 5 m<sup>3</sup>'lük blok, yapının büyük bir kısmında ciddi deformasyonlara neden olurken, 1 m<sup>3</sup>'lük blok lokal zayıflıklara ve stabilite sorunlarına, 0.1 m<sup>3</sup>'lük blok ise daha sınırlı ama ihmal edilemez yüzeysel hasarlara yol açmıştır. Bu durum yapının taşıyıcı sistem bütünlüğünü ve genel dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir.

Tablo 18. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu konuk evinde oluşan hasar dağılımı

Çarpan Kaya hacmi (m <sup>3</sup> )	Yapının hacmi (m <sup>3</sup> )	Hasar görmüş hacim (m <sup>3</sup> )		Hasar hacmi oranı (%)	
		Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
5	149.4	42.6	12.6	28.5	8.4
1		26.1	5.5	17.5	3.7
0.1		8.3	1.1	5.6	0.7

Not: Çarpan kaya hacmi yapının dolu hacmini ifade etmektedir.

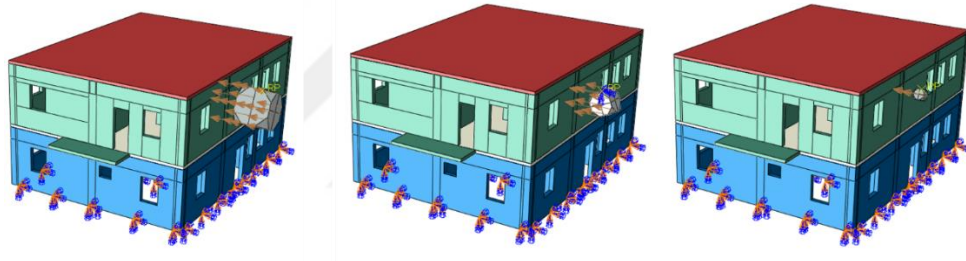
#### 4.8. Farklı Kaya Bloklarına Göre Kur'an Kursu Binasının Hasar Analizleri

Kur'an Kursu binasının hasar analizi, farklı büyüklükteki kaya bloklarının yapısal elemanlar üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 5 m<sup>3</sup>, 1 m<sup>3</sup> ve 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki sırasıyla 11.500 kg, 2.300 kg ve 230 kg kütleyle sahip kaya bloklarının çarpma senaryoları ele alınarak, yapının betonarme kolon ve kirişleri ile tuğla dolgu duvarlarında meydana gelebilecek hasarlar incelenmiştir. Yapı taşıyıcı sistem olarak betonarme kolon ve kirişlerden, dolgu elemanları olarak ise tuğla

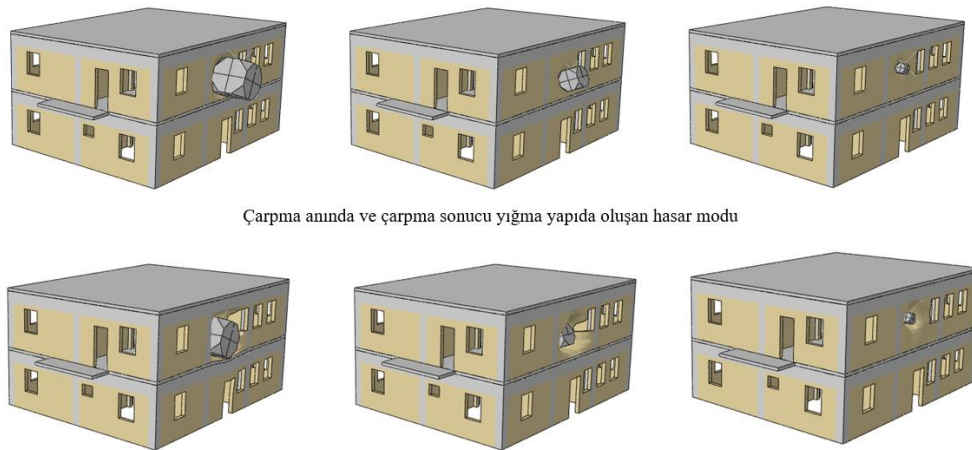
duvarlardan oluşmaktadır. Analizlerde kaya bloklarının fiziksel ve jeomekanik özellikleri saha çalışmaları ile belirlenmiş; yapısal analizlerde kullanılan elastisite modülü ve poisson oranı ise betonarme yapılar için literatürde sunulan değerlerden alınarak modele uyarlanmıştır (Çoşğun, 2014).

Bloğun çarptığı yüzey ve bölgeleri, Bölüm 3.2’de verilen 2D ve Bölüm 3.3’te verilen 3D kaya düşme analizlerinden elde edilmiştir. Kaya düşme analizlerinden de görüldüğü gibi, herhangi bir koruma yapısı olmaksızın en kritik senaryoda düşen blokların binalara çarpma ihtimali bulunmaktadır. Binaların ve riskli kaya bloklarının 3D sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve Şekil 149’da görselleştirilmiştir.

Lineer olmayan Explicit kaya düşme analizi sonuçları doğrultusunda elde edilen hasar modu Şekil 150’de, basınç ve çekme gerilmeleri nedeniyle yapıda oluşan hasar bölgeleri ve elemanlardaki dağılımlar Şekil 151-152’de sunulmuştur. Ayrıca, farklı boyutlardaki kaya bloklarının çarpma etkisiyle meydana gelen hasar oranları Tablo 19’da özetlenmiştir.

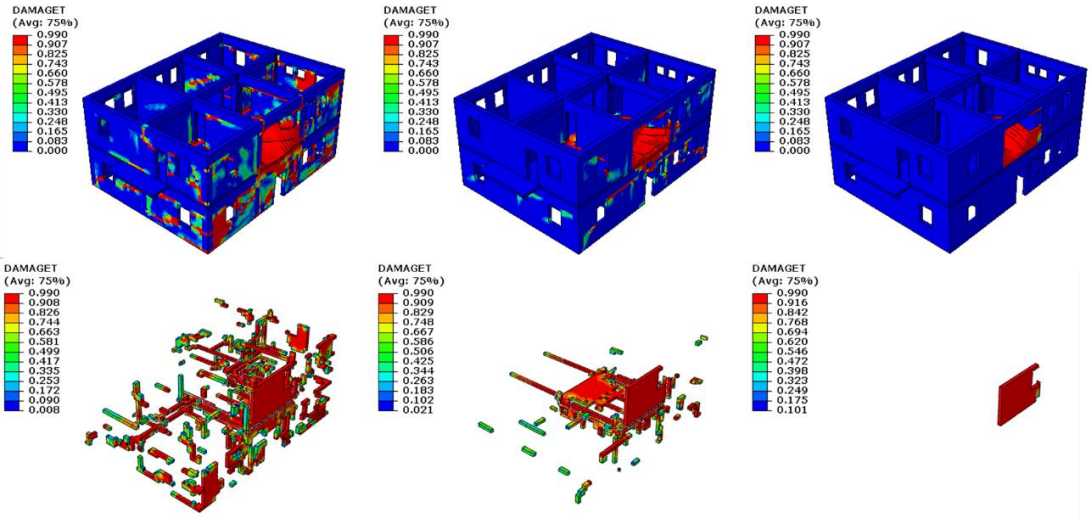


Şekil 149. Kur'an kursunun (5-1-0.1)m<sup>3</sup> kaya bloklarının düşmesi durumundaki 3D olarak oluşturulan sonlu elemanlar modelleri

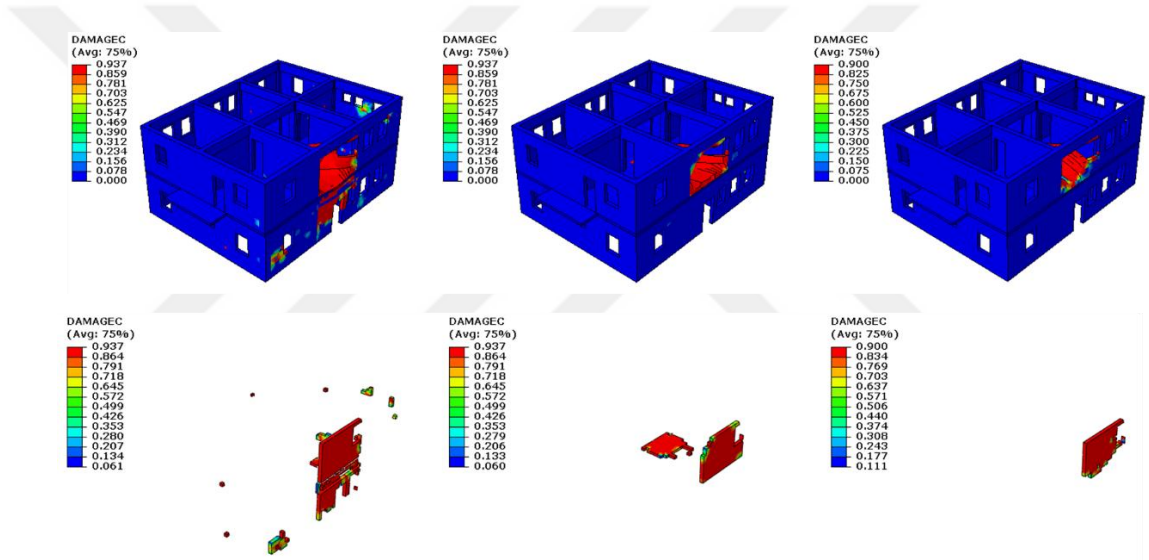


Çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu

Şekil 150. (5-1-0.1) m<sup>3</sup> kaya bloklarının çarpma anında ve çarpma sonucu yapıda oluşan hasar modu



Şekil 151. (5-1-0,1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan çekme hasarlarının dağılımı



Şekil 152. (5-1-0,1) m<sup>3</sup> Kaya bloklarının çarpması sonucu yapılarda oluşan basınç hasarlarının dağılımı

Analiz sonuçlarına göre, 5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğunun çarpması durumunda, Kur'an Kursu binasının hacimce %12'si hasar görmüştür. Çarpmanın etkisi, öncelikle tuğla dolgu duvarlarda büyük ölçekli yıkıma yol açmış ve bu enerji, taşıyıcı betonarme kolon ve kiriş elemanlara da iletilmiştir. Özellikle kolon ve kiriş bölgelerinde yüksek gerilme birikimi gözlemlenmiş ve bazı bölgelerde kırılmalar ve yapısal zayıflıklar meydana gelmiştir. Bu durum, yapının genel stabilitesini ciddi şekilde tehdit etmiş ve taşıyıcı sistem bütünlüğünü önemli ölçüde zayıflatmıştır. 1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğunun çarpması sonucu, yapının %5.9'u hasar görmüştür. Bu blok, tuğla duvarlarda daha lokal ancak etkili yıkımlara neden olmuş; kolon ve kiriş bağlantı noktalarında çatlaklar ve deformasyonlar oluşmuştur. Yapısal stabilite kısmen korunmuş olsa da bu büyüklükteki bir bloğun etkisi bölgesel dayanım kaybına ve yük aktarımında düzensizliklere yol

açmıştır. 0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloğu ise yapının %1.3'ünde hasara yol açmıştır. Hasar daha çok tuğla duvarların yüzeyinde lokal çatlaklar ve ezilmeler şeklinde meydana gelmiştir. Çarpma enerjisi doğrudan taşıyıcı betonarme elemanlara iletilmemiş olsa da dolgu duvar elemanlarında küçük ölçekli hasarlar oluşmuştur. Bu tür yüzeysel hasarlar, kısa vadede kritik bir tehdit oluşturmasa da uzun vadede yapısal dayanımı olumsuz etkileyebilecek riskler taşımaktadır.

Sonuç olarak, kaya bloklarının farklı hacimlerdeki çarpmaları, Kur'an Kursu binasında doğrudan ve dolaylı olarak yapısal hasarlara yol açmıştır. 5 m<sup>3</sup>'lük blok, taşıyıcı sistemin genel stabilitesini ciddi şekilde tehdit ederken, 1 m<sup>3</sup>'lük blok lokal zayıflıklar oluşturmuş, 0.1 m<sup>3</sup>'lük blok ise yüzeysel hasarlara neden olmuştur. Bu durum, yapının taşıyıcı ve dolgu elemanlarının korunması için mühendislik müdahalelerinin titizlikle planlanması gerektiğini açıkça göstermektedir.

Tablo 19. Farklı hacimlerdeki kaya bloklarının çarpması sonucu Kur'an Kursu binasında oluşan hasar dağılımı

Çarpan Kaya hacmi (m <sup>3</sup> )	Yapının hacmi (m <sup>3</sup> )	Hasar görmüş hacim (m <sup>3</sup> )		Hasar hacmi oranı (%)	
		Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
5	119.4	14.3	3.14	12.0	2.6
1		7.01	2.1	5.9	1.8
0,1		1.5	1.3	1.3	1.1

Not: Çarpan kaya hacmi yapının dolu hacmini ifade etmektedir.

#### 4.9. Kaya Düşmesi Sonucu Oluşan Hasarların Yapısal ve Güvenlik Açısından Değerlendirilmesi

Yapılan riskli kaya blok tespit çalışmaları kapsamında, süreksizlik aralıklarına bağlı olarak yamacın üzerinde 1 m<sup>3</sup> ve 5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloklarının ortalama riskli bloklar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yamaçta bulunan 200-300m<sup>3</sup> hacme sahip bloklar direk müdahale gerektirdiğinden ortalama blok tespitine dahil edilmemiştir. Büyük hacimli bloklar ayrı olarak değerlendirilmiştir. Daha küçük hacimli 0.1 m<sup>3</sup> kaya bloklarının ve yamaçta serbest durumda bulunan daha küçük blokların da yapısal bütünlüğü ve insan güvenliği açısından önemli tehditler oluşturduğu tespit edilmiştir.

5 m<sup>3</sup> hacmindeki kaya bloklarının düşmesi durumunda, Kur'an Kursu, konuk evi ve Çay Camii minaresinde yapılan analizlerde, neredeyse tüm yapı elemanlarında ağır hasar ve yapısal yıkım riskini göstermiştir. Böylesine büyük bir blok, yapının taşıyıcı elemanlarını devre dışı bırakarak bütün yapısal sistemi çökme noktasına getirmekte ve içinde ya da çevresinde bulunan insanların can güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir.

1 m<sup>3</sup> hacmindeki blokların analiz sonuçlarına göre, yapıların çoğunda lokal hasar meydana gelmiş ve bu durum taşıyıcı sistemin bütünlüğünü tam anlamıyla tehlikeye sokmamıştır. Ancak minare gibi ince ve narin geometrili yapı elemanlarında, bu büyüklükteki bir blok bile yıkım ve ağır hasar riski taşımaktadır. Özellikle minarenin kırılabilir yapısı düşünüldüğünde, bu tür bir darbenin yıkıcı sonuçlara yol açabileceği anlaşılmıştır.

0.1 m<sup>3</sup> hacmindeki blokların ve daha küçük çaplı onlarca kayanın düşmesi durumunda ise, genel yapı bütünlüğü büyük oranda korunurken lokal ve delinme tipi hasarlar gözlemlenmiştir. Bu tür hasarlar, özellikle yapının çatı elemanlarında belirgin hale gelmiş ve taşıyıcı olmayan elemanlarda da etkili olmuştur. Her ne kadar genel yapı stabil kalmış olsa da bu tür küçük bloklar bile yapının içerisinde veya çevresinde bulunan insanların can güvenliği için önemli bir risk teşkil etmektedir.

Elde edilen analiz sonuçları göstermektedir ki, 0.1 m<sup>3</sup> gibi küçük bir blok bile tarihi ve tescilli yapıların üzerinde ciddi riskler oluşturabilir. Bu durum, yalnızca yapıların değil, aynı zamanda Silile Vadisi boyunca hareket eden araçlar ve insanların güvenliği açısından da büyük bir tehdittir. Ayrıca, yapıların taşıyıcı sistemleri dışındaki bölümleri de bu tür çarpmalardan doğrudan etkilenebilir ve kalıcı hasarlar alabilir.

Analizler sonucunda, kaya ıslah yöntemlerinin belirlenmesinde tüm olası senaryoların kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Kaya bloklarının kırılması ve temizlenmesi sırasında, hangi büyüklükteki blokların serbest düşüşüne izin verilebileceğinin açık ve net bir şekilde tanımlanması gerektiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, 0.1 m<sup>3</sup> gibi küçük hacimli bir kaya bloğunun dahi serbest düşüşüne izin verilmesinin kabul edilemez risk seviyeleri oluşturabileceği belirlenmiştir. Bu durum hem yapı güvenliği hem de insan hayatı açısından kritik bir önem taşımaktadır. Sonuç olarak, yamacın üzerinde bulunan ve 100-200 m<sup>3</sup> gibi büyük hacimlere sahip riskli kaya bloklarının kontrollü bir şekilde kırılması ve temizlenmesi gerekliliği, bu analizlerin ışığında açıkça ortaya konmuştur. Bu işlemlerin, tescilli yapıların güvenliği tamamen sağlandıktan ve gerekli mühendislik önlemleri alındıktan sonra gerçekleştirilmesi hem yapıların korunması hem de insan hayatının güvence altına alınması açısından hayati bir önem taşımaktadır.

## 5. OPTİMUM KAYA ISLAHI YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaya düşmesi olayında, problemin çok detaylı ve dikkatli tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmalardan elde edilecek veriler sonucu dolayısıyla yapılacak olan önlem yapılarının güvenilirliği, yapılabirliği ve maliyeti doğrudan etkileneceği unutulmamalıdır. Genel olarak kaya ıslahı çalışmalarında birkaç mühendislik ve endüstriyel dağcılık disiplinlerinin beraber çalışması gerekmektedir (Nasery ve Çelik, 2020). Bu nedenle koordinasyon oldukça önemlidir. Kaya ıslahı projeleri yüksek maliyetli projeler olduğundan ve yapılacak en ufak hatada maliyet ve/veya emniyet faktöründe çok farklı sonuçlar çıkacağından, elde edilen veriler ve çözümler birkaç kez kontrol edilmelidir. Bu kapsamda önerilecek ıslah yöntemlerin uygulanabilir olması ve uygulama aşamalarını da tecrübeli bir ekip tarafından denetlenmesi gerekmektedir.

Optimum ıslah yönteminin belirlenmesine yönelik çalışmalar üç temel aşamadan oluşacaktır. Birinci aşama, bölgedeki kaya birimlerinin detaylı incelenmesi, hazırlanan haritalar üzerinden en kesit ve boy kesitlerin çıkarılmasını ve bu kesitlerin kullanılabilir veri haline getirilmesini kapsamaktadır. İkinci aşamada, harita alımında tespit edilen ve düşme riski taşıyan blokların jeolojik, jeoteknik ve jeofizik veriler ile yerinde yapılan gözlem ve arazi incelemeleri ışığında değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Üçüncü aşamada ise; kaya kırımı, enerji sönmüleyici bariyer, oluk bariyer, kaya tutucu toprakarme bariyer ve sabitleme sistemleri vb. mühendislik önlemlerinin hesaplamaları yapılacak, müdahale alanları belirlenecek ve önerilen önlemler için yeterlilik ve kapasite analizleri ile detaylı boyutlandırmalar sunulacaktır. Ayrıca, kaya düşmesi olayının arkeolojik bir alanda meydana gelmesi durumunda süreç çok daha titizlikle yürütülmeli; her risk için birden fazla alternatif ıslah yöntemi değerlendirilerek, minimum müdahale ve maksimum güvenlik prensibi çerçevesinde, alanın özgünlüğüne en uygun çözüm tercih edilmelidir.

Çalışma kapsamında, yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda, alanın üç farklı litolojik birimden oluştuğu belirlenmiştir. Bu birimler, yamacın üst kotundan aşağıya doğru sırasıyla andezitik tuf, dasitik breş ve dasitik tuf özelliklerindedir. Kaya kütlelerinde tespit edilen süreksizliklerin mühendislik özellikleri ile alınan blok örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen jeoteknik parametreler kullanılarak; kinematik analiz, limit denge analizi ve sayısal analiz olmak üzere üç farklı yöntemle yamaçların duraylılık durumu değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda,

andezitik tüf, dasitik breş ve dasitik tüf kaya kütlelerinde yapılan yamaç duraylılık değerlendirmelerinde tüm birimlerin duraysız özellik gösterdiği tespit edilmiştir.

Duraysızlık sonucu ve yamaçta düğüme riski taşıyan blokların olası hareketleri durumunda ulaşabilecekleri maksimum mesafe, hız ve kinetik enerji değerlerini belirlemek amacıyla 2D ve 3D kaya düğüme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma alanına ait sayısal arazi modelleri kullanılarak n analizler yapılmış ve kritik gzerghlar belirlenmiştir. Bu gzerghlardan alınan 20 kesit boyunca toplam 2000 farklı olasılık senaryosuyla iki boyutlu kaya düğüme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, dört farklı bölgede her biri 50 adet riskli kaynak bölgeyi içeren toplam 200 farklı olasılık üzerinden üç boyutlu kaya düğüme analizleri de gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, debilecek blokların sıçrama yüksekliği, ulaşabilecekleri maksimum mesafe, hız ve toplam kinetik enerji değerleri hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra, olası kaya dmeleri sırasında yamacın altında yer alan yol ve konutlar ile tescilli yapıların güvenlik durumu da sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen verilere göre, den blokların %95'i alt kotlardaki yol ve konutlara ulaşma potansiyeline sahiptir. En kritik kesitte yola ulaşan bir kaya bloğunun yaklaşık 6000 kJ kinetik enerjiye, 27.5 m/s hıza ve maksimum 25.65 m sıçrama yüksekliğine ulaştığı belirlenmiştir. Ancak yola temas ettiği noktadaki ortalama sıçrama yüksekliği 5–6 m arasında hesaplanmıştır. Buna ek olarak, yamacın üst kotlarında yaklaşık 200–300 m<sup>3</sup> hacminde büyük bloklar da tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen etüt, ölçüm, deney ve analizler sonucunda, yamaçtaki riskler net bir Şekilde ortaya konmuş ve uygun ıslah yöntemleri belirlenmiştir. Çalışma alanının 1. derece arkeolojik sit alanı olması nedeniyle, önerilen önlemler minimum müdahale esas alınarak, yamacın doğal görünümünü en az etkileyecek Şekilde seçilmiştir.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, riskli blok ve bölgelere yönelik lokal ölçekli önlemler alınmasının, maksimum güvenlik ve minimum müdahale ilkeleri doğrultusunda daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Belirlenen ıslah yöntemleri, düşük yapım ve bakım maliyetine sahip olmakla birlikte, yüksek güvenlik sağlayacak nitelikte olmalıdır. Ayrıca, nerilen tüm önlem yapıları için yeterlilik ve kapasite analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar doğrultusunda söz konusu yamaç için optimum ıslah yöntemleri aşağıdaki başlıklarda sıralanmıştır.

### **5.1. Andezitik Tüf Birimindeki ok Riskli Bloklara Kırım Uygulaması**

Jeolojik alıma kapsamında gerçekleştirilen hat etüdü, kinematik analizler, limit denge analizleri, Şev stabilite analizleri ile yamaç üzerinde yapılan gözlemsel incelemeler

ve riskli blok tespit çalışmaları sonucunda, farklı boyutlarda ve düşme riski taşıyan kaya blokları belirlenmiş olup, bu bulgular önceki bölümlerde detaylı şekilde sunulmuştur. Ortalama 5–6 m<sup>3</sup> hacmindeki riskli bloklar değerlendirme sürecinde esas alınmış; bu değer, sahada gözlemlenen çoğunluğu düşük hacimli blokların ortalamasını temsil etmektedir. Ancak, yamaç üzerinde 200–300 m<sup>3</sup> hacminde olan ve yüksek risk taşıyan daha büyük bloklar da mevcuttur. Bu büyük hacimli blokların önemli bir kısmı 1. derece risk grubunda yer almakta ve her an düşme potansiyeli taşımaktadır. Örneğin, Tablo 2.11 ve Şekil 153'te gösterilen 90 numaralı kaya bloğunun hacmi yaklaşık 45 m<sup>3</sup>, kütlesi ise 101,92 ton olarak belirlenmiş olup, bu bloğun düşmesi durumunda herhangi bir pasif koruma yapısı yeterli olmamaktadır.

Bu nedenle, büyük hacimli ve 1., 2. ve 3. derece risk grubundaki blokların kontrollü olarak kırılarak yamaçtan uzaklaştırılması gerekmektedir. Şekil 153'te, andezitik tüf biriminde kontrollü kaya kırım uygulaması önerilen bazı numaralandırılmış blokların görünüşleri ve Şekil 154'te ise riskli blokların bulunduğu alanların sınırları şematik olarak verilmiştir.

Arkeolojik sit alanlarında yapılacak kaya ıslahı uygulamalarında patlayıcı kullanımı büyük önem taşımaktadır. Dinamit gibi yüksek titreşim üreten patlayıcılar, alandaki tarihi kalıntılara zarar verebileceğinden dolayı uygun değildir. Bu nedenle, 1. derece arkeolojik sit alanlarında riskli blokların kırımı için yalnızca piroteknik sınıfa giren kaya kırıcı kartuşlar ya da kimyasal çatlatıcı tozlar kullanılmalıdır (Nasery vd., 2024a). Ayrıca, sit alanının statüsü ve riskli blokların düşme sonrası moloz hareketliliği dikkate alınarak tam kontrollü, sıçrama kontrollü ya da serbest kaya kırım yöntemlerinden uygun olanı seçilmelidir (Nasery vd., 2024a). Seçilecek kırım yöntemi yalnızca uygulama şeklini değil, çevredeki yapı ve tarihi eserlere etkisini ve aynı zamanda yapım maliyetini de doğrudan etkilemektedir.

Riskli blokların kırım işlemleri, tek seferde tüm bloğun kırılmasından ziyade aşamalı olarak gerçekleştirilmelidir. Bu yaklaşım, yamaç silüetinin korunması açısından da önemlidir. İlk kırım uygulamasının ardından, ortaya çıkabilecek yeni riskli bloklar uzman ekip tarafından yeniden değerlendirilerek gerekirse ek kırım işlemleri planlanmalıdır.



Şekil 153. Kontrollü kaya kırımı uygulaması kapsamında kırılarak yamaçtan uzaklaştırılacak riskli blokların görünüşleri



Şekil 154. Andezitik tüf biriminde bulunan kontrollü kırım uygulaması önerilen bölgelerin sınırları

## 5.2. Andezitik Tüf Bölgelerin Güçlendirilmiş Kombine Ağ ile Sabitlemesi

Çalışma alanının en üst kotunda yer alan andezitik tüf birimlerinde, süreksizliklere bağlı olarak düşme riski taşıyan çok sayıda kaya bloğu tespit edilmiştir. Yüksek riskli bloklar için kırım uygulamaları gerçekleştirildikten sonra, devrilme veya kayma riski taşıyan diğer blokların güçlendirilmiş kombine ağ sistemi ile sabitlemesi gerekmektedir. Tüm riskli bloklara doğrudan kırım uygulanması, yamaca aşırı müdahaleye neden olabileceği için bölgenin doğal silüeti olumsuz etkilenebilir. Bu nedenle, 3., 4. ve 5. derece risk grubundaki blokların güvenliğini sağlamak amacıyla ağla sabitleme yöntemi tercih edilmelidir.

Bu kapsamda, düşme potansiyeli bulunan blokların hareketini engellemek amacıyla öncelikle riskli alan, 6x8 veya 8x10 cm ebatlarında hegzagonal (baklava dilimli) ağ ile tamamen kaplanacaktır. Ardından, 8, 10, 12, 14 veya 16 mm çapında çelik halatlar kullanılarak yerinde örme ya da hazır fabrikasyon ağlarla güçlendirilmiş kombine ağ sistemi kurulacaktır. Güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitlenecek alanın şematik sınırları Şekil 155'te sunulmuştur.

Yamaçtaki riskli bloklar, yüzeye dik yerleştirilecek destekleme ankrajları ile sabitlenerek düşmeleri önlenecektir. Kombine ağ sistemi uygulanırken, çelik halatlara verilecek olan öngerme kuvvetinin bloklara zarar vermeyecek düzeyde olması önemlidir. İmalat sürecinde bu hususa dikkat edilmelidir.

Kırım uygulaması sonrasında yamacın yeniden değerlendirilmesi ile güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitleme uygulamasının kesin sınırları belirlenecektir. Önlem önerilerinin bu denli titizlikle belirlenmesinin temel nedeni, alanın 1. derece arkeolojik sit alanı olmasıdır. Bu nedenle hem bölgenin silüetinin korunması hem güvenliğin sağlanması hem de tarihi kalıntıların zarar görmemesi büyük önem taşımaktadır. Güçlendirilmiş kombine ağ sistemi ile sabitleme uygulamasında kullanılan çelik halatlar, birinci ve ikinci katman ağlar ile tepe, yüzey ve topuk ankrajlarının statik ve dinamik hesaplamaları yapıldıktan sonra boyutlandırılması gerekmektedir (Nasery ve Çelik, 2020).



Şekil 155. Andezitik tuf biriminde güçlendirilmiş kombine ağ uygulaması önerilen bölgeler

#### 5.4. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyer

Yapılan çalışmalar sonucunda, yamacın orta kesiminde yer alan dasitik breş ve alt kotlarda bulunan dasitik tuf birimlerinde ayrıışmış ve düşme riski taşıyan yüzlerce kaya bloğu tespit edilmiştir. Stabilite ve kinematik analiz sonuçları, bu bölgelerde kama tipi, devrilme tipi ve düzlemsel kayma tipi duraysızlıkların oluşma olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Nitekim, Şubat 2020 tarihinde meydana gelen bir kaya düşmesi olayı da bu durumu doğrulamaktadır. Söz konusu olayda, yaklaşık 10 ton ağırlığında bir kaya bloğu bu bölgeden koparak yamacın altına düşmüş ve aşağıda bulunan bir konutta ciddi hasara neden olmuştur. En önemli hususlardan biri ise, tüm bu risklere rağmen bölgede kaya oyma mekanlarının bulunması nedeniyle, aktif müdahale yöntemlerine (kaya kırımı, güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitleme vb.) Koruma Bölge Kurulu tarafından izin verilmemesidir. Bu nedenle, söz konusu riskin bertaraf edilmesi amacıyla, yamaç alt kotlarında kaya tutucu toprakarme bariyer inşası önerilmiştir. Şekil 156'de, bu

bariyerin planlandığı bölgeye ait şematik güzergah görünümü sunulmuştur. Bariyerin kesin yerleşimi, yapılacak yeterlilik ve kapasite analizlerinin ardından netleştirilecektir.

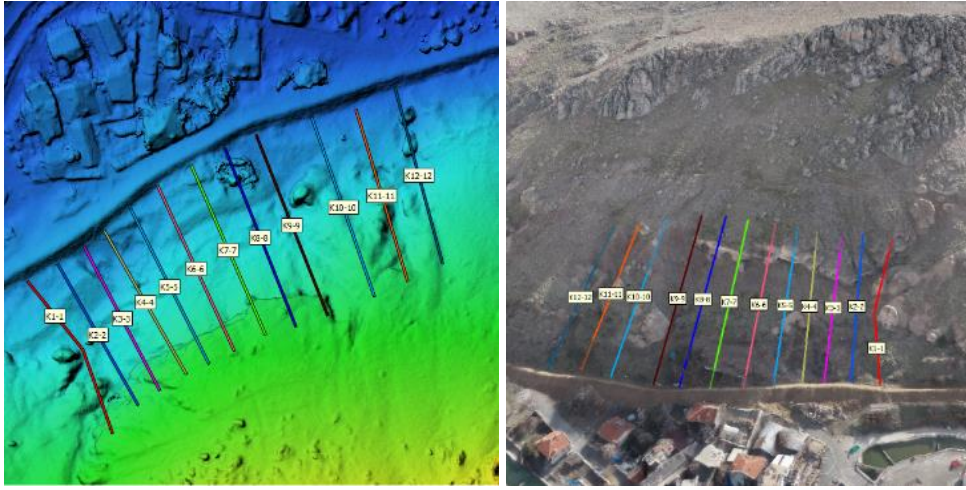


Şekil 156. Kaya tutucu toprakarme bariyerin 3D model üzerindeki şematik görünümü

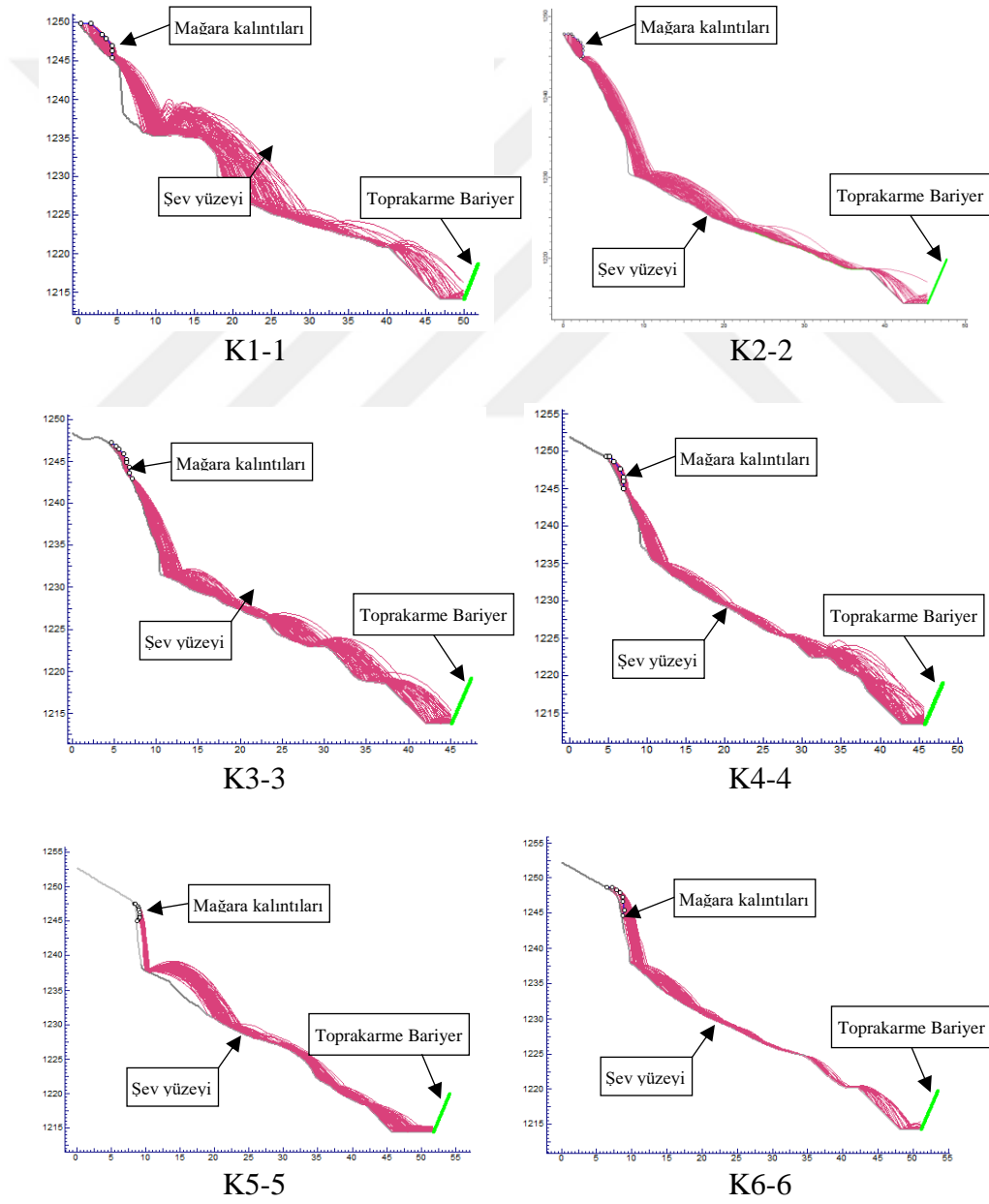
#### 5.4.1. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Yeterlilik Analizi

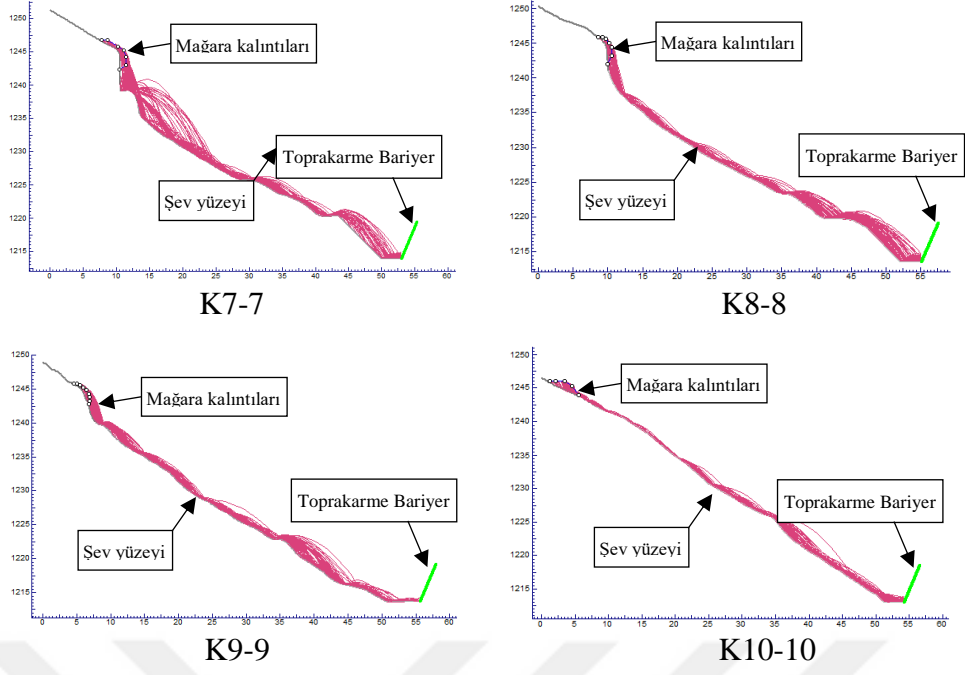
Arazi çalışmaları sırasında, dasitik breş biriminde düşme riski yüksek olan ve daha önce düşmüş kaya bloklarının ortalama hacminin yaklaşık  $9.35 \text{ m}^3$  olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan jeolojik raporda yer alan deney sonuçlarına göre, dasitik breş ve dasitik tüf kayaçlarının birim hacim ağırlığı en fazla  $1640 \text{ kg/m}^3$  olarak ölçülmüştür. Bu verilere dayanarak ve güvenli tarafta kalmak amacıyla,  $9.35 \text{ m}^3$  hacme ve yaklaşık  $15334 \text{ kg}$  ağırlığa sahip kaya blokları için düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Toplamda 12 kritik güzergah boyunca yapılan analizlerde, her bir güzergah için 100 farklı olasılık senaryosu dikkate alınmış ve böylece 1200 farklı kaya düşme senaryosu modellenmiştir (Şekil 157). Bu analizler sonucunda, kaya bloklarının sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerjisi ve ulaşabilecekleri maksimum hız değerleri hesaplanmıştır. 2D kaya düşme analiz sonuçları Şekil 158'de ve 3D analiz sonuçları ise Şekil 159-161'de verilmiştir. 12 güzergahın tamamı için bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri Tablo 20'de verilmiştir.

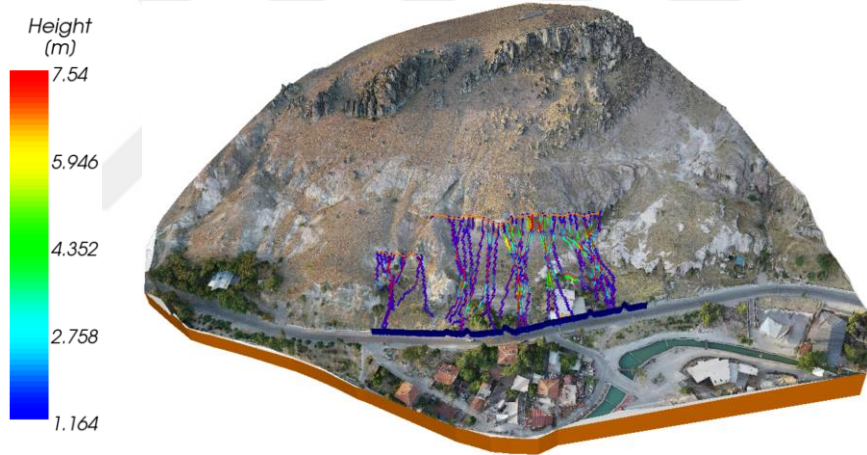


Şekil 157. 3D model üzerinde yamaçta belirlenen kritik kaya düşme güzergâhları

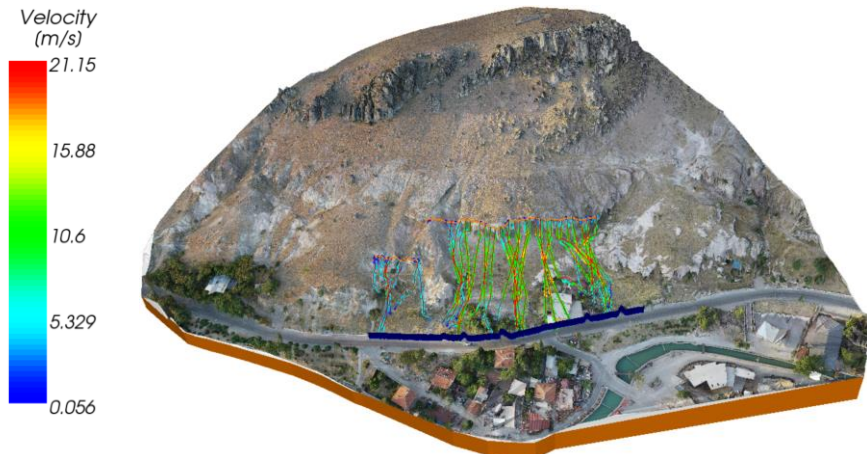




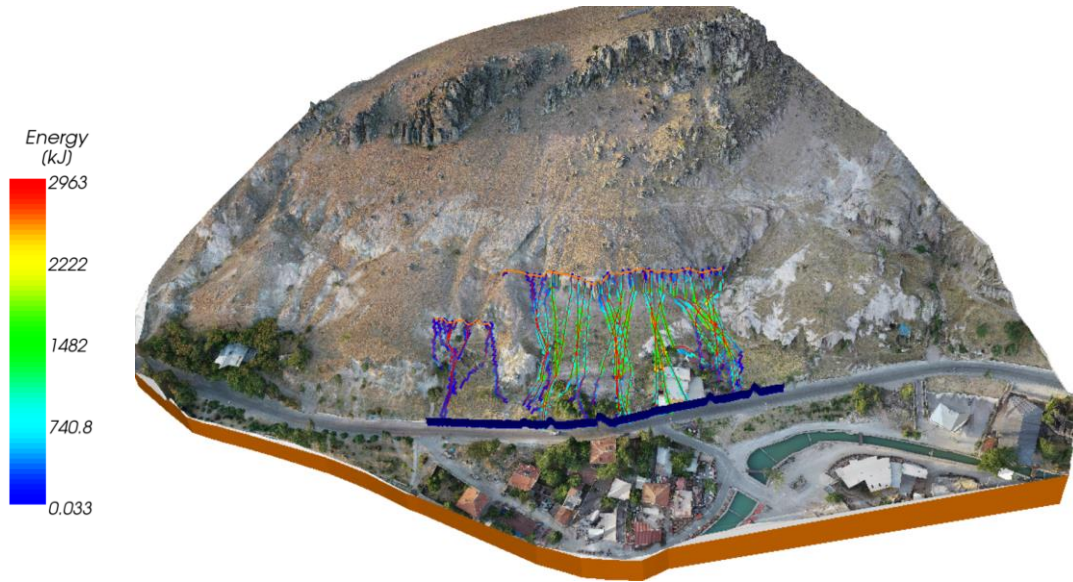
Şekil 158. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizi ile hesaplanan düşme senaryoları



Şekil 159. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 160. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen yatay hız değerleri



Şekil 161. Kaya tutucu toprakarme bariyerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen toplam kinetik enerji değerleri

Yapılan kaya düşme analizleri incelendiğinde, mağaraların üst bölümü çoğunlukla 80-90 dereceye yakın bir eğime sahip yamaçlardan oluşmaktadır. Bu yamaçlardan düşen kayalarda maksimum sıçrama yüksekliği dik bölgelerde 8-10m mertebelerine ulaşılabilen simule edilmiştir. Fakat sözkonusu sıçramalar şekillerden de görüldüğü gibi kaya tutucu toprakarme bariyerine yakın bölgelerde en fazla 3-4 metre yüksekliğine ulaşılabilen ihtimali mevcuttur. Ayrıca analiz detaylarına bakıldığında düşen kaya blokların %93'ü kaya tutucu toprakarme bariyerine kadar rahatlıkla ulaşabilmekte ve yol güvenliğini tehdit etmektedir. Elde edilen hız değerlerine bakıldığında yola ulaşan kaya blokların hız değerleri alttaki yapıların ve yoldan geçen araçların güvenliğini tehdit edecek boyuttadır. Dolayısıyla, belirlenen güzergaha 5.25m yüksekliğine sahip kaya tutucu toprakarme bariyerin yapılması durumunda yükseklik olarak yeterli olacağı ortaya çıkmıştır.

Kaya düşmesi sırasında maksimum hız değeri 1-1 kesitinde 18.38 m/sn değerine ulaşmış ve bu hız değeri kaya tutucu toprakarme bariyeri gibi pasif koruma yapılarının yapılmasına müsait bir hız değeridir. Maksimum kinetik enerji değeri de 15334 kg'lık kaya bloğu için 2805.32 kJ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler doğrultusunda yola yakın ve arkasındaki kaya toplanma alanının genişliği minimum boyuta göre tasarlanan kaya tutucu toprakarme bariyeri söz konusu bölgenin kaya düşme riskini bertaraf etmektedir. Kaya tutucu toprakarme bariyeri kaya düşme analizlerinde ana kayaya oturtularak analiz edilmiştir. Dolayısıyla, stabilite probleminin olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde bariyerin stabilitesinde problemler ortaya çıkacak ve yapısal görevini yerine getiremeyecektir.

Tablo 20. 12 güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri.

Kesit No:		1-1	2-2	3-3	4-4
15334 kg'lık kaya bloğu	Toprakarme bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	3.32	3.12	2.68	2.95
	Maksimum hız (m/sn)	18.38	18.16	17.49	18.15
	Toplam kinetik enerji (kJ)	2805.32	2551.17	2403.20	2762.63
Kesit No:		5-5	6-6	7-7	8-8
15334 kg'lık kaya bloğu	Toprakarme bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	3.07	2.68	4.03	2.29
	Maksimum hız (m/sn)	16.33	15.36	16.59	14.69
	Toplam kinetik enerji (kJ)	2146.50	1809.02	2166.23	1909.63
Kesit No:		9-9	10-10	11-11	12-12
15334 kg'lık kaya bloğu	Toprakarme bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	1.45	1.46	1.59	2.34
	Maksimum hız (m/sn)	14.56	15.58	13.89	14.64
	Toplam kinetik enerji (kJ)	1804.17	2193.38	1693.59	1811.16

#### 5.4.2. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Kapasite Analizi

Kaya düşme analizleri incelendiğinde, 5.25 m yüksekliğindeki kaya tutucu toprakarme bariyeri aşan herhangi bir kaya bloğuna rastlanmamıştır. Elde edilen sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri dikkate alınarak bariyerin boyutlandırılması yapılmıştır. Analizlerde, güzergâhtaki konumlara göre 5.25 m yüksekliğinde kaya tutucu toprakarme bariyerler yerleştirilmiş ve bu kesitler üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

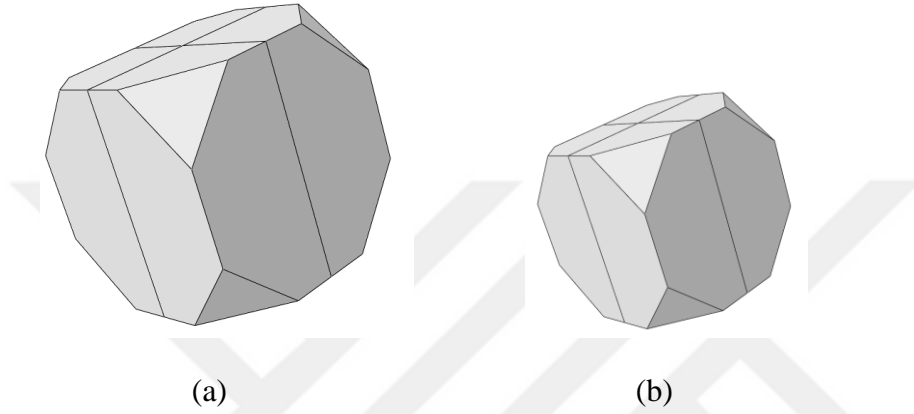
Bariyerin enkesitinde oluşan gerilmeler ve çarpma anındaki şekildeğişmeler değerlendirilerek boyutlandırma yapılmıştır. Bu kapsamda, 5.25 m yüksekliğindeki bariyerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Dinamik darbe etkileri dikkate alınarak yapılan sonlu eleman analizleri ile kapasite ve boyut tahkikleri yapılmış, kullanılan malzeme özellikleri ve yük kabulleri açıklanmıştır.

##### 5.4.2.1. Kaya Tutucu Toprakarme Bariyerin Sonlu Eleman Modeli

Bu bölümde gerilme analizleri ve boyutlandırması yapılacak kaya tutucu toprakarme bariyerin sonlu elemanlar paket programında modellenmesi için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 21'de verilmiştir. Analiz kapsamında kaya parçasını temsil eden ve literatürde yaygın olarak kullanılan blok geometrisi Şekil 162'de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan farklı hacimlerdeki kaya blokları aynı geometriye sahiptir; yalnızca hacme bağlı olarak kenar uzunlukları değişmektedir.

Tablo 21. Toprakarme bariyeri için sonlu eleman modellemesinde kullanılan malzeme özellikleri ( Ronco vd., 2009).

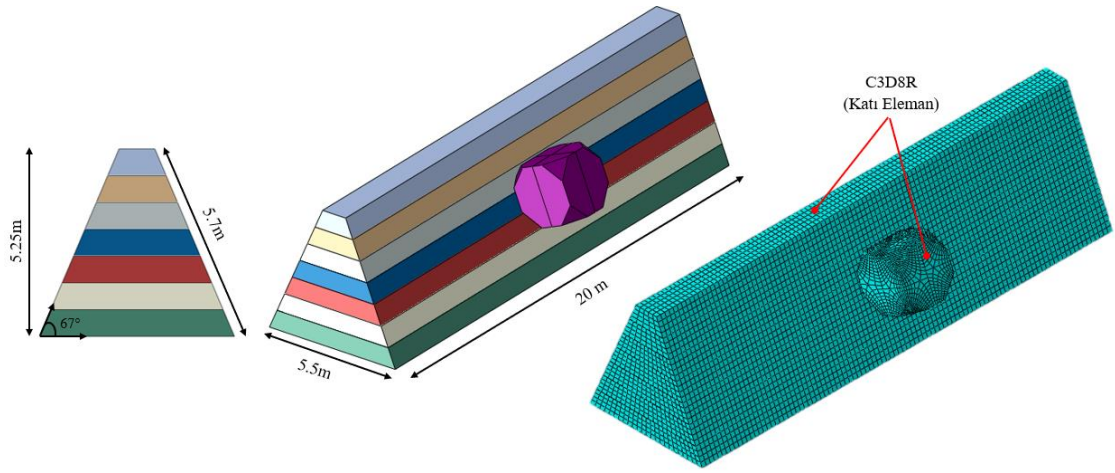
Geoteknik Parametreler	Modelde Kullanılan Özellikler
Birim hacim ağırlığı [kN/m <sup>3</sup> ]	21
Young elastisite modeli [kPa]	110000
Poisson oranı [-]	0.25
İçsel sürtünme açısı [°]	34
İçsel kohezyon [°]	0
Akış gerilme oranı [-](akma gerilmesinin)	0.78
Dilation açısı [°]	0
Akma gerilmesi [kPa]	540



Şekil 162. (a) 11.2m<sup>3</sup> ve (b) ise 7m<sup>3</sup>'lük kaya parçasını temsile edecek blok geometrisi

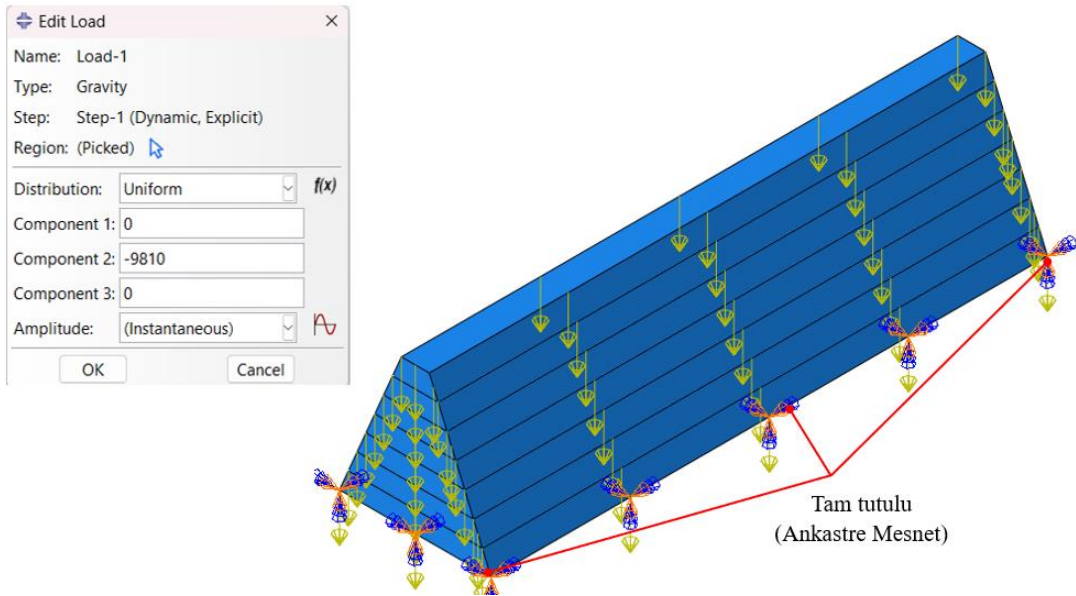
Kaya tutucu toprakarme bariyerin imalatı kademeli şekilde gerçekleştirildiğinden, gerçek uygulamayı idealize edebilmek amacıyla sonlu eleman modelleri de tabakalı olarak oluşturulmuştur. Uygulamada tabaka kalınlıkları 0.50–1.25 m arasında değişmekte olup, analiz süresini kısaltmak amacıyla bu değer 0.75 m olarak, güvenli tarafta kalacak şekilde modellenmiştir.

Tabakalar arası bağlantılar sıkışmış topraktan oluştuğu ve gabion telleri içe doğru büküldüğü için tam bağlı (tie) kabul edilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar analizinde ağ sıklığının (mesh) yeterliliğini değerlendirmek amacıyla yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Modelin büyüklüğü göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucunda en uygun eleman boyutunun 200×200 mm olduğu belirlenmiş ve analizlerde C3D8R katı eleman tipi kullanılmıştır(Şekil 163). Darbe analizlerinde kaya tutucu toprakarme bariyerin toplam uzunluğu 20m olacak şekilde modellenmiştir.



Şekil 163. Toprakarme duvarın tabakalı sonlu eleman modelinin enkesit, 3D görüntüsü ve ağırlıklığı (Mesh)

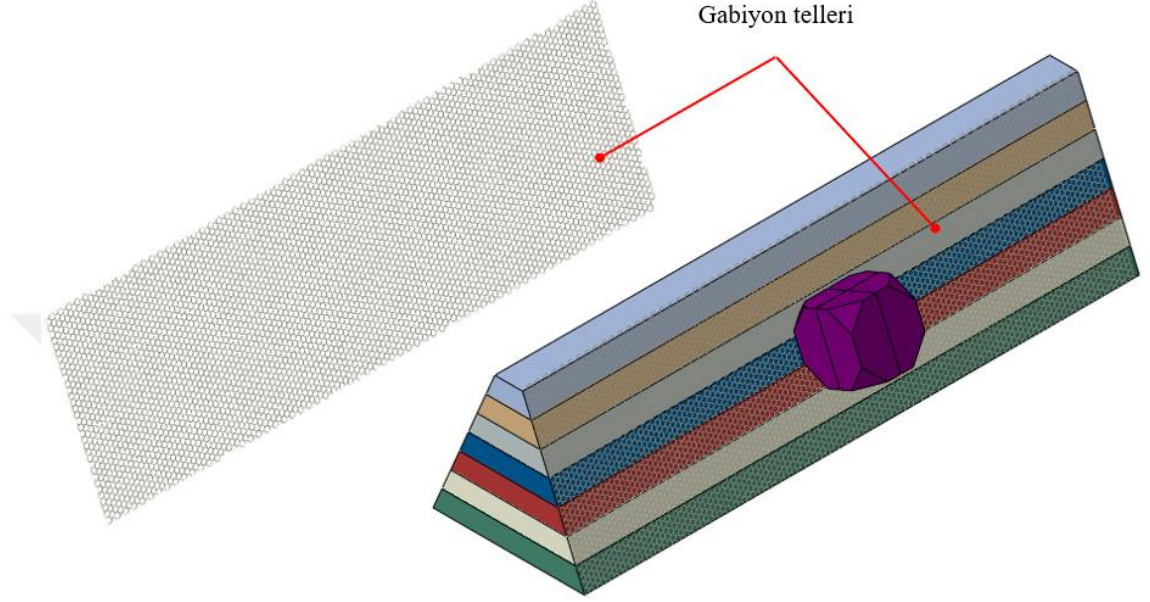
Kaya tutucu toprakarme bariyerin temel mantığı, ağırlık tip dayama yapısı olmasıdır. Bu nedenle, sonlu eleman modellerine yerçekimi ivmesi tanımlanarak, duvarın kendi ağırlığının analizlerde dikkate alınması sağlanmıştır (Şekil 164). Ayrıca, toprakarme bariyerin en az 25 cm derinliğe gömülmesi, zeminle olan etkileşimini artırmakta ve ankastre mesnet koşullarının sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, yapının dış yükler karşısında daha rijit ve stabil davranmasını mümkün kılmaktadır. Bu nedenle yapılan analizlerde mesnet tipi ankastre olarak kabul edilmiştir.



Şekil 164. Sonlu eleman modellerine yer çekim ivmesinin tanımlanması (mm/s) ve sınır şartlarının uygulanması

İlk etapta bariyerin ön yüzeyindeki gabion telleri de sonlu eleman modeline tanımlanmış ve çarpma etkisi üzerindeki rolü detaylı bir şekilde incelenmiştir (Şekil 165).

Ancak yapılan analizler sonucunda gabiyon tellerinin yapısal davranış üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı ve esas olarak toprağın stabilizasyonunu sağlamak amacıyla kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, güvenli tarafta kalmak ve analiz sürecini daha verimli hale getirmek amacıyla sonraki aşamalarda gabiyon tellerinin etkisi ihmal edilmiştir.



Şekil 165. Gabiyon telli sonlu eleman modeli

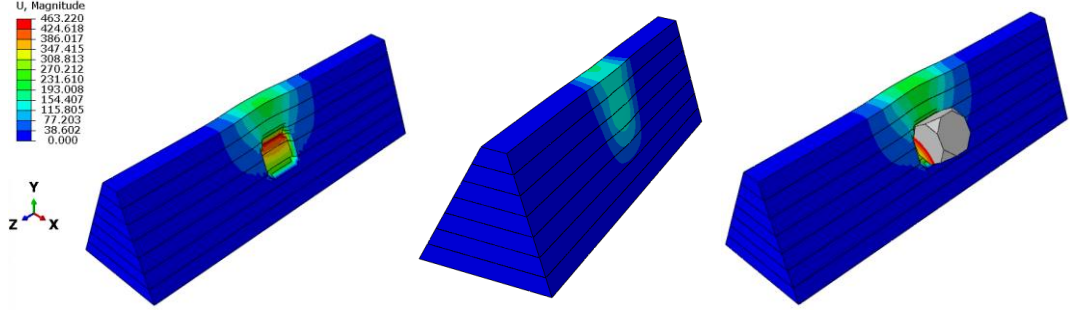
Yapılan analizler kaya düşme sırasında duvara çarpmadan önceki enerjiler dikkate alınarak yapılmıştır.

#### 5.4.2.2. (E=3000 kJ) Enerjiye Göre Bariyerin Analiz ve Boyutlandırılması

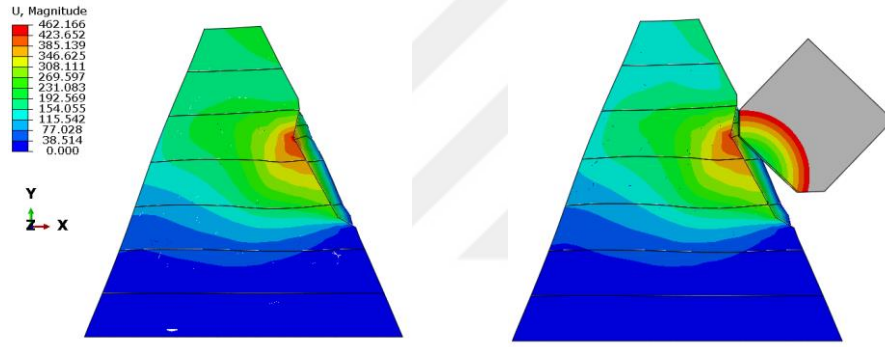
Yapılan kaya düşme analizi sonuçlarına göre, 1-1 kesitinde maksimum hız değeri 18.38 m/sn olarak hesaplanmıştır. Aynı kesitte, 15.334 kg kütleyle sahip bir kaya bloğu için hesaplanan maksimum kinetik enerji değeri ise 2805.32 kJ'dir. Bu enerjinin toprakarme bariyer tarafından güvenli bir şekilde sönmülenip sönmülenemediği, başka bir deyişle ön boyutlandırma sonucu belirlenen kesitlerin yeterliliği tahkik edilmiştir.

Bu kapsamda, seçilen kesitlerin servis enerji düzeyi ve maksimum enerji tüketme kapasitesini belirlemek amacıyla 3000 kJ çarpma enerjine sahip bir blok, bariyere çarptırılarak sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğrusal olmayan darbe analizi sonucunda elde edilen yer değiştirme kontur diyagramları Şekil 166 ve Şekil 167'de sunulmuştur. Ayrıca, çarpma anında oluşan maksimum Von Mises gerilme değerleri Şekil 168 ve 169'de verilmiştir. Son olarak, darbe analizi sırasında, bariyerin mesnetlerinde oluşan yük-zaman eğrisi Şekil 170'te, bariyer tarafından tüketilen toplam

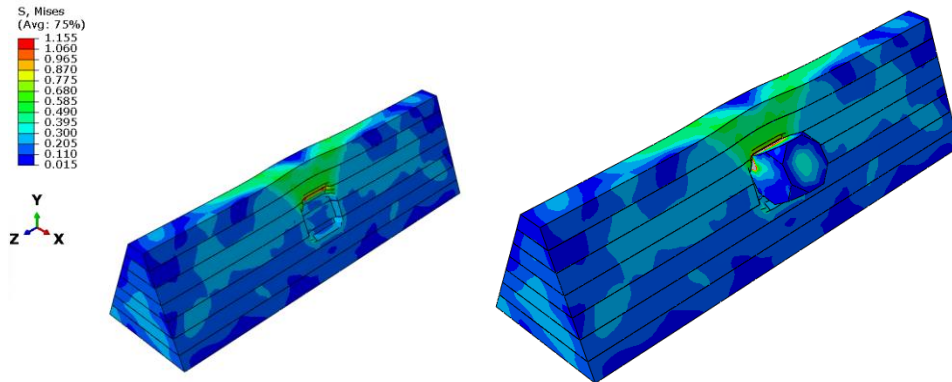
enerji ise Şekil 171’de gösterilmiştir. Yapılan analiz sonucu bariyerin çarptığı bölgenin dış tarafında oluşan en büyük yerdeğiştirme miktarı 463.2mm ve en büyük gerilme ise 1.16MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 171'den da görüldüğü gibi enerjinin %92 oranı bariyer tarafından sönmülmüştür.



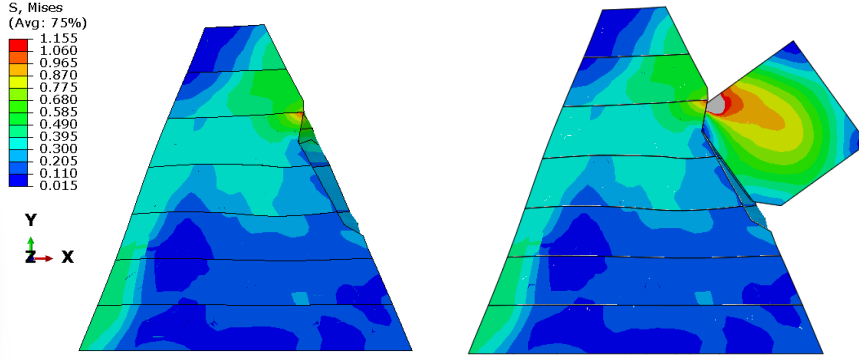
Şekil 166. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan yer değiştirme diyagramları (mm)



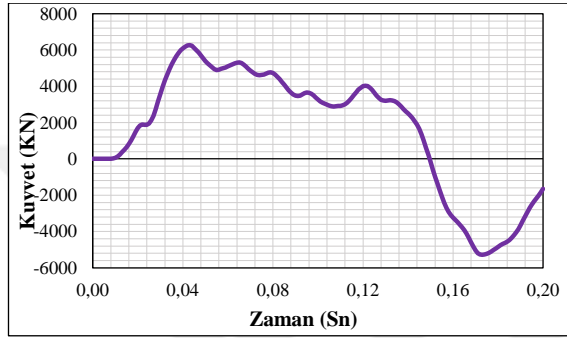
Şekil 167. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan yer değiştirme diyagramları (mm)



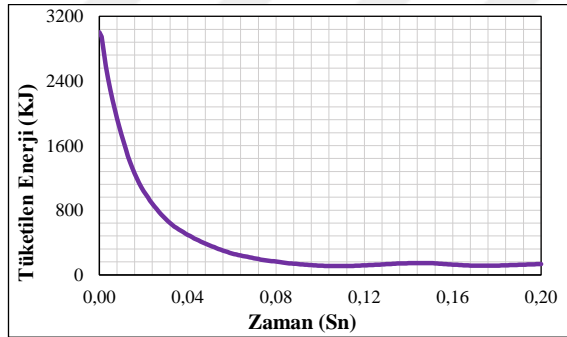
Şekil 168. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan gerilme dağılımları (MPa)



Şekil 169. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan gerilme dağılımları (MPa)



Şekil 170. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu mesnette oluşan yük-zaman eğrisi

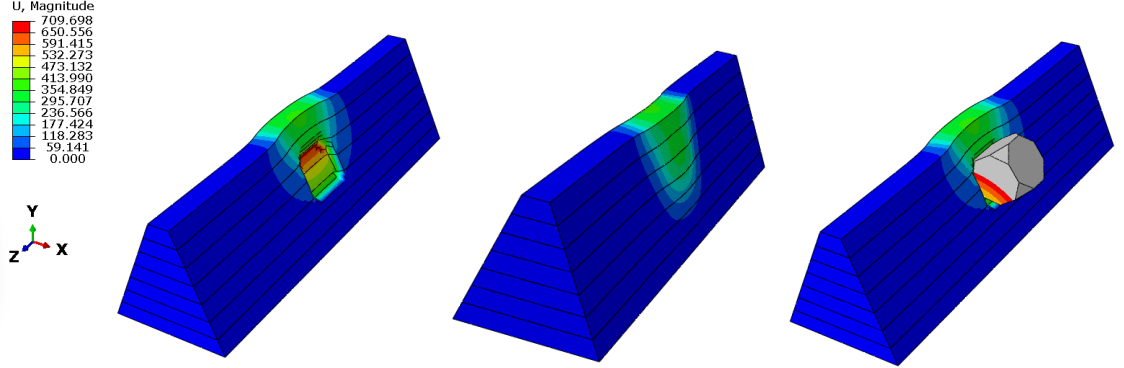


Şekil 171. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyer tarafından zamana bağlı-tüketilen kinetik enerji miktarı

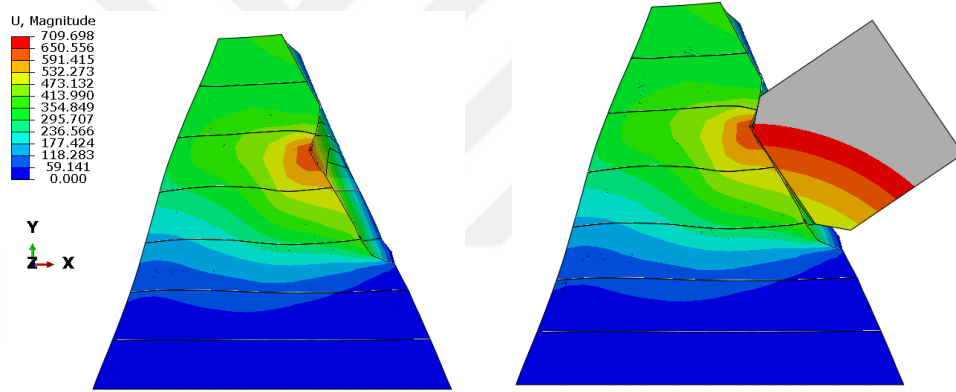
#### 5.4.2.3. (E=5000 kJ) Enerjiye Göre Bariyerin Analiz ve Boyutlandırılması

Kaya tutucu toprakarme bariyerin kapasite analizleri kapsamında, ikinci aşamada 5000 kJ çarpma enerjisine sahip bir blok bariyere çarptırılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğrusal olmayan darbe analizi sonucunda elde edilen yer değiştirme kontur diyagramları Şekil 172 ve Şekil 173'te sunulmuştur. Ayrıca, çarpma anında oluşan maksimum Von Mises gerilme değerleri Şekil 174 ve 175'te verilmiştir. Son olarak, darbe analizi sırasında, bariyerin mesnetlerinde oluşan yük-zaman eğrisi Şekil 176'da, bariyer tarafından tüketilen toplam enerji ise Şekil 177'de gösterilmiştir. Yapılan

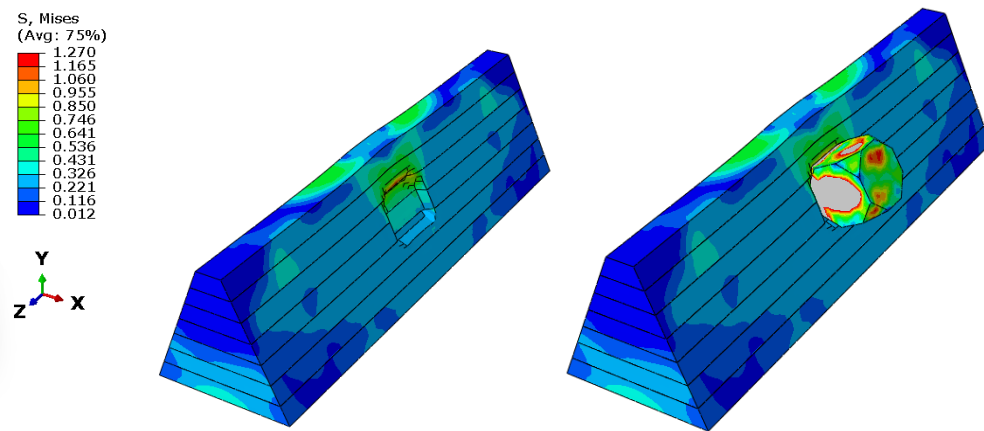
analiz sonucu bariyerin çarptığı bölgenin dış tarafında oluşan en büyük yerdeğiştirme miktarı 710mm ve en büyük gerilme ise 1.27MPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 177'den de görüldüğü gibi enerjinin %98 oranı bariyer tarafından sönmülmüştür.



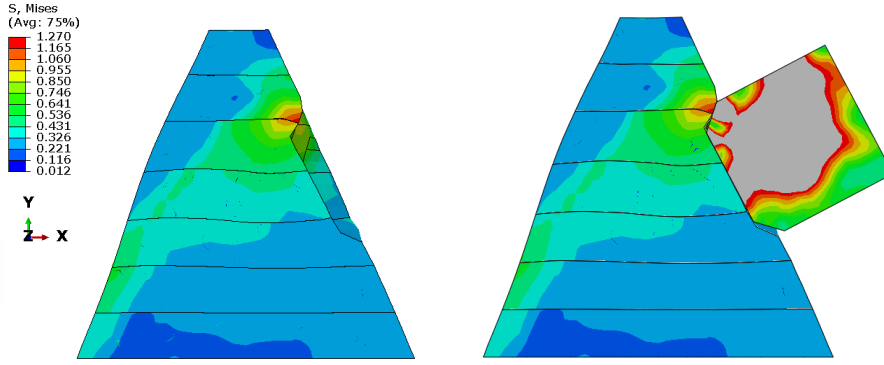
Şekil 172. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyerde, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan yer değiştirme diyagramları (mm)



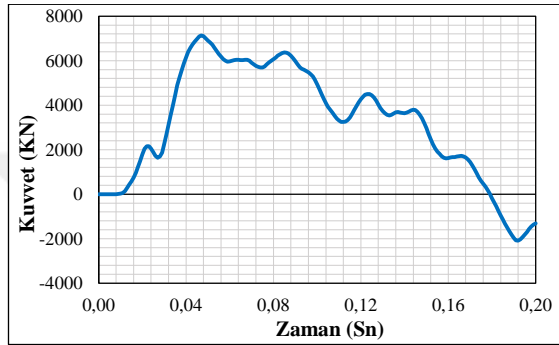
Şekil 173. 5.25m 5.25 m yüksekliğe sahip toprakarme bariyerde, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan yer değiştirme diyagramları (mm)



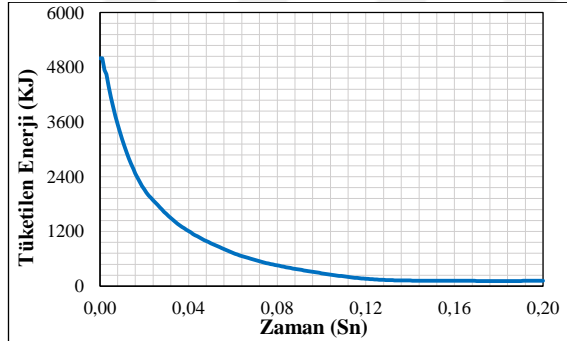
Şekil 174. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyerde, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyerde oluşan gerilme dağılımları (MPa)



Şekil 175. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu enkesitte oluşan gerilme dağılımları (MPa)



Şekil 176. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 5000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu mesnette oluşan yük-zaman eğrisi



Şekil 177. 5.25m yüksekliğe sahip toprakarme bariyere, 3000 kJ enerjiye sahip kaya bloğunun çarpması sonucu bariyer tarafından zamana bağlı-tüketilen kinetik enerji miktarı

Kaya tutucu toprakarme bariyerlerin boyutlandırma kriteri olarak gerilme değil kayanın çarptığı yüzeyin dış taraftaki yer değiştirmesi kabul edilmiştir. Literatürde boyutlandırma yapılırken kayanın dış yüzeyindeki yerdeğiştirme miktarı tepe genişliğinden fazla olduğu durumda kesitin yetersiz olduğu öne sürülmüştür (Ronco vd., 2009).

Buna göre; tepe genişliği 100 cm, yüksekliği 5.25 m ve 67° açıyla aşağıya doğru genişleyen duvarın, 3000 kJ kinetik enerjiye sahip bir çarpmada lokal onarım gerektiren hasar alması beklenmektedir. 5000 kJ kinetik enerjiye sahip bir çarpma durumunda ise

bariyer kaya bloğunu durdurabilmekte, ancak en kritik senaryoda bölgesel onarım gerekebilmektedir. Bu analizlerde en kritik durum, çarpan yüzey alanının 1 m<sup>2</sup> olarak kabul edilmesiyle temsil edilmiştir. Ancak gerçekte bu çarpma koşullarının oluşma olasılığı oldukça düşüktür.

Literatür incelemelerine göre, tepe genişliği 1 m olan ve 67° açıyla genişleyen kaya tutucu toprakarme bariyerlerin, göçme meydana gelmeden önce maksimum enerji sönümleme kapasiteleri 7500–10000 kJ arasında değişmektedir. Bu nedenle, dasitik breş ve dasitik tüf birimlerinin bulunduğu bölgelerde, en büyük hacimli blokların düşmesi durumunda dahi, 5.25 m yüksekliğe ve 1 m tepe genişliğine sahip kaya tutucu toprakarme bariyer kesitinin yeterli olacağı öngörülmektedir.

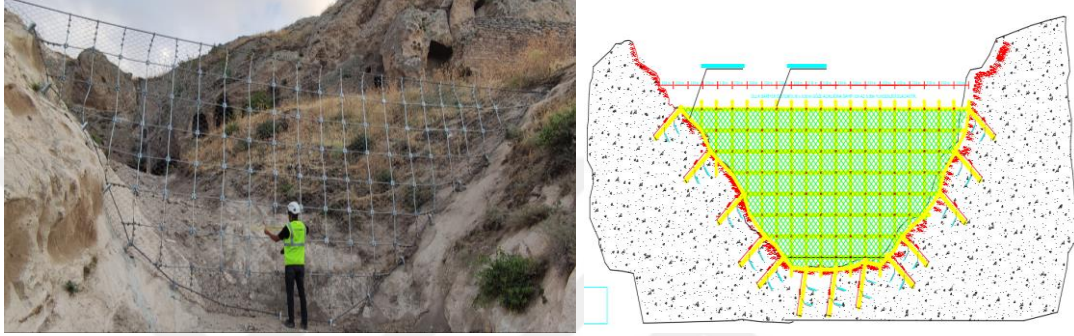
### **5.5. Oluk Bariyerlerin Yapılması**

Kaya düşme analizlerinden de görüldüğü üzere, yamaç kenarlarından kopan blokların büyük bir kısmı vadilerin orta kısımlarından aşağıya doğru hareket etmektedir. Bu bloklar, vadiler boyunca hız kazanarak belirli bir sıçrama yüksekliği, hız ve kinetik enerjiyle yamacın eteklerine kadar ulaşmaktadır. Ayrıca ani yağışlar sırasında, söz konusu vadilerden su ile birlikte kaya blokları ve molozlar da taşınmaktadır. Bu nedenle, düşen blokları engellemek amacıyla her iki vadinin en dar kesimlerinde, Şekil 178’de şematik olarak gösterilen bölgelere en az 4 m yüksekliğinde oluk bariyerler inşa edilmelidir. Bu bariyerler, aşırı yağışlar sırasında düşen blokları durdururken, yağmur sularının geçişine de olanak sağlamaktadır.

Oluk bariyerler, sabit koruma yapıları olduklarından ve yamaç geometrisine bağlı olarak yerinde imal edildiklerinden, ankrajları yamacın her iki yakasında ve varsa tabanında da sağlam kaya kütlelerine yerleştirilecektir. Bu bariyerlerin yeterlilik analizleri bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alınmıştır. Oluk bariyerlerin temel amacı, düşen küçük ve orta büyüklükteki kaya bloklarının tamamını durdurmaktır. En kritik durumlarda bariyer hasar görüp kopsa dahi, düşen bloğun hızını azaltarak yamacın alt kesimlerine ulaşmaması hedeflenmektedir. Şekil 179’da örnek bir oluk bariyerin görünümü ile şematik tip çizimi sunulmuştur.



Şekil 178. Oluk Bariyer yapılacak bölgelerin şematik görünümü



Şekil 179. Oluk Bariyer örnek görünümü ve tip çizimi

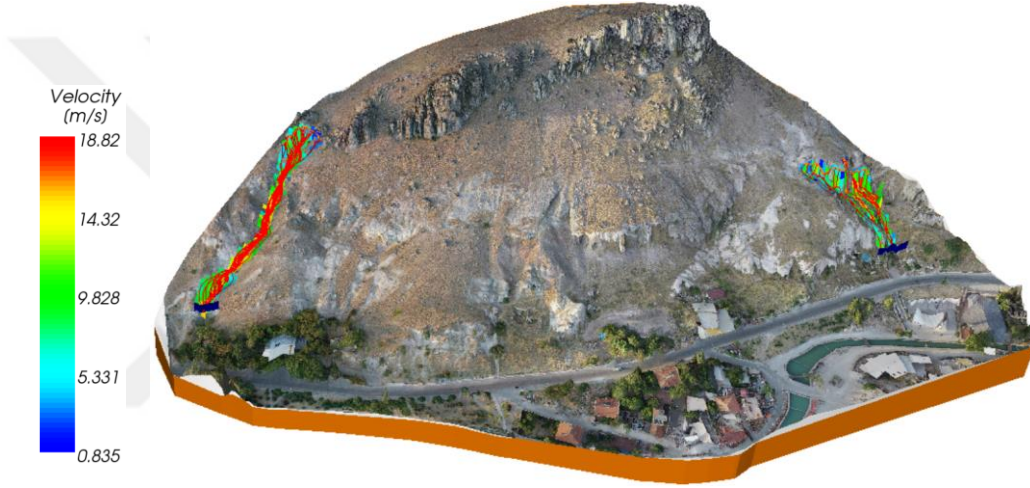
### 5.5.1. Oluk Bariyerlerin Yeterlilik Analizi

Yapılan 2D ve 3D kaya düşme analizlerinin sonuçları incelendiğinde, düşen blokların büyük çoğunluğunun vadiler boyunca aşağıya doğru hareket ettiği görülmektedir. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere, vadilerin en dar kesimlerinde ve her iki yamacında sağlam kaya bulunan bölgelere oluk bariyerlerin yerleştirilmesi önerilmiştir. Bariyerlerin yüksekliğinin ve yerleştirileceği bölgelerin belirlenebilmesi amacıyla 3D kaya düşme analizleri tekrar gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, vadiler boyunca yapılan 3D kaya düşme analizleri kapsamında duyarlılık (sensitivite) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, düşen blokların yoğun olarak toplandığı bölgeler tespit edilmiş ve bu verilere dayanarak oluk bariyerlerin yüksekliği ile yerleşim bölgeleri belirlenmiştir.

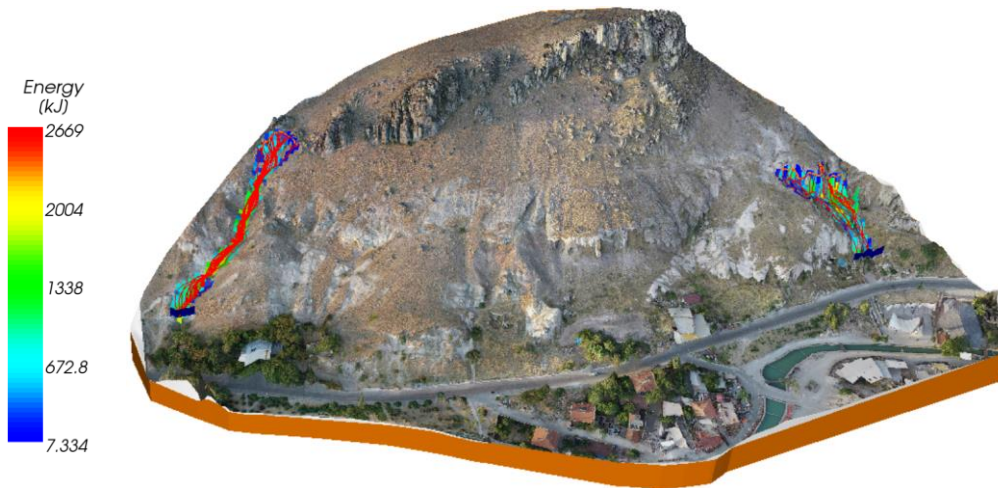
Ardından, Şekil 180’de gösterildiği üzere, ilgili kesitlere önerilen oluk bariyerler yerleştirilmiş ve 3D kaya düşme analizleri tekrar edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Şekil 180 ile Şekil 182 arasında sunulmuştur. Sonuçlara göre, 4 m yüksekliğe sahip ve belirlenen noktalara yerleştirilecek oluk bariyerlerin düşen blokların tamamını başarıyla durdurabildiği görülmüştür. Bu durum, bariyer konumlarının doğru belirlendiğini ve yüksekliği bakımından da yeterlilik kriterlerini karşıladığını göstermektedir.



Şekil 180. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 181. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen hız değerleri

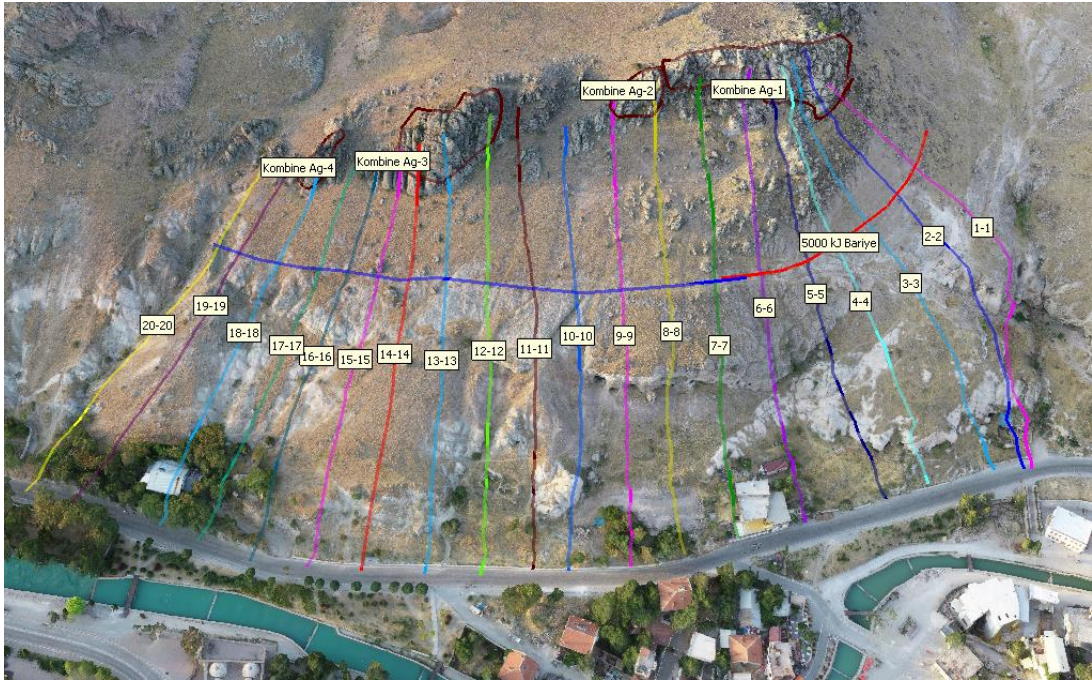


Şekil 182. Oluk bariyerlerin yerleştirilmesi sonrasında yapılan 3D kaya düşme analizi ile elde edilen toplam kinetik enerji değerleri

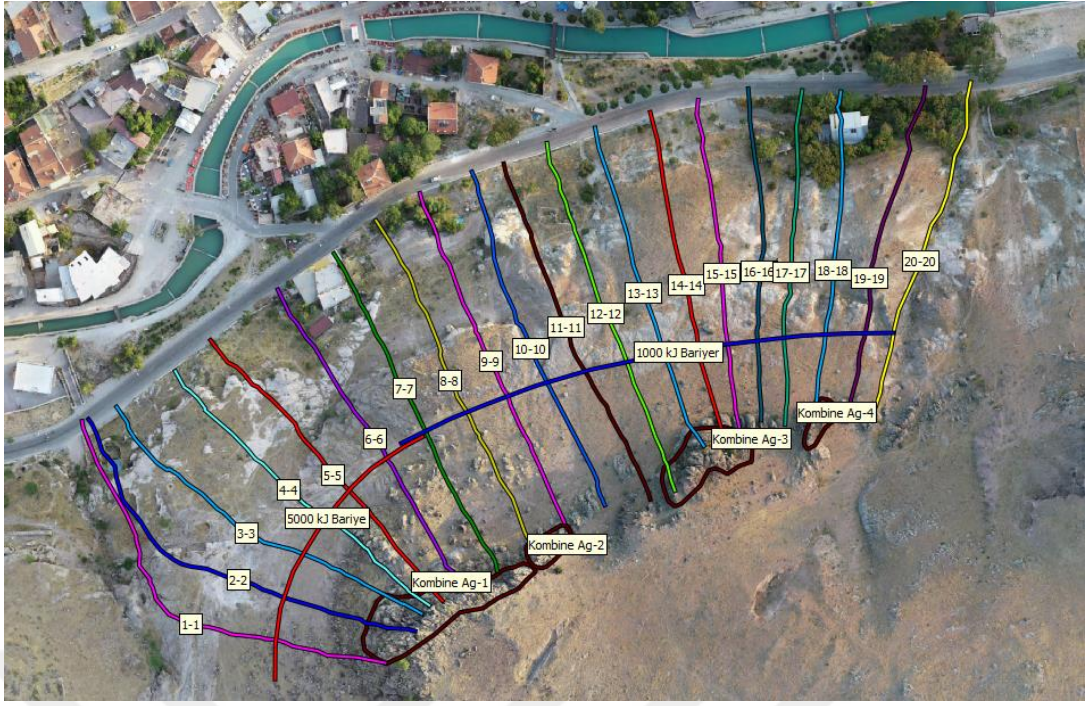
## 5.6. Enerji Sönümleyici Bariyerin Boyutlandırılması

Daha önceki bölümlerde, büyük hacimli ve yüksek risk taşıyan bloklar için kontrollü kaya kırım uygulaması önerilmiş; kama ve devrilme tipi duraysızlığa sahip büyük hacimli bloklar için ise güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitleme önerilmiştir. Ancak, yamacın üst kotlarında ve andezitik tüf birimlerinin bulunduğu bölgelerde, farklı boyutlarda çok sayıda riskli blok tespit edilmiştir.

Bu nedenle, yamacın ortalama riskli blok boyutuna göre yapılan ön analizler doğrultusunda, yamacın orta kesiminden düşen blokların aşırı hız kazanmasını engellemek ve alt kotlardaki oyma mekânlara zarar vermesini önlemek amacıyla, andezitik tüf birimin alt kotuna çelik enerji sönümleyici bariyer yerleştirilmesi önerilmektedir. Şekil 183 ve 184'te enerji sönümleyici bariyerlerin önerildiği güzergahlar ve arazideki kesit hatları şematik olarak gösterilmiştir. Buradan da görülebileceği üzere, 1. Bölgede ortalama riskli blok boyutunun daha büyük olması nedeniyle 5000 kJ kapasiteli, diğer bölgelerde ise ortalama riskli blok boyutunun daha küçük olması nedeniyle 1000 kJ enerji sönümle kapasiteli bariyerlerin kullanılması önerilmiştir.



Şekil 183. Enerji sönümleyici çelik bariyerin ve kesitlerin 3D model üzerindeki şematik görünümü



Şekil 184. Enerji sönmüleyici çelik bariyerin ve kritik kesitlerin ortofoto üzerindeki görünümü

### 5.6.1. 5000 kJ Kapasiteli Enerji Sönmüleyici Bariyerin Yeterlilik Analizi

Önceki bölümde, enerji sönmüleyici bariyerlerin ön boyutlandırması yapılmış ve yerleştirilecek güzergahlar belirlenmiştir. Bu bölümde, söz konusu bölgenin uygunluğunu değerlendirmek amacıyla, en kritik kesitler olan 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5 ve 6-6 güzergâhlarına çelik bariyerler yerleştirilerek kaya düşme analizleri yeniden gerçekleştirilmiştir.

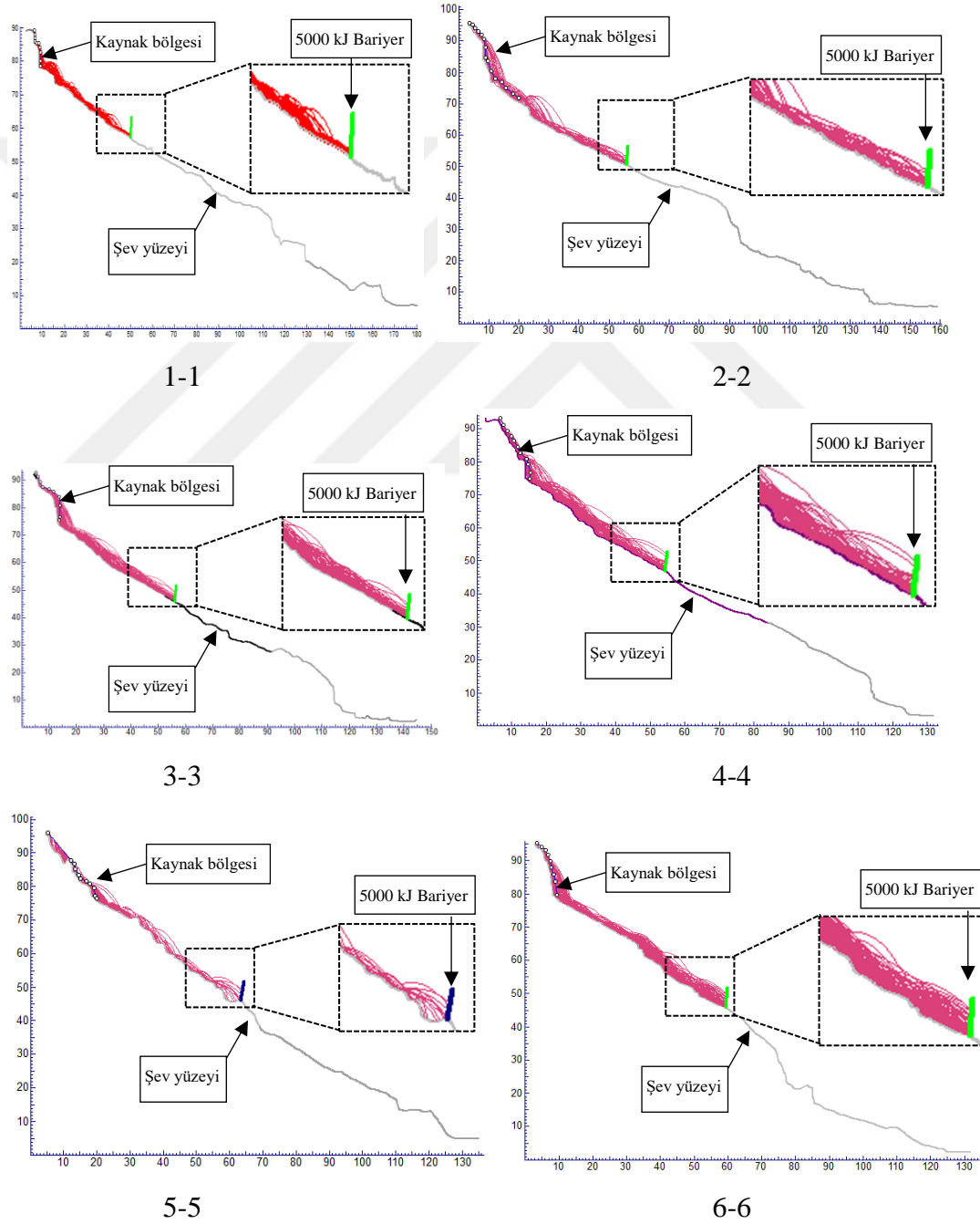
Bu kapsamda, 5000 kJ kapasiteli enerji sönmüleyici bariyerin detaylı boyutlandırması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan jeolojik rapora göre, bölgedeki kayaların birim hacim ağırlığı ortalama  $2265 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmak amacıyla bu değer %10 artırılarak,  $6.6 \text{ m}^3$  hacme ve yaklaşık  $15.000 \text{ kg}$  kütleye sahip kaya blokları için düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Altı kritik güzergah boyunca yapılan analizlerde, kaya bloklarının sıçrama yüksekliği, toplam kinetik enerji ve maksimum hız değerleri her bir kesit için 100 farklı olasılık senaryosuyla çözülmüş; toplamda 600 farklı kaya düşme analizi yapılmıştır. 2D kaya düşme analizlerinin detayları Şekil 185'te verilmiş olup, altı güzergahın tamamı için elde edilen maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve enerji değerleri Tablo 22'de sunulmuştur.

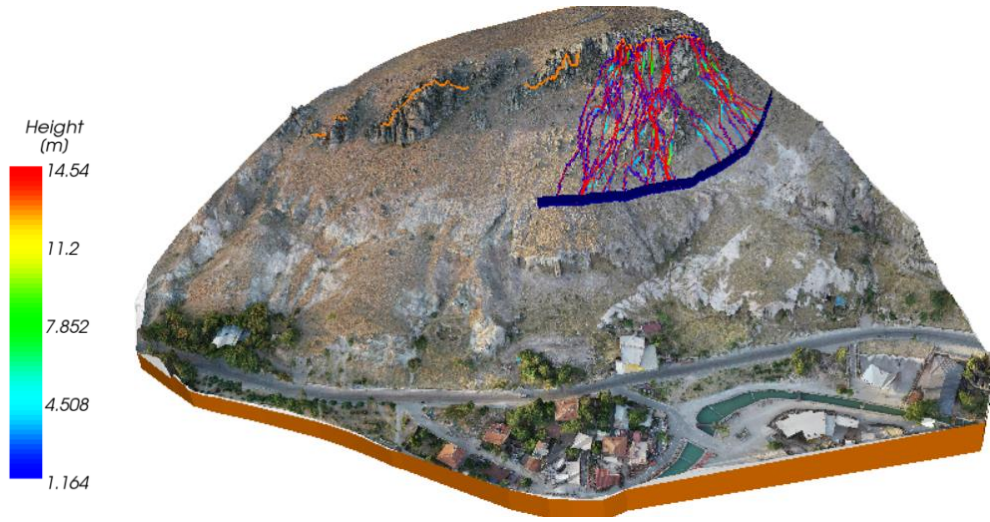
Ayrıca, 3D kaya düşme analiz modeline 5000 kJ maksimum enerji sönmüleme kapasitesine sahip bariyer yerleştirilmiş ve analizler tekrar edilmiştir. 3D analiz sonuçları Şekil 186 ile 188 arasında verilmiştir. Yapılan analizlere göre, en büyük sıçrama

yüksekliği 4.59 m ve en büyük kinetik enerji 3389.67 kJ olarak 6-6 kesitinde hesaplanmıştır. Bu verilere göre, 6 m yüksekliğe ve 5000 kJ enerji sönmleme kapasitesine sahip çelik bariyer, ilgili bölge için yeterli görülmektedir.

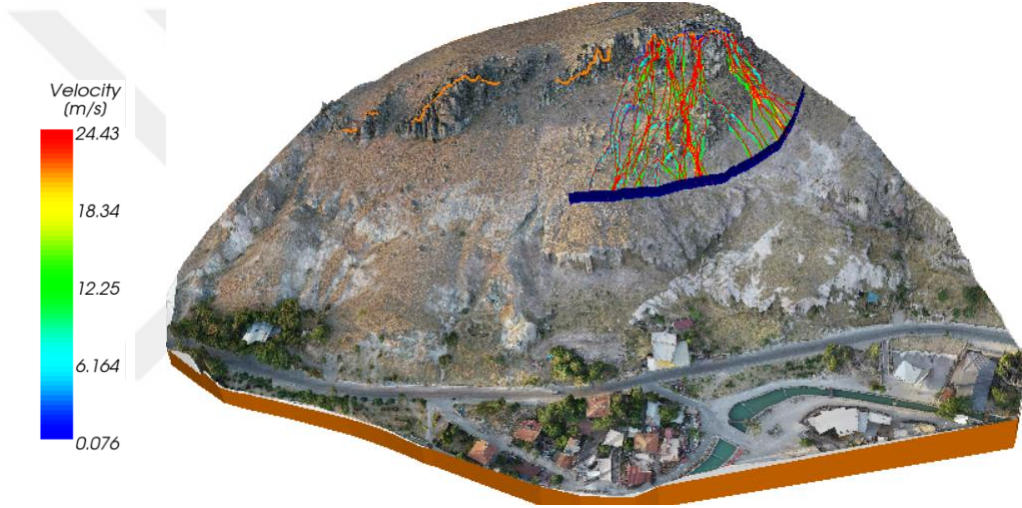
Ancak, bariyerin uygulama projesi hazırlanırken ankraj hesaplamaları mutlaka detaylı şekilde yapılmalıdır. Aksi takdirde, en sık yapılan hatalardan biri olan yetersiz ankraj uzunluğu nedeniyle sorunlar yaşanabilir. Bu durum, montaj sırasında yapılan hatalarla birleştiğinde, kaya düşmesi anında ankrajların kopmasına yol açabilir. Böylece, enerji sönmleyici dissipatörler görevini yerine getiremez.



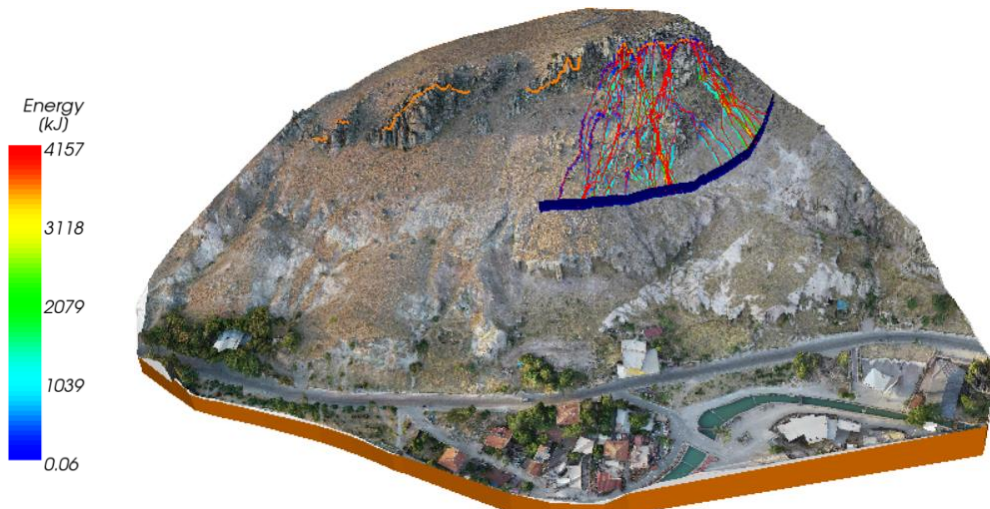
Şekil 185. 5000 kJ enerji sönmleme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizlerine ait düşme rotaları



Şekil 186. 5000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 187. 5000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait yatay hız değerleri



Şekil 188. 5000 kJ enerji sönümlene kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait toplam kinetik enerji değerleri

Tablo 22. 6 güzergâh boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri.

Kesit No:		1-1	2-2	3-3
15000 kg'lık kaya bloğu	Toprakarme Duvara Çarpma Anındaki Maksimum Sıçrama Yüksekliği (m)	1.30	2.78	3.99
	Maksimum Hız (m/sn)	12.66	15.35	16.55
	Toplam Kinetik enerji (kJ)	1422.55	2117.84	2651.34
Kesit No:		4-4	5-5	6-6
15000 kg'lık kaya bloğu	Toprakarme Duvara Çarpma Anındaki Maksimum Sıçrama Yüksekliği (m)	5.45	3.44	4.59
	Maksimum Hız (m/sn)	17.19	14.08	19.93
	Toplam Kinetik enerji (kJ)	2947.5	1761.50	3389.67

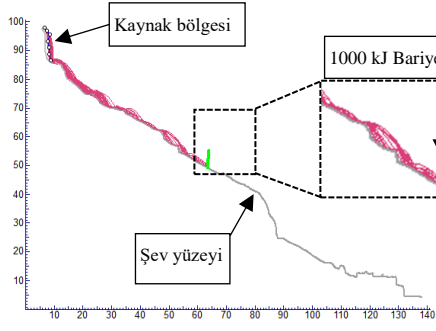
### 5.6.2. 1000 kJ Kapasiteli Enerji Sönümleyici Bariyerin Yeterlilik Analizi

Bu bölümde, 1000 kJ enerji sönümleyici bariyerin boyutlandırması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan jeolojik rapordaki deney sonuçlarına göre, kayaların birim hacim ağırlığı en fazla 2265 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmak ve aynı anda birden fazla kaya bloğunun düşme ihtimalini dikkate almak amacıyla, 2 m<sup>3</sup> hacme ve 4530 kg ağırlığa sahip kaya blokları için düşme analizleri yapılmıştır.

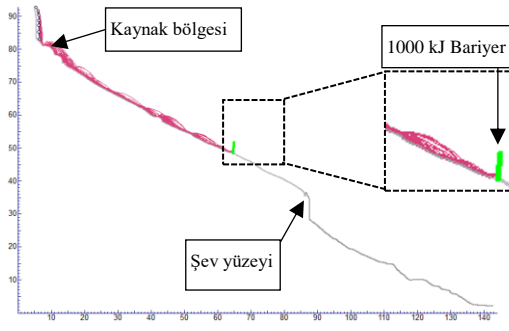
Toplam 12 kritik güzergâh boyunca gerçekleştirilen analizlerde, her bir kesit için 100 farklı olasılık senaryosu oluşturulmuş ve böylece toplamda 1200 adet kaya düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıçrama yüksekliği (Şekil 189), toplam kinetik enerji ve maksimum hız değerleri, gösterilmiş; 12 güzergâhın tamamı için maksimum değerler ise Tablo 23'te sunulmuştur.

Ayrıca, 3D kaya düşme analiz modeline 1000 kJ maksimum enerji sönümleme kapasitesine sahip bir bariyer yerleştirilmiş ve analizler bu konfigürasyonla tekrar edilmiştir. 3D analiz sonuçları Şekil 190 ile 192 arasında verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, 3.5 m yüksekliğinde önerilen enerji sönümleyici bariyerin hiçbir kesitte aşım yaşamadığı görülmüştür. Detaylara bakıldığında, düşen kaya bloklarının %90'ı enerji sönümleyici bariyere kadar ulaşabilmektedir. 7-7 ile 20-20 güzergâhlarına yerleştirilen bariyerlere ait analizlerde, tüm kesitler için elde edilen maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve enerji değerleri Tablo 23'te verilmiştir.

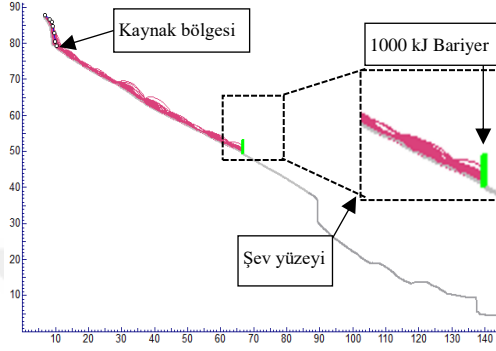
Tablodan da görüldüğü üzere, en büyük sıçrama yüksekliği 2.36 m ve en büyük kinetik enerji 531.36 kJ olarak 13-13 kesitinde hesaplanmıştır. Dolayısıyla, 3.5 m yüksekliğe ve 1000 kJ maksimum enerji sönümleme kapasitesine sahip çelik bariyerin bu bölge için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.



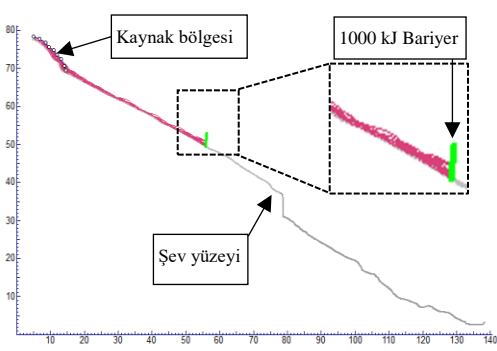
7-7



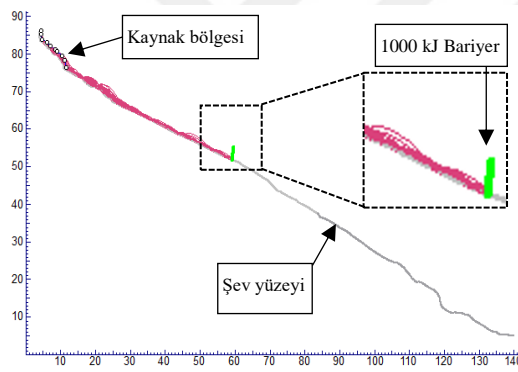
8-8



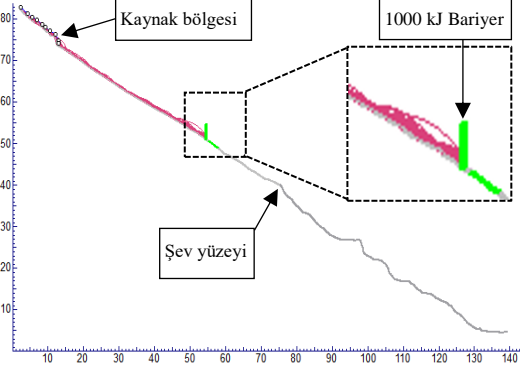
9-9



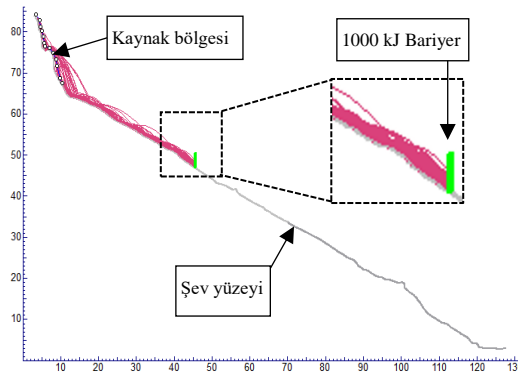
10-10



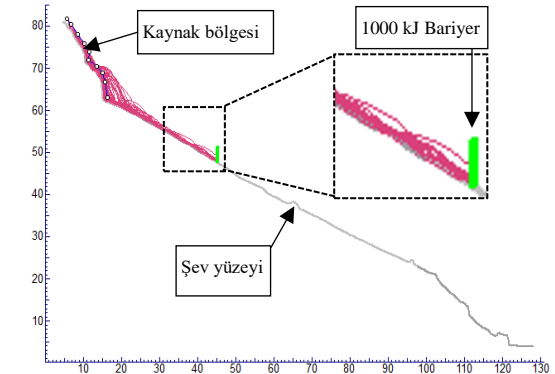
11-11



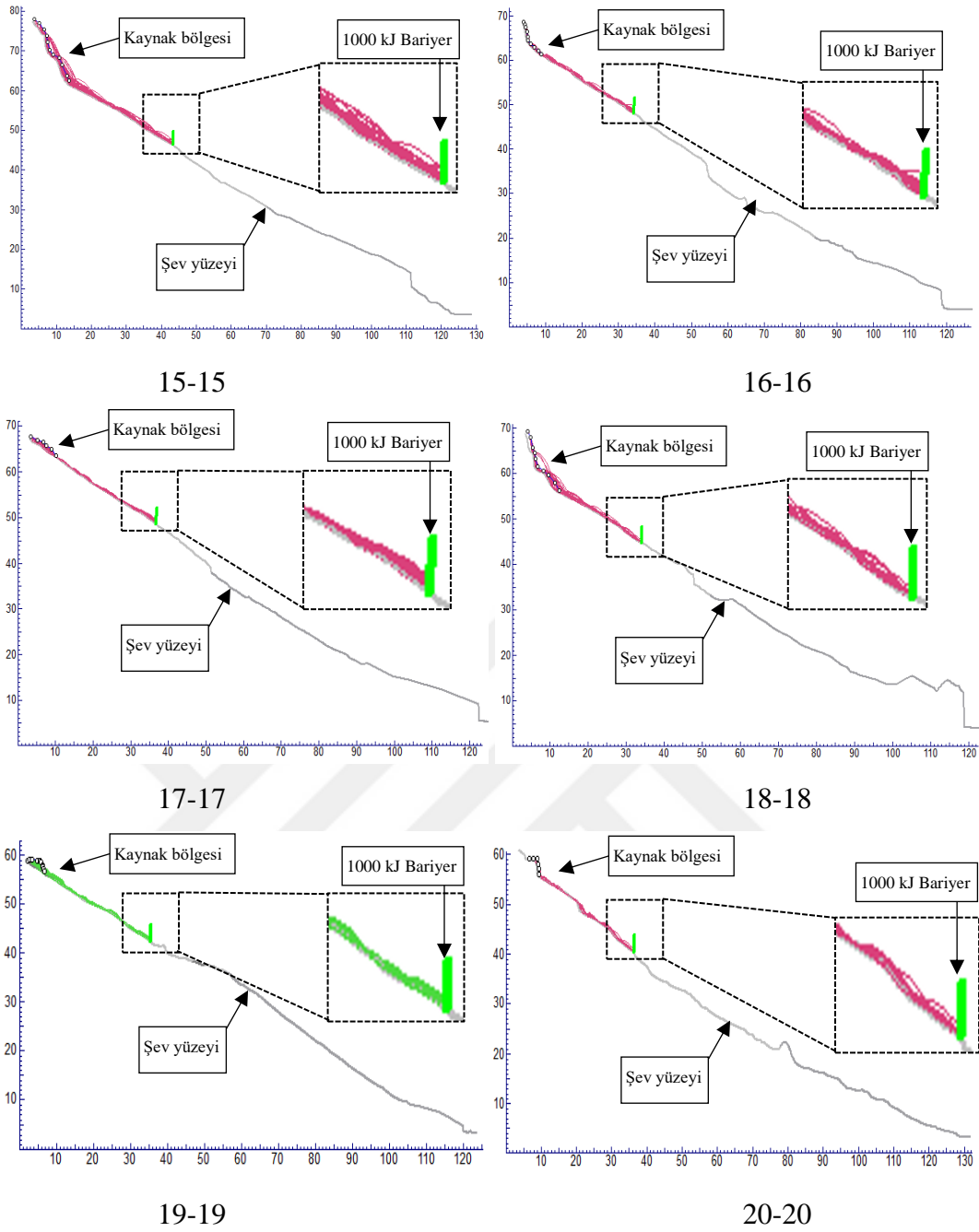
12-12



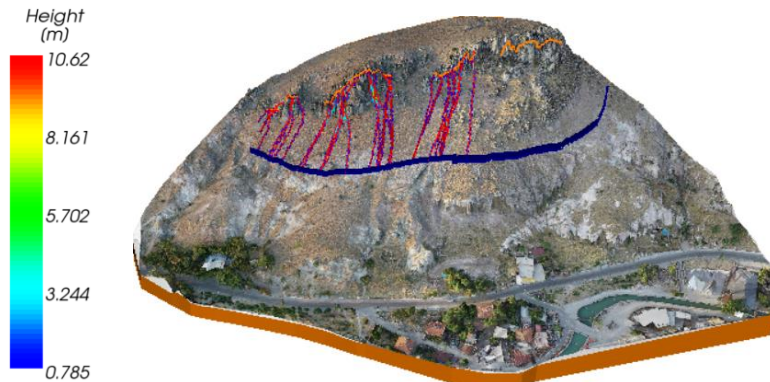
13-13



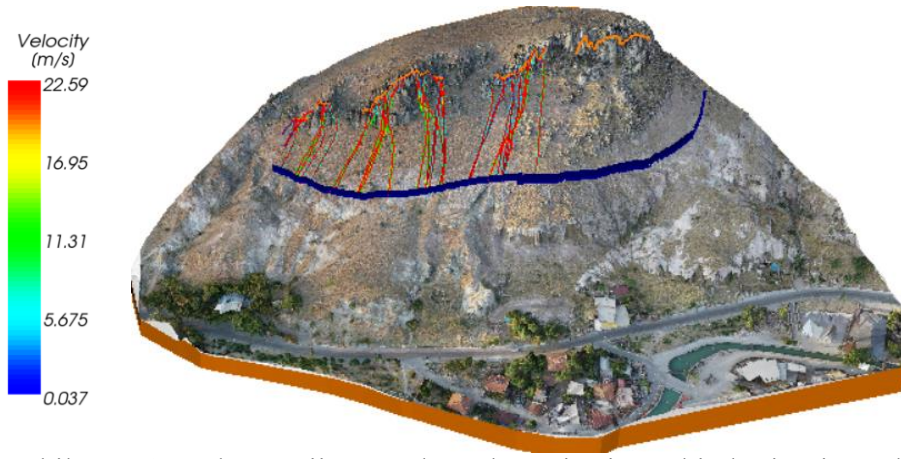
14-14



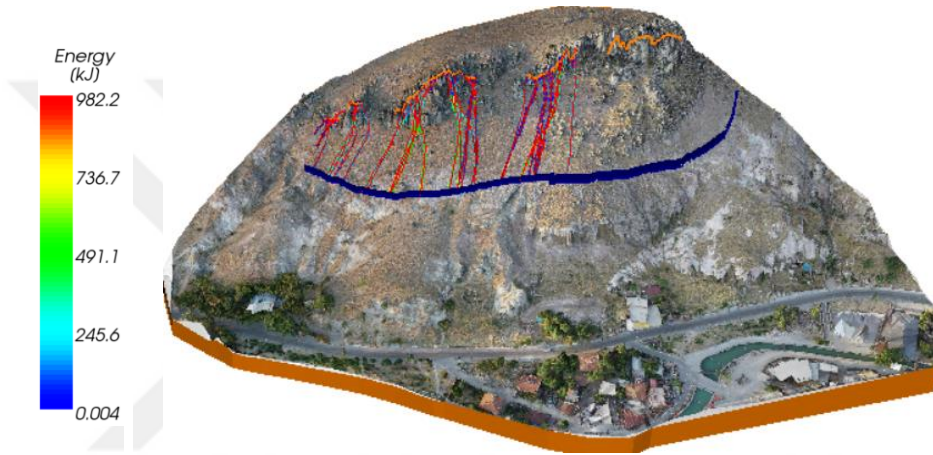
Şekil 189. 1000 kJ enerji sönmüleme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 2D kaya düşme analizlerine ait düşme rotaları



Şekil 190. 5000 kJ enerji sönmüleme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait sıçrama yüksekliği değerleri



Şekil 191. 1000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait yatay hız değerleri



Şekil 192. 1000 kJ enerji sönümlenme kapasitesine sahip bariyerin yerleştirilmesi sonrası yapılan 3D kaya düşme analizine ait toplam kinetik enerji değerleri

Tablo 23. 12 güzergah boyunca yapılan kaya düşme analizlerin maksimum sıçrama yüksekliği, hız ve toplam kinetik enerji değerleri

<b>Kesit No:</b>		<b>7-7</b>	<b>8-8</b>	<b>9-9</b>	<b>10-10</b>	<b>11-11</b>
4530 kg'lık kaya bloğu	Bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	1.28	0.98	2.05	1.44	1.19
	Maksimum hız (m/sn)	12.48	10.71	12.09	10.88	10.31
	Toplam kinetik enerji (kJ)	436.27	309.65	424.51	317.72	302.18
<b>Kesit No:</b>		<b>12-12</b>	<b>13-13</b>	<b>14-14</b>	<b>15-15</b>	<b>16-16</b>
4530 kg'lık kaya bloğu	Bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	1.76	2.36	1.93	1.47	1.66
	Maksimum hız (m/sn)	11.94	13.40	12.89	13.30	11.46
	Toplam kinetik enerji (kJ)	391.39	531.36	457.80	501.42	357.64
<b>Kesit No:</b>		<b>17-17</b>	<b>18-18</b>	<b>19-19</b>	<b>20-20</b>	
4530 kg'lık kaya bloğu	Bariyere çarpma anındaki maksimum sıçrama yüksekliği (m)	1.00	1.15	0,89	1.05	
	Maksimum hız (m/sn)	9.63	11.66	8.94	9.60	
	Toplam kinetik enerji (kJ)	245.80	368.33	223.72	246.70	

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 1. Derece Arkeolojik Sit Alanı'ndaki potansiyel kaya düşmesi riskinin belirlenmesi ve minimum müdahale ile maksimum güvenliğin sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, potansiyel kaya düşme bölgeleri detaylı şekilde belirlenmiş, dijital oblik fotogrametri yöntemi ile arazinin 3D hassas modeli oluşturulmuştur. Ardından saha çalışmaları kapsamında jeolojik yapı analizleri, jeomekanik özelliklerin laboratuvar testleri ve ERT ile sismik kırılma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerle kayaç ve zemin dinamik parametreleri ve tabakalanma özellikleri incelenmiştir. Riskli bloklar hacim ve konumlarıyla 3D sayısal modele aktarılmış, risk derecelendirmesi yapılmıştır. Stabilite analizlerinde, blok hareketleri kinematik analiz ve limit denge analizleri ile statik ve sismik koşullarda değerlendirilmiştir. Riskli blokların düşmesi durumunda etkilerini belirlemek amacıyla 2D ve 3D kaya düşme analizleri yapılmış; sıçrama yüksekliği, hız, kinetik enerji ve maksimum ulaşabilecekleri mesafeler tespit edilmiştir. Toplamda 52 kesitte, 5200 adet 2D ve 500 adet 3D kaya düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Risk analizleri sonrasında, bölgedeki tescilli yapıların darbe altındaki davranışlarını incelemek için ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Çay Camii minaresi, Kuran kursu ve yığma konuk evi modellenerek, her biri üç farklı kaya bloğu darbesi altında analiz edilmiştir. Bu aşamada, yapıların hasar düzeyleri değerlendirilmiş ve ıslah yöntemlerinin etkinliği analiz edilmiştir. Son aşamada, elde edilen risk parametrelerine göre her bölge için alternatif ıslah yöntemleri sayısal olarak analiz edilmiş, koruma ve müdahale yöntemlerinin belirlenmesine yönelik kriterler ortaya konmuştur. Ayrıca, koruma yapılarına ait yeterlilik ve kapasite analizleri yapılarak optimum ıslah yöntemi ve boyutları belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

1. Birinci derece arkeolojik sit alanı statüsündeki çalışma alanının 3D sayısal modeli, dijital oblik fotogrametri yöntemiyle oluşturulmuştur. Elde edilen modelde, ortofotoda 2.89 cm/piksel ve sayısal yükseklik modelinde 5.45 cm/piksel düzeyinde bir hassasiyet sağlanmıştır. Ayrıca, yer kontrol noktalarının yersel yöntemle ölçülmesi sonucunda, yatayda maksimum 3.6 cm, düşeyde ise 6.9 cm sapma tespit edilmiştir. Bu düzeyde bir doğruluk, özellikle kayalık araziler için oldukça yüksek olup, stabilite ve kaya düşme analizlerinin gerçeğe en yakın simülasyon sonuçları vermesini sağlayabilir. Bu nedenle, arkeolojik sit alanlarında kaya düşmesi problemi mevcutsa, arazinin hassas dijital oblik sayısal modeli mutlaka oluşturulmalıdır.

2. Çalışma alanındaki tüm litolojik birimler belirlenmiş; her bir birimin jeomekanik ve fiziksel özellikleri detaylı şekilde ortaya konulmuştur. Kaya düşmesi probleminin tanımlanabilmesi amacıyla, potansiyel kaynak bölgeleri ile riskli alanlar yapısal jeoloji kapsamında analiz edilmiş ve hat etütleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışma sahasında kaya düşmesini tetikleyebilecek deprem etkisi, donma-çözülme döngüleri, dış kaynaklı titreşimler gibi faktörler değerlendirilmiş ve bu doğrultuda kaynak bölgeleri tanımlanmıştır.

3. Yer altındaki kaya ve zemin koşullarını belirlemek, ayrıca önlem yapılarının planlandığı bölgelerde kaya oyma mekânları, tarihi kalıntılar, boşluklar gibi yapısal unsurların varlığını ve tabakalanma durumunu tespit etmek amacıyla iki farklı bölgede çok kanallı elektrik rezistivite tomografi (ERT) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, ortamın dinamik ve elastik parametrelerini belirlemek amacıyla altı farklı hatta sismik kırılma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen jeofizik veriler doğrultusunda, kayaç birimlerinin yer altındaki dağılımı net biçimde ortaya konmuş; hangi bölgelerde ankraj, kaya bulonu, enerji sönmüleyici bariyer ve kaya tutucu toprakarme bariyer gibi koruma yapılarının uygulanabileceği belirlenmiştir.

4. Potansiyel olarak risk teşkil eden tüm kaya blokları gözlemsel yöntemlerle incelenmiş, her birine sahada numara verilmiş ve boyut, hacim, ağırlık, şekil ve konum gibi parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda her bloğun potansiyel risk düzeyi ortaya konulmuştur. Böylece, optimum ıslah yönteminin belirlenmesi sürecinde her bir blok için ayrı ayrı çözümleme yapılmasına olanak sağlanmıştır. Bu çalışmanın en önemli avantajı, müdahale düzeyini en aza indirerek arkeolojik sit alanının özgün silüetini korumaktır.

5. Potansiyel kaynak bölgelerde süreksizlik denetimli kinematik analizler gerçekleştirilmiş ve güvenli şev açıları belirlenmiştir. Ayrıca, kaya oyma mekânlarının bütünsel durumu limit denge analizi (limit equilibrium analysis) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Şevde toptan göçme riskinin olup olmadığı ise hem statik hem de sismik yük etkileri altında yapılan stabilite analizleriyle tahkik edilmiştir. Bu kapsamlı analizler sonucunda, hem kaynak bölgelerde hem de kaynak olmayan alanlarda olası yenilme (stabilite kaybı) türleri ortaya konmuş ve her birine minimum müdahale gerektiren uygun çözüm önerilerinin belirlenmesi kolaylaştırılmıştır.

6. Kaynak bölgelerde yer alan riskli bloklar için, 52 farklı kesitte toplam 5.200 adet 2D ve 500 adet 3D kaya düşme analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizler sonucunda, blokların sıçrama yüksekliği, hızı, ulaşabileceği maksimum mesafe ve toplam kinetik enerji değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede, çalışma alanı boyunca hangi

bölgelerde ne düzeyde kaya düşmesi riski bulunduğu ve olası düşmelerde blokların sahip olabileceği sıçrama yüksekliği, hız ve kinetik enerji değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, müdahale ve koruma yöntemlerinin seçilmesi konusunda somut bir karar altyapısı oluşturulmuştur.

**7.** Kaya düşme analizi sonuçlarına göre, risk altındaki alan sınırları ve bu alanlarda yer alan yapılar belirlenmiştir. Bu kapsamda, yamaç eteklerinde yer alan tescilli Çay Camii minaresi, Kur'an Kursu binası ve Konuk Evi'ne yönelik hasar analizleri gerçekleştirilmiştir.

**8.** Çay Camii minaresinde 5 m<sup>3</sup>'lük kaya bloğu çarpması sonucu yapının %15.4'ünde global hasar (göçme), 1 m<sup>3</sup>'lük blokta %9.1 oranında lokal hasar ve 0.1 m<sup>3</sup>'lük blokta %3.7 oranında ileri seviye hasar tespit edildiği için, minarenin narın yapısı gereği ıslah çalışmaları sırasında hiçbir kaya bloğunun bu yapıya temas etmesine izin verilmemelidir.

**9.** Kur'an Kursu yapısında 5 m<sup>3</sup>'lük kaya bloğu %12.0 oranında global hasara, 1 m<sup>3</sup>'lük blok %5.9 oranında lokal hasara ve 0.1 m<sup>3</sup>'lük blok %1.3 oranında hasara yol açtığından, özellikle 0.1 m<sup>3</sup> ve daha küçük blokların kabul edilebilirliği, kaya ıslah yöntemleri belirlenmeden önce detaylı maliyet ve risk analizine göre değerlendirilmelidir.

**10.** Konuk Evi'nde 5 m<sup>3</sup>'lük kaya bloğu %28.5 oranında global hasara (göçme), 1 m<sup>3</sup>'lük blok %17.5 oranında lokal hasara ve 0.1 m<sup>3</sup>'lük blok %5.6 oranında ileri seviye hasara neden olduğundan, yapının tescilli ve tarihi niteliği göz önünde bulundurularak ıslah çalışmaları sırasında hiçbir kaya bloğunun bu yapıya ulaşmasına izin verilmemelidir.

**11.** Optimum ıslah yöntemleri belirlerken herbölgeye ayrı çözümler yapılmıştır. Bu kapsamda, 1., 2. ve 3. derece riskli büyük hacimli andezitik tuf bloklar kontrollü kaya kırım uygulaması ile kırılarak yamaçtan uzaklaştırılacaktır.

**12.** 3., 4. ve 5. derece riskli blok ve bölgeler güçlendirilmiş kombine ağ ile sabitlenerek aktif düşme riski bertaraf edilecektir. Bölgesel hacimli olarak düşmesinde ise kombine ağ kopsa dahi kontrollü bir şekilde düşmesi sağlanmış olacaktır. Bu da altında bulunan enerji sönmüleyici çelik bariyer ve kaya tutucu toprakarme bariyer yüksekliğini düşürerek alanın silüeti korunmuş olacaktır.

**13.** Kaya tutucu toprakarme bariyerin yeterlilik ve kapasite analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yeterlilik değerlendirmesi için 1.200 adet 2D ve 500 adet 3D kaya düşmesi analizi yapılmıştır. Olası kaya düşmelerinde bariyerin maruz kalacağı enerjiye göre, toprakarme bariyerin enkesit kapasite analizleri gerçekleştirilmiş;

3.000 kJ enerjiye kadar hasarsız, 5.000 kJ seviyesinde lokal onarım gerektiren ve 10.000 kJ enerji düzeyinde göçme öncesi moda geçeceği belirlenmiştir.

**14.** Yamaçların her iki tarafında bulunan ve vadilerde yağış sırasında suyun geçişine izin verirken kaya bloklarını durduracak şekilde tasarlanan oluk bariyerlerin yeterlilik ve kapasite analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu bariyerlerin yerleştirileceği konumların doğruluğu, yapılan sayısal analizlerle ortaya konulmuştur.

**15.** Andezitik tüf bölgesinin altında planlanan ve riskli blok durumuna göre konumlandırılacak enerji sönmüleyici bariyerin yeterlilik ve kapasite analizleri, 2.000 adet 2D ve 500 adet 3D kaya düşme analizi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yamacın ilk 100 metrelik bölümünde 5.000 kJ enerji sönmüleme kapasitesine sahip bir bariyerin gerekli olduğu; kalan 200 metrelik kısımda ise 1.000 kJ kapasiteli bir bariyerin yeterli olacağı belirlenmiştir.

Yapılan detaylı çalışma sonucunda, sit alanındaki kaya düşmesi riski ayrıntılı bir şekilde ortaya konulmuş; ardından, düşme olasılığı ve düşme sonucunda oluşabilecek hasarlar analiz edilerek, çeşitli alternatiflerle birlikte müdahale ve koruma yöntemleri belirlenmiştir. Bu düzeyde detaylı bir çalışmayla, her bir riskli blok ve bölgeye özel, bağımsız müdahale ve koruma imkanı sağlanmıştır. Dolayısıyla, arkeolojik sit alanlarında kaya ıslah projeleri hazırlanırken, her bir risk ayrı ayrı ortaya konulmalı; her riskli durum için en az üç farklı alternatif çözüm geliştirilerek, alanın bütünlüğünü koruyan ve görsel silüeti en az düzeyde etkileyen uygun müdahale yöntemi seçilmelidir.

## KAYNAKÇA

- Abaqus/CAE V6.12. (2017). Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- Admassu, Y., Shakoor, A. ve Wells, N. A. (2012). Evaluating selected factors affecting the depth of undercutting in rocks subject to differential weathering. *Engineering Geology*, 124, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.007>.
- AFAD. (2020). “Kayadan Oyma Yapılarda Meydana Gelen Çökmelerden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Kılavuz” Ankara.
- Agliardi F., Crosta G. B. ve Frattini P. (2009). Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modeling techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(4), 1059-1073.
- Agliardi, F. ve Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455–471.
- Akbaş, S. (2024). *Kahramanmaraş ili kaya düşmesi alanlarının üç boyutlu değerlendirilmesi ve çözüm önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.*
- Akın, M., Dinçer, İ. ve Orhan, A. (2020). Kaya Düşmelerinden Kaynaklı Afetlerin Değerlendirilmesine Yönelik Teknik Kılavuz. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, 169ss.
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A. ve Varol, O. O. (2024). A comparative study on rockfall block motion characteristics using 3-D and 2-D rockfall simulations: a case study from Cappadocia (Mazı, Türkiye). *Natural Hazards*, 1-27.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z. ve Oktay, C. Ö. (2015). Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) karayolundaki kaya şevlerinin kinematik ve limit denge yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 1-10.
- Andrea L., Monica B., Daniele M. ve Daniele P. (2016) Maintenance and risk management of rockfall protection net fences through numerical study of deteriorations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 24 March <https://doi.org/10.5194/nhess-2016-78>.
- Ansal, A., Tönük, G. ve Kurtuluş, A. (2007). Yersarsıntısı Şiddetine Göre Mikrobölgeleme ve Sismik Tehlike Senaryoları. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul*, 139-156.
- Avcı, M. C. (2019). *Dünyanın ilk anıtsal inanç merkezi: Göbekli tepe. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Şanlıurfa.*
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J. D., Couture, R., Locat, J., Robichaud, G. ve Gamel, G. (2004). Towards a GIS-based hazard assessment along the Quebec City promontory. *Landslide Evaluation and Stabilization* (s. 207-213). Canada. <https://doi.org/10.1201/b16816-28>.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering geology*, 7(4), 287-332.
- Barton, N. ve Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10, 1-54.

- Bernabei, L., Mochi, G., Bernardini, G. ve Quagliarini, E. (2021). Seismic risk of Open Spaces in Historic built Environments: a matrix-based approach for emergency management and disaster response. *Int. J. Disaster Risk Reduction*, 65, 102552. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102552>.
- Bernard, J., Leite, O., Vermeersch, F., Instruments, I. R. I. S. ve Orleans, F. (2006). Multi-electrode resistivity imaging for environmental and mining applications. *IRIS Instruments, Orleans*.
- Bozzolo, D. ve Pamini, R. (1986). *Simulation of rock falls down mountain slopes*. In Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 2, pp. 1291–1299.
- Brando, G., Pagliaroli, A., Cocco, G. ve Di Buccio, F. (2020). Site effects and damage scenarios: the case study of two historic centers following the 2016 Central Italy earthquake. *Eng. Geol.*, 272, 105647 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105647>.
- Çakır, F., Uçkan, E., Shen, J., Seker, B. S. ve Akbas, B. (2015). Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. *Eng. Fail. Anal.* 58, 249–266. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.030>.
- Canelli, L., Ferrero, A. M., Migliazza, M. ve Segalini, A. (2012). Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers—experimental tests and impact analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1693-1699.
- Castanon-Jano, L., Blanco-Fernandez, E., Castro-Fresno, D. ve Ballester-Muñoz, F. (2017). Energy dissipating devices in falling rock protection barriers. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 603-619.
- Castelli, M. ve Scavia, C. (2008). A multidisciplinary methodology for hazard and risk assessment of rock avalanches. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41, 3-36.
- Coşgun, S. İ. (2014). *Betonarme Plakların Darbe Yüğü Etkisindeki Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*.
- Crosta, G. B. ve Agliardi, F. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 583–598, doi:10.5194/nhess-4-583-2004.
- Çelik M., Seferoğlu A. G., Seferoğlu M. T. ve Akpınar M. V. (2017). Comparison of the Cost, Construction and Benefit of the Innovative Steel Barriers and Embankment Walls in Trabzon. International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), Elazığ.
- Çelik, M. (2023). Investigating the performance of passageway corridor for ground reinforced embankments against rockfall. *Journal of Mountain Science*, 20(1), 15-30.
- Çelik, M. ve Nasery, M. M. (2021). Eğimli Arazilerde Kaya Tutucu Toprakarme Duvarların Uygulanabilirliği ve Alternatif Kaya Islahı Çözümleriyle Karşılaştırılması: Kanlıpelit Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 176-191.
- D’Ayala, D. ve Ansal, A. (2012). Non linear push over assessment of heritage buildings in Istanbul to define seismic risk. *Bull. Earthq. Eng.*, 10, 285–306. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9311-1>.
- Dorren, L. K. A. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27(1), 69–87.

- Eren, Y. (1996). Sille-Tatköy (Bozdağlar masifi-Konya) kuzeyinde Alpin öncesi bindirmeler. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 11, 163-169.
- Eren, Y. (1993). Konya Kuzeybatısında Bozdağlar Masifinin Otokton ve Örtü Birimlerinin Stratigrafisi. *Geological Bulletin of Turkey*, 36, 7-23.
- Fanos, A. M. ve Pradhan, B. (2018). Laser scanning systems and techniques in rockfall source identification and risk assessment: a critical review. *Earth Systems and Environment*, <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0046-x>.
- Geotomo Software. (2020). RES2DINV version 4.8: 2D resistivity and IP inversion software user manual. Malaysia.
- Goodman, R. E. (1991). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.
- Görüm, T., Tanyas, H., Karabacak, F., Yılmaz, A., Girgin, S., Allstadt, K. E. ve Burgi, P. (2023). Preliminary documentation of coseismic ground failure triggered by the February 6, 2023 Türkiye earthquake sequence. *Engineering Geology*, 327, 107315.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. ve Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1079–1093.
- Gündüz, M. (2017). *Sarayköy-Sille-Tatköy-Küçükmuhsine (Konya KB'sı) çevresinde yüzeyleyen neojen yaşlı volkanik kayaların jeokronolojisi, mineral kimyası, element ve izotop jeokimyası, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya*.
- Hassan, H. M., Fasan, M., Sayed, M. A., Romanelli, F., ElGabry, M. N., Vaccari, F. ve Hamed, A. (2020). Site-specific ground motion modeling for a historical Cairo site as a step towards computation of seismic input at cultural heritage sites. *Eng. Geol.*, 268, 105524 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105524>.
- Hearn, G., Barrett, R. K. ve Henson, H. H. (1996). Testing and modelling of two rockfall barriers. *Transp. Res. Rec.*, 1504, 1–11.
- Hoek, E. ve Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd edn). London: Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. ve Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
- Hutchinson J. N. (1988), Morphological and Geotechnical Parameters of Landslide in Relation to Geology and Hydrogeology, 5th International Symposium on Landslides, 1, 3-35, Lausanne, USA.
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R. ve Scheidl, C. (2009, September). Debris flow impact estimation. In Proceedings of the 11th international symposium on water management and hydraulic engineering, Ohrid, Macedonia (Vol. 1, pp. 1-5). University of St Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, Skopje, Macedonia.
- ISRM. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods, ISRM, R. Ulusay and J.A. Hudson (eds.), Kozan Ofset, Ankara, 628s.*
- Kara, R. T. (2020). *Üç boyutlu kaya düşme analizleri ile olası tehlike haritası üretilmesi ve önlem yapıları tasarımı: Gümüşhane kent merkezi örneği, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane*.

- Kaygısız, N. Ç. (2019). Son 10 Yılda Dünyada ve Türkiye’de Turizm 2008-2017. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (19), 607-626.
- Keller, J., Jung, D., Burgath, K. ve Wolff, F. (1977). Geologie und Petrologie des neogenen Kalkalkali-Vulkanismus von Konya (Erenler Dağ-Alaca Dağ-Massiv, Zentral-Anatolien). *Geologisches Jahrbuch*, B25, 37-117.
- Keskin, İ. ve Polat, A. (2022). Kinematic analysis and rockfall assessment of rock slope at the UNESCO World Heritage city (Safranbolu/Turkey). *Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering*, 46(1), 367-384.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 66(66), 20-37.
- Kızılay, Ö. (2019). *Bartın ili Kaman köyü katı atık bertaraf tesisi sahasının jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.*
- Kurt, H., Özkan, A. M. ve Koçak, K. (2003). Geology, petrography and geochemistry of the subduction related volcanic rocks, West of Konya, Central Anatolia. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 46(2), 39-52.
- Kuyrukçu Y. ve Kuyrukçu, E. Z. (2015). Rumların yaşam tarzı ve bunun mekâna yansması: Sille örneği. *Uluslararası Hakemli Tasarım ve Mimarlık Dergisi*, 6, 30-56.
- Lambert, S. ve Bourrier, F. (2013). Design of rockfall protection embankments: a review. *Engineering Geology*, 154, 77-88.
- Lambert, S. ve Kister, B. (2018). Efficiency assessment of existing rockfall protection embankments based on an impact strength criterion. *Engineering Geology*, 243, 1-9.
- Lan, H., Martin, C. D., Lim, C. H. ve Zhou, C. B. (2007). Rockfall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2), 262–279.
- Li, X., He, Q., Zhao, G., Ling, K., Liu, D. ve Liu, Y. (2024). Dynamic response analysis of ancient pagodas under rockfall impact. *Heritage Science*, 12(1), 1-17.
- Lombardo, L., Tanyas, H. ve Nicu, I. C. (2020). Spatial modeling of multi-hazard threat to cultural heritage sites. *Eng. Geol.*, 277, 105776 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105776>.
- Margottini, C., Spizzichino, D., Crosta, G. B., Frattini, P., Mazzanti, P., Scarascia Mugnozza, G. ve Beninati, L. (2016). Rock fall instabilities and safety of visitors in the historic rock cut monastery of Vardzia (Georgia). *Volcanic rocks and soils. CRC press Balkema, Taylor and Francis Group*, 371-378.
- MTA. (2002). Türkiye jeoloji haritası Ankara-Konya (1/500.000), M.T.A. Ankara.
- Murtiadi, S. (1999). *Behavior of High-Strength Concrete Plates under Impact Loading. Master Thesis, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland.*
- Nasery, M. M. (2019). *Kompozit kolon-kiriş birleşimlerinin tekrarlı yük etkisindeki davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.*

- Nasery, M. M. ve Çelik, M. (2020). Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Çözümlerin İncelenmesi: Trabzon Kaymaklı Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(1), 539-554.
- Nasery, M. M., Cosgun, S. I. ve Temel, B. A. (2023). Multi-scenario analysis of rockfall hazard for a historical vaulted masonry building in Sumela Monastery. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(11), 1876-1904.
- Nasery, M. M., Çelebi, E., Ağcakoca, E., İstegün, B. ve Yaman, Z. (2024a). Development of fully controlled rock crushing method and its vibration impact during rockfall risk reduction at Assos ancient port: Experimental and field studies. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03882.
- Nasery, M. M., Çelik, M. ve Şadoğlu, E. (2024)b. Damage assessment of Siverek Castle during the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on 06 February 2023: Remediation and strengthening proposals. *Engineering Geology*, 334, 107511.
- Nomura, T., Inoue, S., Fuchigami, M., Yokota, Y., Kubo, T., Tatta, N. ve Arai, K. (2002). Experimental Research of Reinforced Soil Wall For Rock-Fall Protection, Proceedings of 7th International Conference, On Geosynthetics, Nice, France, 22–27 September, 303–308.
- Oggeri, C. ve Peila, D. (2000). Protection of Transportation System Against Rock Falls, İn: Proceedings of Landslides İn Research, Theory And Practice, 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, UK, 1141–1146.
- Okay, A. I. ve Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 156(1), 475-515.
- Özata, S. (2018). Sustainability of Rock Carving techniques in the world heritage site, Cappadocia. In New perspectives in interdisciplinary cultural heritage studies: Contributions of the European Students' Association for Cultural Heritage in the European Year for Cultural Heritage 2018 (pp. 85-102). Mazu Press.
- Özata, Ş. (2015). *Kapadokya Bölgesi Kaya Oyma Yapı Sorunları ve Çözüm Önerileri. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.*
- Özgül, N. (1976). Toroslar'm bazı temel jeoloji özellikleri. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 19, 65-78.
- Özkan, A. M. (1998). *Konya batısındaki Neojen çökellerinin stratigrafisi ve sedimentolojisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.*
- Peila, D., Oggeri, C. ve Castiglia, C. (2007). Ground reinforced embankments for rockfall protection: design and evaluation of full scale tests. *Landslides*, 4, 255-265.
- Plassiard, J. P. ve Donzé, F. V. (2010). Optimizing the design of rockfall embankments with a discrete element method. *Engineering Structures*, 32(11), 3817-3826.
- Polat, A., Keskin, İ. ve Denizli, İ. (2016) Kaya düşmesi önleme yöntemlerine bir örnek: Çelik bariyer uygulaması (Gürün-Sarıca), International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management 2016 (DAAYS'16), 02-04 March, pp. 395-400, Karabük-Turkey.
- Priest, S. D. ve Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 13(5), 135-148.
- Resmi Gazete. (1959). Umumi Hayata Müessir Afetler Dolayısıyla Alınacak Tedbirlerle Yapılacak Yardımlara Dair Kanun. Kanun Numarası, 7269.

- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rock fall and its control, Highway Research Record 17, Highway Research Board, Washington, pp. 13–28.
- Roch, K. H., Chwatal, W. ve Brückl, E. (2002). The Application of GPR to the estimation of rock fall hazard to cultural heritage. In EGS General Assembly Conference Abstracts, p. 5832.
- RocPro3D. (2014). Available online: [http://www.rocpro3d.com/rocpro3d\\_en.php](http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php) (accessed on 29 November 2018).
- Ronco C., Oggeri C. ve Peila D. (2009). Design of Reinforced Ground Embankments Used For Rockfall Protection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1189-1199.
- Seferoğlu M. T., Cosgun S. İ., Çelik M., Seferoğlu A. G. ve Akpınar M. V. (2016). A Numerical Study on Rock Barriers in Uzungöl Region. ICENS 2nd International Conference on Engineering and Natural Science, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
- Şengör, A. M. C. (1980). Türkiye'nin neotektoniğinin esasları [Fundamentals of the neotectonics of Turkey]. Publication of Geological Society of Turkey, 40p.
- Tan, D. Y., Yin, J. H., Feng, W. Q., Qin, J. Q. ve Zhu, Z. H. (2020). New simple method for measuring impact force on a flexible barrier from rockfall and debris flow based on large-scale flume tests. *Engineering Geology*, 279, 105881.
- Temel, A., Gündoğdu, M. N., Gourgaud, A. ve Le Pennec, J. L. (1998). Ignimbrites of Cappadocia (central Anatolia, Turkey): petrology and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4), 447-471.
- Topal, T., Akin, M. K. ve Akin, M. (2012). Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey). *Natural Hazards*, 62, 255-274.
- Turner A.K. ve Schuster R.L. (2012). Rockfall Characterization and Control, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., USA, 658ss.
- URL-1, <https://karadenizgazete.com.tr/foto-galeri/karabuk-zonguldak-seferinde--faciadan-donuldu-/554532#sayfa.16> Aralık 2024.
- URL-2, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?P=Kulturel-Miras-Istatistikleri-2022-49749>, 07 Eylül 2022.
- URL-3, <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/10-tonluk-kaya-parcasindan-kil-payi-kurtuldular-461776.html>. 19 Şubat 2020.
- URL-4, <https://www.artusa.com.tr/ceлик-halka-aglar-ring-net.html>.
- URL-5, [https://earth.google.com/web/search/37°55'37"N32°25'11"E](https://earth.google.com/web/search/37°55'37).
- URL-6, <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>.
- Ünsal, N. (2001). İnşaat mühendisleri için jeoloji. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.
- Volkwein, A., Roth, A., Gerber, W. ve Vogel, A. (2009). Flexible rockfall barriers subjected to extreme loads. *Structural engineering international*, 19(3), 327-332.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F. Dorren, L. K. A., Gerber, W. ve Jaboyedoff, M. (2011) Rockfall characterization and structural protection-a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2617-2651.

- Wyllie, D. C. (2015). *Rock Fall Engineering*. CRC Press, Taylor & Francis Group. 270 pp.
- Wyllie, D. C. ve Mah, C. W. (2002). *Rock Slope Engineering*, 4th edition. Taylor & Francis, London, 422 pages.
- Wyllie, D. C. ve Norrish, N. I. (1996). Stabilization of rock slopes, Landslides investigation and mitigation, Keith Turner and Robert Schuster Ed., Transportation Research Board Special Report 247, pp. 474–506.
- Yalçın, L. ve Göktepe, A. (2018). Arazi Yönetimi Kapsamında Koruma Anlayışı ve Sit Alanı Mülkiyetindeki Veri Yetersizliği. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 7(2), 329-336.
- Yang, X., Tong, J., Yu, Z. ve Tian, Y. (2024). Deep learning-based automatic rockfall impact force reconstruction for flexible barrier systems in full-scale tests. *Automation in Construction*, 165, 105510.
- Yılmaz, I., Yıldırım, M. ve Keskin, I. (2008). A method for mapping the spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 547–554. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0174-x>.

## ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Manzoor NASERY, ilk ve Orta öğrenimini Amani Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında girdiği Afganistan Ulusal Üniversite Giriş Sınavında üstün başarı ile Kabil Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir dönem okuduktan sonra Türkiye Cumhuriyeti Bursları programını kazanan NASERY 2006 yılında Türkiye'ye geldi, dil eğitimini tamamladıktan sonra 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversite, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında derece ile mezun olduğu İnşaat Mühendisliği Bölümünün yanı sıra aynı yıllar arasında Harita Mühendisliği Bölümünü Yan Dal olarak bitirdi. 2012 yılında Yurt dışında okuyan en başarılı Afgan öğrencisi olarak seçilen NASERY, aynı yıl lisans derecesi ile Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora programına kabul oldu. 2013 yılında TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Programı tarafından Yabancı Uyruklular Lisansüstü Burs Programı ile ödüllendirildi. 2017 yılında kurmuş olduğu Dynamica Mühendislik firması bünyesinde bugüne kadar birçok özel mühendislik yapıların projelendirilmesini tamamlayan NASERY, yirminin üzerine bilgisayar programını aktif olarak kullanabilmektedir. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezini başarı ile tamamladı. Anadili Peştuca'nın yanında ileri derecede Türkçe, Farsça ve İngilizce dillerini bilmektedir. Evli olup Yüsrâ ve Talha adında iki çocuk babası olan NASERY'nin bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

### **SCI, SSCI, AHCI indexlerine giren dergilerde yayımlanan makaleler:**

**Nasery, M.M., Çelebi, E., Ağcakoca, E., İstegün, B., & Yaman, Z. (2024).** Development of fully controlled rock crushing method and its vibration impact during rockfall risk reduction at Assos ancient port: Experimental and field studies. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03882.

**Cosgun, S.I., & Nasery, M.M. (2024).** Performance of steel protective structure for historical masonry aqueducts against rockfall: Numerical and field studies. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03477.

**Nasery, M.M., Çelik, M., & Şadoğlu, E. (2024).** Damage assessment of Siverek Castle during the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on 06 February

- 2023: Remediation and strengthening proposals. *Engineering Geology*, 334, 107511.
- Maali, M., Ağcakoca, E., **Nasery, M. M.**, Macit, F., & Aydın, A.C. (2024). Post fire performance of galvanized cylindrical shells for buckling failure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24(2), 1-23.
- Nasery, M.M.**, Cosgun, S.I., & Temel, B.A. (2023). Multi-scenario analysis of rockfall hazard for a historical vaulted masonry building in Sumela Monastery. *International Journal of Architectural Heritage*, 17(11), 1876-1904.
- Nasery, M.M.** (2023). Investigation on Behaviours along Weak Axes of Steel Beam under Low Velocity Impact Loading: Experimental and Numerical. *Buildings*, 13(9), 2331.
- Cosgun, T., Ceylan, O., **Nasery, M.M.**, Güler, Ö., Sayin, B., Uzdil, O., & Akcay, C. (2023). Seismic performance assessment and retrofitting proposal for a historic masonry school building (Bursa, Türkiye). *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02087.
- Nasery, M.M.**, Ağcakoca, E., Aydın, M., & Sümer, Y. (2023). Effects of support type and geometric shape of steel tube on concrete-encased concrete-filled steel tube beam under low velocity impact. In *Structures* (Vol. 47, pp. 781-799). Elsevier.
- Çelik M., Seferoğlu M.T., Akpınar M.V. **Nasery M.M.**, Seferoğlu A., "Evaluation of Load-Transfer Efficiency of Steel Mesh Reinforced Contraction Joints in Concrete Pavement: Accelerated Pavement Test and FE Analysis" *Teknik Dergi*, 32(6). 2021.
- Nasery M.M.**, Ağcakoca E., Yaman Z., "Experimental and Numerical Analysis of Impactor Geometric Shape Effects on Steel Beams under Impact loading", *Structures*, Vol, 27, pp, 1118-1138. 2020.
- Nasery M.M.**, Hüsem M., Okur F.Y., Altunışık A.C., "Numerical and experimental investigation on dynamic characteristics changes of encased steel profile before and after cyclic loading tests", *International Journal of Civil Engineering*, 18(12), 1411-1431, 2020.

#### **Diğer Dergilerde Yayımlanan Makaleler:**

- Nasery, M. M.** (2023). Investigating the behavior of hollow steel section beam under repetitive transverse impact loading. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics (Online)*, 6(4).

- Nasery, M.M.** (2023). Investigating of the Reasons for the Collapse on the Entrance Arches of the Harran Grand Mosque (Ulu Cami) During the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw.) Civ. Eng. Beyond Limits.
- Sadid, M. S., Yaman, Z., & **Nasery, M. M.** (2022). Effect of the haunch angle and stiffener types on column-beam connection behaviour under static loading. Civ. Eng. Beyond Limits, 3(4), 1-13.
- Hazinedar, S., Ağcakoca, E., & **Nasery, M. M.** (2022). Geleneksel ve Modüler Kolon-Kiriş Birleşim Bölgesinin Farklı Yükleme Durumunda Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi (Investigation of Traditional and Modular Column-Beam Connection With Finite Element. International Refereed Journal of Engineering and Sciences, 95.
- Nasery, M.**, Ağcakoca, E., Yaman, Z. (2020). Lif Katkılı Betonlarda Fiber Oranının Basınç Dayanımına Etkisinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 7 (2) , 850-862 . DOI: 10.35193/bseufbd.709099-2020.
- Çelik M., **Nasery M.M.** (2021). "Eğimli Arazilerde Kaya Tutucu Toprakarme Duvarların Uygulanabilmesi için Geliştirilen Çözümün İncelenmesi: Kanlıpelit Örneği", Doğal Afetler ve Çevre Dergisi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 7 (1), 176-191. DOI: 10.21324/dacd.689927-2021.
- Nasery M.M.**, Çelik M., " Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Çözümlerin İncelenmesi: Trabzon Kaymaklı Örneği", Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 25(1), 539-554.
- Temel, B.A., Başağa, H.B., Temel, M.U., Yılmaz, G.K., & **Nasery, M.M.** (2019). "Big Room concept in project management and control", Journal of Construction Engineering, 2(4), 204-214.
- Nasery M.M.**, Hüsem M., "Kompozit Çelik-Betonarme Yapıların İrdelenmesi", Mühendislik Bülteni, Sayı 84, ss.6-8, 2017.
- Nasery M.M.**, Ergün M., Hüsem M., Ateş Ş., "Kat Planındaki Çıkıntıların Burulma Düzensizliği Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Mühendislik Bülteni, cilt.29, ss.16-26, 2015.
- تولنيز علوم/ نامه سرگشاده خدمت انجنيروها که در پروژه بازسازی دارالامان مصروف خدمت هستند! / محمد منظور /  
تاند / نا صری (Farsça).
- تاند/ تولنيز علوم/ په افغانستان کې د ودانيو له امله احتمالي ناوړين! / محمد منظور نا صری (Peştuca).

### **Hakemli Kongre/Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar:**

Harran grand mosque (Ulu Cami) minaret using digital twin modelling. 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23), Trabzon, Türkiye, 12-14 October 2023.

Sadid M. S., Şahin, FZ., Özcan Z., **Nasery, M.M.** (2023). A comparative study on the modeling of beams as wire, shell, and solid elements in 3D simulation of the masonry building, 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23), Trabzon, Türkiye, 12-14 October 2023.

**Nasery M.M.**, Ağcakoca E., Yaman Z., "Inspecting the Mesh Size Effects in Finite Element Modeling of Steel Beams under Impact Loading" International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards, Karabük, Turkey, 25-27 September 2019, 69-79.

**Nasery M.M.**, Çelik M., Osmanoğlu E., Topçuoğlu M., "Evaluation of Constructed Rockfall Protection Systems in Trabzon Province" International Science and Engineering Applications Symposium on Hazards, Karabük, Turkey, 25-27 September 2019, 267-278.

**Nasery M.M.**, Hüsem M., Ardamsahid M., "Design Stages of Rockfall Protection Systems " International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey, 21-23 September 2017, 1531.

**Nasery M.M.**, Hüsem M., Ardamsahid M., "Earthquake Resistance Performance and Reconstruction Analysis of Historical Kundupoglu Mansion" International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey, 21-23 September 2017, 1532.

**Nasery M.M.**, Hüsem M., "Evaluating effects of Haunch in Concrete Encased Composite Column-Steel Beam Connection Zone under Bending and Lateral Loading" International Conference on Civil and Environmental Engineering, Cappadocia, Turkey, 8-10 May 2017, 443-452.

**Nasery M.M.**, Hüsem M., "Investigation the Seismic Performance of The Structures with Steel, Concrete and Composite Columns " International Conference on Civil and Environmental Engineering, Cappadocia, Turkey, 8-10 May 2017, 334-343.

**Nasery M.M.**, Hüsem M., "Behaviour of the Composite Column- Beam Connection under Cyclic Loading" 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul, Turkey, 21-23 September 2016.

- Nasery M.M.,** Hüsem M., "Effects of Shear Wall Location on Earthquake Resistance Design of Symmetric Structures", International Symposium on Natural Hazard and Hazard Management Symposium 2016, Karabük, Turkey, 2-4 March 2016, 056-061.
- Nasery M.M.,** Hüsem M., " Effects of Plan Balconies on Dynamic Behaviour of The Structure", International Symposium on Natural Hazard and Hazard Management Symposium 2016, Karabük, Turkey, 2-4 March 2016, 086-091.
- Nasery M.M.,** Hüsem M., "Plastik Boşluklu Kirişsiz Döşeme Sistemleri ile İlgili Bir Sentez Çalışması", Mühendislikte Yeni Teknolojiler Sempozyumu, Bayburt, Türkiye, 22-24 Ekim 2015, ss.141-149.
- Nasery M.M.,** Ergün M., Ateş Ş., Hüsem M., "Süneklik Düzeyi Yüksek Bir Binanın Dinamik Davranışına Deprem İzolatörlerinin Etkisinin Araştırılması ", Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı , İstanbul, Türkiye, 11-15 Mayıs 2015, ss.799-810.