

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

3 BOYUTLU ANALİZLERLE KAYA ŞEVİ İSLAH YÖNTEMLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ; HEMŞİN (RİZE) KAYA DÜŞMESİ ÖRNEĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehbare Yaren MUHCU

NİSAN 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**3 BOYUTLU ANALİZLERLE KAYA ŞEVİ ISLAH YÖNTEMLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ; HEMŞİN (RİZE) KAYA DÜŞMESİ ÖRNEĞİ**

Mehbare Yaren MUHCU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05/03/2024

Tezin Savunma Tarihi : 05/04/2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Zekai ANGIN

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

3 Boyutlu Analizlerle Kaya Şevi Islah Yöntemlerinin Değerlendirilmesi; Hemşin (Rize) Kaya Düşmesi Örneği konulu bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Yaptığım yüksek lisans tez çalışmam süresince, danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarımın yürütülmesi sırasında sahip olduğu bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen sayın Doç. Dr. Zekai ANGIN hocama teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tanıdığım günden beri yanımda olan, benden desteğini esirgemeyen, saygı değer hocalarım Prof. Dr. Hakan ERSOY, Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER, Öğr. Gör. Dr. Murat KARAHAN ve Prof. Dr. Arzu FIRAT ERSOY'a teşekkür eder, sonsuz minnetlerimi sunarım.

Bu noktaya gelmemde büyük emekleri olan, hayatımın tüm dönemlerinde maddi ve manevi destekçim olan, annem Selda MUHCU, babam Kamuran MUHCU ve canımdan çok sevdiğim kardeşim Yıldız Ceren MUHCU'ya şükranlarımı sunarım.

Mehbare Yaren MUHCU
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “3 Boyutlu Analizlerle Kaya Şevi Islah Yöntemlerinin Değerlendirilmesi; Hemşin (Rize) Kaya Düşmesi Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Zekai ANGIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/04/2024

Mehbare Yaren MUHCU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.3. Literatür Çalışması	2
1.4. Kaya Düşmesi Kavramı ve Kaya Düşmesinde Hareket Tipleri	10
1.5. Kaya Düşmelerinde Kaynak Zonu ve Yuvarlanma Zonu	11
1.6. Kaya Düşmelerine Neden Olan Faktörler	12
1.7. Kaya Kütlelerinde Yenilme Analizleri.....	13
1.7.1. Kinematik Analizler	13
1.7.2. Limit Denge Analizleri.....	17
1.7.3. 2 Boyutlu Analizler	17
1.7.4. 3 Boyutlu Analizler	18
1.8. Kaya Düşmelerinde İyileştirme Yöntemleri.....	19
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Coğrafik Durum ve Çalışma Alanı Hakkında Genel Bilgiler	24
2.2. Çalışma Alanının ve Çevresinin Jeolojisi	28
2.3. Çalışma Alanının Deprem Durumu.....	30
2.4. Arazi Çalışmaları.....	31
2.4.1. Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Setleri.....	32
2.4.2. Süreksizlik Ara Uzaklığı	33
2.4.3. Süreksizlik Açıklığı ve Dolgu	33
2.4.4. Süreksizliklerin Devamlılığı.....	33
2.4.5. Süreksizliklerin Pürüzlülüğü	34
2.4.6. Süreksizliklerin Yüzeylerinin Bozunma Derecesi.....	34

2.5. Laboratuvar Deneyleri.....	35
2.6. Yamaç Stabilite Analizleri	35
2.6.1. Kinematik Analizler (Dips Programı)	36
2.6.2. Limit Denge Analizleri.....	37
3. BULGULAR.....	40
3.1. Süreksizlik Özelliklerinin Belirlenmesi	40
3.2. Kaya Malzeme Özellikleri.....	43
3.3. Kaya Kütlesinin Jeoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	43
3.3.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	43
3.3.2. Hoek-Brown Yenilme Kriteri ve Kaya Kütle Dayanımı	45
3.4. Şev Stabilite Analizleri.....	48
3.4.1. Yapısal Denetimli Analizler (Kinematik Analizler).....	49
3.4.2. Limit Denge Analizleri.....	52
3.5. Kaya Düşme Analizleri	55
3.5.1. Kaya Düşme Sınıflama Sistemleri.....	55
3.5.2. 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri.....	60
3.6. Kaya Şevi Islah Çalışmalarının Projelendirilmesi.....	74
3.6.1. Bölge-1 İçin Kaya Şevi Islah Çalışmalarının Projelendirilmesi.....	76
3.6.2. Bölge-2 İçin Kaya Şevi Islah Çalışmalarının Projelendirilmesi.....	82
3.7. Uygulanması Önerilen Sistemin Özellikleri.....	82
3.7.1. Yüksek Kapasiteli Halka Ağ (Halkalı Panel Sistemi)	82
3.7.2. Çelik Grid Tel Ağ.....	84
3.7.3. Ankraj (Blon) Özellikleri	87
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
5. KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ.....	99

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

3 BOYUTLU ANALİZLERLE KAYA ŞEVİ ISLAH YÖNTEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ; HEMŞİN (RİZE) KAYA DÜŞMESİ ÖRNEĞİ

Mehbare Yaren MUHCU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Zekai ANGİN
2024, 98 Sayfa

Tez çalışması kapsamında Rize İli Hemşin İlçesi Çok Programlı Anadolu Lisesi güneydoğu kesiminde meydana gelen ve kapalı spor salonunun kısmen yıkılmasına neden olan kaya düşme vakası incelenmiş ve uygun kaya ıslah yöntemleri belirlenmiştir. Çalışma 4 aşamada gerçekleşmiştir. Bu aşamalar sırası ile; arazi çalışması, laboratuvar çalışması, 2-3 boyutlu analizler ve ıslah yöntemlerinin belirlenmesi şeklindedir.

Arazi çalışması kapsamında ilk olarak kaya şevinde kinematik analiz, limit denge ve 3 boyutlu analizler için gerekli olan süreksizlik özellikleri tespit edilmiştir. Sonrasında laboratuvar deneyleri için kaya şevinden blok örnekler temin edilmiştir. Arazi çalışmasının son aşamasında ise kaya düşme analizleri için gerekli olan harita insansız hava aracı (İHA) kullanılarak oluşturulmuştur.

Araziden alınan blok numunelerden örnekler hazırlanmıştır, karot numuneler ile kaya malzemesinin fiziko-mekanik özellikleri tilt deneyi ile süreksizlik yüzeyinin içsel sürtünme açısı tespit edilmiştir. Arazide ölçülen süreksiz özellikleri, haritalar ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kinematik analizler, limit denge analizleri ve 2-3 boyutlu kaya düşme analizleri yapılmıştır. Analizlerin bir sonraki aşamasında üretilen haritalar kullanılarak 2 ve 3 boyutlu kaya düşme analizleri ve hareket edecek blokların hızı, enerjisi, sıçrama yüksekliği ve çarpacağı yerler tespit edilmiştir. Böylelikle yeniden olabilecek kaya düşmelerine karşı spor salonu ve okulu koruyacak önlem ve ıslah yöntemleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya düşmesi, Kinematik Analiz, Hemşin, Kaya Islah Yöntemleri

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF ROCK SLOPE RECLAMATION METHODS WITH 3D ANALYSIS; HEMŞİN (RİZE) ROCKFALL CASE

Mehbare Yaren MUHCU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Doç. Dr. Zekai ANGIN
2024, 98 Pages

Within the scope of the thesis study, the rockfall incident that occurred in the southeastern part of the Multi-Program Anatolian High School in Hemşin District of Rize Province and caused partial collapse of the indoor sports hall was investigated and appropriate rock remediation methods were determined. The study was realized in 4 stages. These stages are; field study, laboratory study, 2-3 dimensional analysis and determination of remediation methods.

Within the scope of the field study, firstly, the discontinuity features required for kinematic analysis, limit equilibrium and 3D analysis were determined on the rock slope. Afterwards, block samples were obtained from the rock slope for laboratory experiments. In the last stage of the field study, the map required for rockfall analysis was created using an unmanned aerial vehicle (UAV).

Samples were prepared from block samples taken from the field, and the physico-mechanical properties of the rock material were determined with core samples and the internal friction angle of the discontinuity surface was determined by tilt test. Kinematic analyses, limit equilibrium analyses and 2-3 dimensional rockfall analyses were performed using the discontinuity properties measured in the field, maps and results obtained from laboratory experiments. In the next stage of the analyses, 2 and 3 dimensional rockfall analyses were performed using the maps produced and the speed, energy, jump height and impact locations of the moving blocks were determined. In this way, the measures to protect the sports hall and school against possible rockfalls were designed.

Key Words: Rockfall, Kinematic Analysis, Hemşin, Rock Remediation Methods

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	2 boyutlu kaya düşme simülasyonu	6
Şekil 2.	Uçhisar Kalesi çevresinin kaya düşme risk haritası	9
Şekil 3.	Yamaç eğimlerine göre kaya düşmelerinde gözlenen hareket türleri ve diğer morfolojik parametreler	11
Şekil 4.	Kaya düşmelerinde kaynak zonu ve yuvarlanma zonu	12
Şekil 5.	Düzlemsel Kayma Koşulu ve Kinematik Analizinin Esasları	14
Şekil 6.	Kama Tipi Kayma Koşulu ve Kinematik Analizinin Esasları	15
Şekil 7.	Devrilme Türü Duraysızlık Koşulu ve Kinematik Analizinin Esasları.....	16
Şekil 8.	İki boyutlu kaya düşme analizi ile kaya bloğunun yuvarlanma mesafesinin belirlenmesi örneği.....	18
Şekil 9.	Yamaç için yapılan üç boyutlu kaya düşme analiz örneği	19
Şekil 10.	Kaya düşmelerinde iyileştirme (önleme ve koruma) yöntemleri	21
Şekil 11.	Enerji kapasitelerine göre kaya düşmesi önleme yapıları	22
Şekil 12.	Çalışma alanının Google Earth uydu görüntüsündeki konumu	25
Şekil 13.	Proje konusu çok programlı lise güneybatısında bulunan ve kaya düşme vakasının yaşandığı kaya kütlesi ve çevresine ait ortofoto.....	26
Şekil 14.	Kaya düşme vakasının geliştiği kaya şevi (üst şekil) ve spor tesisin arka duvarını kırarak tesisin içine giren bloklar	27
Şekil 15.	Proje sahasını da içine alan Rize-Fındıklı-Hemşin çevresine ait jeoloji haritası	29
Şekil 16.	Proje sahasının AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasındaki konumu ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyine göre maksimum yer ivmesi değeri.....	30
Şekil 17.	Hakim süreksizlik yönünün tespit edilmesi (a), düzlemsel kayma analizi (b), kama tipi kayma analizi (c) ve devrilme türü analizler (d).....	37
Şekil 18.	Rocplane programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi	38
Şekil 19.	SWedge programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi	38
Şekil 20.	RocTopple programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi.....	39
Şekil 21.	Granodiyoritlerden oluşan kaya kütlelerindeki süreksizlik setlerine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) ve ana süreksizlik takımlarının konumları	40
Şekil 22.	Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiği ve kaya kütesine ait GSI değerleri	47
Şekil 23.	Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak belirlenen kaya kütle özellikleri.....	48

Şekil 24.	310/80 duruşlu şevlerde 4 nolu süreksizlikler boyunca düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	50
Şekil 25.	310/80 duruşlu şevlerde 2 ile 4 ve 3 ile 4 duruşlu süreksizlik setlerinin ara kesiti boyunca kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	50
Şekil 26.	310/80 duruşlu şevlerde 4 nolu süreksizlikler boyunca serbest düşme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	51
Şekil 27.	310/80 duruşlu şevlerde 1 nolu süreksizlik setlerinde devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi	51
Şekil 28.	Kama tipi kaymanın limit denge analizinde şev geometrisinin SWedge1 programına girilmesi.....	52
Şekil 29.	Kama tipi kaymanın limit denge analizinde süreksizlik koşullarının SWedge1 programına girilmesi.....	53
Şekil 30.	Kama tipi kaymanın limit denge analizinde deprem durumunun SWedge1 programına girilmesi.....	53
Şekil 31.	Kama tipi kaymanın limit denge analizinde boşluk suyu basıncının SWedge1 programına girilmesi (boşlukların %50'sinin su ile dolduğu varsayımı).....	54
Şekil 32.	Kama tipi kaymanın limit denge analizinde boşluk suyu basıncının SWedge1 programına girilmesi (boşlukların %50'sinin su ile dolduğu varsayımı).....	55
Şekil 33.	Çalışma alanı ve çevresinin nokta bulutu.....	61
Şekil 34.	Çalışma alanı ve çevresinin üçgen modeli	62
Şekil 35.	Çalışma alanı ve çevresinin eğim haritası	62
Şekil 36.	Çalışma alanı ve çevresinin bakı haritası	63
Şekil 37.	Çalışma alanı ve çevresinin yükseklik haritası	63
Şekil 38.	Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası.....	64
Şekil 39.	Kaynak bölgeden yuvarlana blokların izledikleri yollar.	64
Şekil 40.	Kaya düşme vakasının meydana geldiği kaya şevinin spor kompleksi ve çok programlı liseye göre konumu	66
Şekil 41.	Kaya şevinin üst kotlarında düşme riski bulunan bloklar	67
Şekil 42.	Blokların izledikleri yörüngeleri	68
Şekil 43.	100 kg'lık blokların enerji haritası	68
Şekil 44.	100 kg'lık blokların hız haritası	69
Şekil 45.	100 kg'lık blokların yükseklik haritası.....	69
Şekil 46.	100 kg'lık blokların risk haritası	70
Şekil 47.	100 kg'lık blokların durma noktaları haritası.....	70
Şekil 48.	Blokların izledikleri yörüngeleri	71

Şekil 49.	5 tonluk blokların enerji haritası	71
Şekil 50.	100 kg'lık blokların hız haritası	72
Şekil 51.	5 tonluk blokların yükseklik haritası	72
Şekil 52.	5 tonluk blokların risk haritası	73
Şekil 53.	5 tonluk blokların durma noktaları haritası	73
Şekil 54.	Bariyerlerin çarpma enerjisi bakımından test edilmesi	74
Şekil 55.	Bariyerlerin çarpma yüksekliği bakımından test edilmesi	74
Şekil 56.	Kaya ıslah çalışmalarında kullanılacak konumsal veriler	75
Şekil 57.	Bölge-1'de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarının hesaplanması	77
Şekil 58.	Bölge-1'de deflektör sisteminin kurulması ve düşen blokların oluşturduğu molozun temizlenmesi	78
Şekil 59.	Bölge-1'de deflektör sisteminin kurulması ve şev tabanı temizliği sonrası deflektör sisteminin uzatılması	79
Şekil 60.	Bölge-1'de deflektör sisteminin kurulması ve yamaç temizliğinin yapılması sonrası yamaç temizliği yapılan alana ağ serimi	80
Şekil 61.	Bölge-1'de deflektör sisteminin hasar görmesi durumunda tüm sistemin sökülerek tüm yamaca çelik ağ ve yüksek kapasiteli halka ağ uygulaması	81
Şekil 62.	Bölge-2'de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarının hesaplanması	82
Şekil 63.	Tek Halkanın Geometrisi	83
Şekil 64.	Uygulamada kullanılması önerilen mapa	83
Şekil 65.	Halka panel bağlantı görünümü	84
Şekil 66.	Tel Ağ Gözenek Açıklığı	85
Şekil 67.	Çelik Tel Ağ Rulosu (W: genişlik)	85
Şekil 68.	Çelik Halat	87
Şekil 69.	Topuk ankrajı	88

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Kaya düşmelerine karşı kullanılan önleme yapıları	23
Tablo 2. Süreksizlik setlerine ait eğim yönü ve eğim açısı değerleri	40
Tablo 3. Süreksizlik ara uzaklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için ortalama süreksizlik ara uzaklığı değerleri.....	41
Tablo 4. Süreksizlik açıklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik açıklığı değerleri.....	41
Tablo 5. Süreksizlik devamlılığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik devamlılığı değerleri.....	42
Tablo 6. Süreksizliklerin bozunma derecesi ile ilgili sınıflama	42
Tablo 7. Kaya kütesinden alınan blok örneklerden temin edilen karot örneklerinin fiziksel ve dayanım özellikleri.....	43
Tablo 8. Kaya sevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması.....	45
Tablo 9. Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak hesaplanan ve proje konusu kaya kütesinin mühendislik özellikleri.....	48
Tablo 10. 120/80 duruşlu şevlerde yapılan kinematik analiz sonuçları	49
Tablo 11. 270/72 ve 318/70 duruşlu süreksizliklerin ara kesiti boyunca gelişebilecek kama tipi kayma için limit denge analizleri	55
Tablo 12. Kaya yamacın kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012).....	57
Tablo 13. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu	60
Tablo 14. Halka panel teknik özellikleri	84
Tablo 15. Tel ağ özellikleri (EN 10223-3:2013, Tablo 2 uyarınca).....	86
Tablo 16. Standart Tel Ağ Ebatları.....	86
Tablo 17. Çelik tel için önerilen standartlar	86

KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

İHA	: İnsansız Hava Aracı
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
JRC	: Standart Pürüzlülük Sayısı
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ISMR	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
RMR	: Kaya Kütle Özellikleri
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
RQD	: Kaya Kalitesi Tanımı
UCS	: Tek Eksenli Basınç Dayanımı
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
kN	: Kilo Newton
MPa	: Megapascal
α	: Eğim Yönü
ψ	: Eğim Açısı
$\bar{\sigma}_{RK}$	: Kaymaya Karşı Güvenlik Katsayısı
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı
W	: Kayan Kütlenin Ağırlığı
u	: Boşluk Suyu Basıncı
F	: Güvenlik Katsayısı
H	: Şev Yüksekliği
A	: Kayan Kütlenin Taban Alanı
z	: Tansiyon Çatlağının Derinliği
z_w	: Tansiyon Çatlağındaki Suyun Yüksekliği
S	: Spektral İvme Katsayısı
σ	: Asal Gerilme
E_t	: Göçmeye Zorlayan Etkilerin Toplamı
R_t	: Göçmeye Karşı Koyan Etki ve Dirençlerin Toplamı
k	: Deprem Katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Türkiye'nin jeolojik, iklimsel ve morfolojik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda bir afet ülkesi olduğu açıktır. Ülkemizde erozyon, taşkın, çığ ve çölleşme gibi doğa kaynaklı afetler meteorolojik kökenli afetlerin ilk sıralarında yer alırken, kaya düşmesi, heyelan, deprem gibi afetlerse meteorolojik kökene sahip olmayan afetlerin en önemlilerindendir. Diğer ülkelerden farklı olarak, son elli yılda oluşan doğa kaynaklı afetlerin dağılımı incelendiğinde %45'lik oranla kaya düşmeleri ve heyelanlar en üst sırada, depremlerse %18'lik oranla ikinci sırada, %14'lük oranla taşkınlar üçüncü sırada bulunmaktadır. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin de giderek artmasının bir sonucu olarak ülke genelinde sadece 2019 yılında heyelan ve taşkınların diğer doğa kaynaklı afetler içerisindeki oranı %70'e ulaşmıştır (AFAD 2020).

Doğu Karadeniz Bölgesi ülkede iklim değişikliği kaynaklı olumsuz etkilerinin en fazla yaşandığı, oluşma sıklığı bakımından kaya düşmelerinin ve heyelanların; etki alanı bakımından da sel-taşkınların çok sık görüldüğü ve bu tür doğa kaynaklı afetlere bağlı olarak can ve mal kaybının en yüksek olduğu bölgedir (Akgün vd. 2008, Alemdağ vd. 2015, Kaya vd. 2016, Kul Yahşi ve Ersoy 2018, Ersoy vd. 2019, Dağ vd. 2020, Ersoy vd. 2020, Karahan vd. 2020). Ülke istatistikleri göz önünde bulundurulduğunda, Doğu Karadeniz Bölgesinde doğa kaynaklı afetlerden biri olan kaya düşmesi, heyelan ve taşkınlar %95'lik bu bölgede meydana gelmektedir (AFAD 2020).

Herhangi bir yerdeki ve boyuttaki bir kaya bloğunun dik olan bir şev veya yamaçtan düşey yönde meydana gelen hareketi kaya düşmesi olarak isimlendirilebilir. Kaya düşme olayları esnasında topoğrafya eğimine bağlı olarak yuvarlanma sıçrama (zıplama), serbest düşme şeklinde hareket türleri gözlemlenebilmektedir (Ritchie 1963). Düşen kaya bloklarının enerjisini kaybetmesi sonucu bloğun yuvarlanma hareketiyle birlikte blok kaymaları da meydana gelebilir.

Bölgemizde kaya düşmesi olayı yağışlı sezonlarda daha sık oluşmaktadır. Bunun en önemli sebebi yağışlı mevsimlerde kaya çatlakları içerisinde su bulunması ve donma çözülmeye maruz kalmasıdır (Altay 2015). Eğimli yamaçlar üzerinde bulunan kaya bloklarının, dış olayların etkisi sonucu harekete geçmesi kaya düşmesi olayıdır ve Doğu

Karadeniz Bölgesi'nde meydana gelen kaya düşmeleri en az heyelanlar kadar etkili olmaktadır.

Bu afet geniş alanlara yayılmamakla beraber lokal olarak da mal ve can güvenliği açısından riskler oluşturmaktadır.

Bu tür kaya kütle duraysızlıkları önemli mühendislik projelerinin yapımı sırasında veya proje ömrü boyunca meydana gelebilmektedir. Özellikle yamaç kazı çalışmalarında, kazısının yapıldığı alandaki kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri tasarımda göz önünde bulundurulması gereken temel parametredir. Kazı esnasında, ikincil gerilmeler doğal gerilmelerin yerini almakta ve ikincil gerilmeler sebebiyle meydana gelen farklı deformasyonlar kayaçların jeoteknik ve litolojik özelliklerine bağlı olarak duraysızlıklara sebep olmaktadır. Bu nedenle gerekli önlemlerin alınması sadece proje aşamasını değil sonrasını da kapsamalı, her mühendislik projesinde uygun yer seçimi kriterlerine dikkat edilmelidir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada Rize İli Hemşin İlçesi Çok Programlı Anadolu Lisesi güneydoğu kesiminde meydana gelen kaya düşme vakası incelenmiş, bu kapsamda;

1. Kaya süreksizlik ölçümleri ile kaya malzemesi üzerinde yapılan jeomekanik deneyler kullanılarak kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri ortaya konulmuş,
2. Mevcut şevde herhangi bir duraylılık probleminin olup olmayacağı kinematik ve limit denge analizleriyle belirlenmiş
3. Kaya düşme riski 3 boyutlu analizlerle değerlendirilerek olası bir kaya düşme vakasında, blokların hareket hızları, yüksekliği, enerjisi ve hareket yönleri belirlenmiş
4. Saha çalışmaları ve yapılan analizler bir bütün halinde değerlendirilerek kaya şevi ıslah çalışmalarına yönelik alternatif uygulama projeleri hazırlanmıştır.

1.3. Literatür Çalışması

Evans (2002), yaptığı çalışmada Kanada Ülkesinde bulunan Newfound yolunda meydana gelen kaya düşmelerini incelemiştir. Kaynak zonundan yamaç aşağı bırakılan kaya

bloklarının videosunu kaydetmiştir. Kaydettiği videolar ile blokların hız varyasyonlarını ve sıçrama yüksekliklerini belirlemeye çalışmıştır. Yaptığı çalışmalarda RocFall programının girdi parametrelerini araştırma alanına özel olarak belirlemiş ve kaya düşmesini önlemek amacı ile kaya tutma hendekleri ve kafes sistemler önermiştir.

Marquinez vd. (2003), İspanya’da bulunan, 20 km²’lik alan kaplayan çok dik bir yamaçta meydana gelebilecek kaya düşmesi tehlikesini ortaya koymak amacıyla jeolojik ve çevresel faktörleri dikkate alarak analizler yapmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda çalışma alanının %64’ünde düşük kaya düşme riski, %36’sında ise yüksek kaya düşme riski tespit etmişlerdir.

Schweigl vd. (2003), İtalya’nın Val d’Ega Vadisi’nde meydana gelen kaya düşmesi olaylarını incelemiş ve bu bölgede kaya düşmesine bağlı etkileri azaltmak için protik yaklaşımlar ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında RocFall programı ile yaptıkları 2 boyutlu kaya düşme analizleri neticisinde sıçrama yüksekliklerini, depolanma alanlarını ve güzergah uzunluklarını belirlemişlerdir. Elde ettikleri veriler sonucunda kaya çivileri, beton destekler ve güçlendirilmiş tel kafes önlemlerinin alınabileceğini belirtmişlerdir.

Guzzetti (2004), yaptığı çalışmada İtalya’da bulunan Nera Nehri Vadisi’nde 48 kilometrekarelik bölgesinde meydana gelen kaya düşmelerini incelemiş ve bu bölgede aktif olarak kullanılan karayolunun risk altında olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında öncelikle kaya düşme vakalarının sıklığını belirlemek amacı ile önceki saha çalışmalarını gözden geçirmiştir. Sonrasında kaynak zonunu ayrıntılı olarak incelemiş, blokların çarpma sıklığını ve hacimsel boyutlarını istatistiksel olarak değerlendirmiştir. Son olarak STONE adlı kaya düşme simülasyon programını kullanarak, kaya düşme riski altındaki yol üzerinde 3 boyutlu analizler yapmıştır. Yaptığı analizler sonucunda blokların sıçrama yüksekliği, hızı ve yuvarlanma mesafesi gibi parametreleri belirlemiştir.

Dorren vd. (2004), Alp’ler’de çok sık meydana gelen kaya düşmelerini incelemişlerdir. İlk olarak bölgenin jeomorfolojik haritasını çıkarmış, sonrasında kaynak zonlarında, düşme potansiyeli olan kaya kütlelerindeki süreksizlikleri ölçmüşlerdir. Kayaların yenilme mekanizmalarını kinematik analizler ile belirlemişlerdir. Düşme riski olan birçok blok tespit etmişler ve riskli bölgeyi kaynak zondan başlayarak haritalandırmışlardır. Aynı zamanda iri bitki örtüsünün de kaya düşme vakaları üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Topal vd. (2007), Afyon Kalesi ve çevresini olumsuz etkileyebilecek kaya düşme risklerini değerlendirmiş; dokuz profil hattı için toplam kinetik enerji, sıçrama yüksekliği, durma mesafesi ve ötelenme hızı sonuçlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda

bu bölgenin kaya düşmelerinden etkilenmemesi için kale yamacında duraysızlık oluşmasına sebep olabilecek blokların kaya bulonları kullanılarak sabitlenmesi ve kaya düşmelerinden korunmak amacı ile esnek bariyer uygulamasını önermişlerdir.

Tuncay (2009), yaptığı çalışmada Kapadokya bölgesinde ignimbiritlerde oluşan kaya bloklarının kritik yenilme gerilmeleri ve duraysızlıkları arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Bölgedeki farklı kaya düşme vakalarını seçmiş ve kopma yüzeylerini incelemiştir. Zamana bağlı olarak kayanın dayanımının azalması sebebi ile yenilmeler meydana gelmektedir. Kayaların uzun dönem dayanımlarını tahmin edebilmek amacıyla klasik kısa dönemli laboratuvar deneyleri ile yenilmeleri analiz etmiştir. Bölgenin farklı noktalarından kaya örnekleri alarak bu örnekler üzerinde Brazilian (dolaylı çekme) ve tek eksenli basma dayanımı deneyleri uygulamıştır. Seçilen her kaya düşme olayında basitleştirilmiş geriye dönük analizler yapılmış, blokların tek eksenli sıkışma dayanımları ve yenilme yüzeyinin çekilme dayanımlarını hesaplamıştır. Geriye dönük analizlerden ve laboratuvar deneylerinden elde ettiği sınır değerleri karşılaştırmış ve bu karşılaştırılan değerlerin birbirine çok yakın olduğunu görmüştür.

Binal ve Ercanoğlu (2010), Manisa'nın Kula İlçesi'nde bulunan Jeopark sahasındaki kaya düşme potansiyelini araştırmışlardır. Kaya düşmelerindeki en önemli etkinin erozyon ve litoloji olduğunu, ayrıca deprem ve yağışların kaya düşmelerinin olası sebeplerinden olabileceğini belirtmişlerdir. Hareket eden kaya bloklarının ilk hızlı olarak kabul etmişlerdir ve farklı şev profillerinde analiz yapmışlardır.

Topal vd. (2012) yaptıkları çalışmada Kastamonu Kalesi ve çevresinde meydana gelebilecek kaya düşme tehlikelerini değerlendirmişlerdir. Yaptıkları değerlendirmeler sonucunda kaya düşmesi tehlike haritaları oluşturmuşlardır. İlk olarak kaya düşme kaynaklarında çok sayıda süreksizlik ölçümü yaparak ana eklem setlerini belirlemişlerdir. Sonrasında kinematik analizler ile hakim süreksizlik takımlarını belirleyerek, kaya bloklarının kopmasında etkili süreksizlik kontrollü duraysızlık modellerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar farklı şev geometrilerinde geriye dönük analizler ile normal ve teğetsel geri verme katsayısını belirlemişlerdir. Son olarak sahaya ait girdi parametrelerini kullanarak, farklı şev geometrileri için kaya düşme analizleri yapmışlardır ve bu çevredeki kaya düşme tehlike haritasını hazırlamışlardır.

Mignelli vd. (2012), yaptıkları çalışmada kaya düşmesine maruz kalan yollar için risk analizi ve yönetim prosedürlerini tartışmışlardır. Yazarlar, belirlenen bir yol için olası kaya düşme riskinin eşik değerini tanımlayabilmek için bir hesap yöntemi geliştirmişlerdir.

Geliştirdikleri yöntemde kaya düşme riskini bir olay ağacı yaklaşımı ile hesaplamaktadırlar. Kaya düşme riski, yol güvenliğini değerlendirmek amacıyla hesaplama eşikleri ile karşılaştırılır. Riski makul seviyeye düşürmek için ilave koruyucu önlemlere ihtiyaç duyulur. Geliştirdikleri, Kaya Düşmesi Riski Yönetim Değerlendirmesi Yaklaşımı, nicel bir yöntemdir ve İtalya'da bulunan Bard Aosta Vadisi'nde bulunan bir test alanında başarı ile uygulanmıştır.

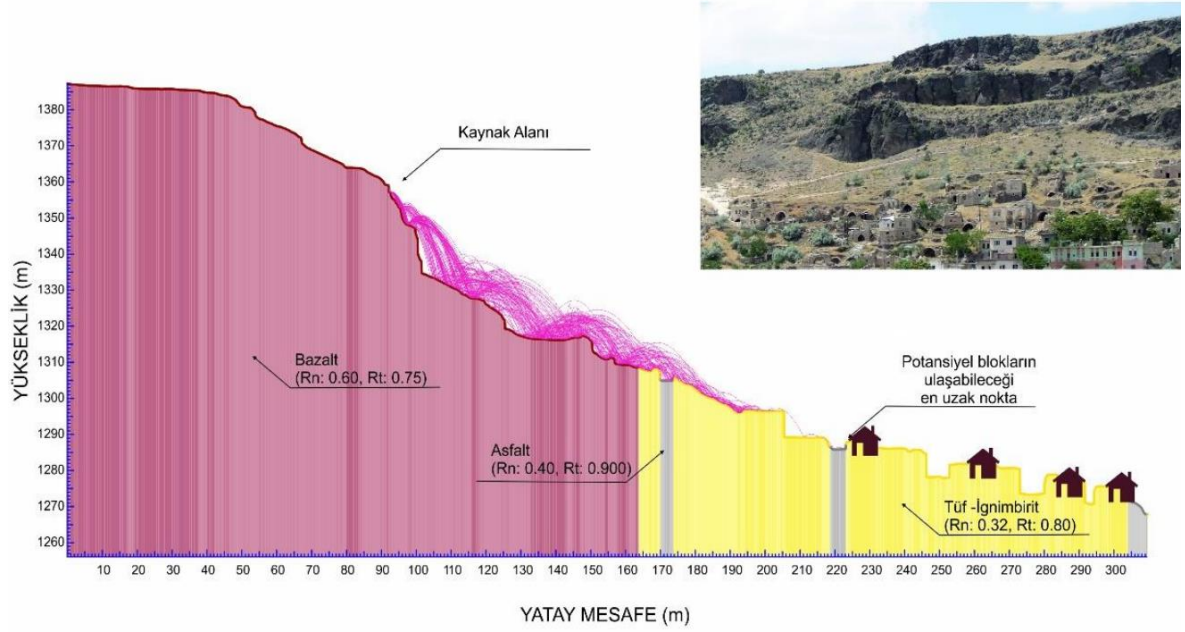
Pappalardo ve Minao (2015), Kuzey Sicilya'da bulunan, yoğun bir yerleşim alanı olan Castelmola'da son yıllarda kaya düşmeleri meydana gelen yamaçta analizler yapmışlardır. Bu bölgede risk haritası oluşturabilmek için kaya düşmesi simülasyonları, jeoyapısal araştırmalar, kinematik ve jeomekanik stabilite analizleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda bölgenin kaya düşme riskinin çok yüksek olduğunu ve acilen uygun iyileştirme çalışmalarının yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Şaraldı (2015), Nevşehir ili Acıgöl İlçesi'nde bulunan yeraltı şehri ve çevresinde meydana gelebilecek kaya düşme riskini incelemiştir. Yaptığı çalışmada 2B kaya düşme analizleri ve kinematik analizler kullanmıştır. Analizler sonucunda ayrışmanın ve süreksizliklerin kaya kütle duraysızlıklarını kontrol ettiğini gözlemlemiştir. İki boyutlu analizlerden elde ettiği, kaya bloklarının yuvarlanacağı en uzak mesafeyi dikkate alarak yeraltı şehri çevresinde bulunan yollarda ve yığma yapılarda kaya düşmesi sebebi ile oluşabilecek olumsuz etkilere karşı tedbir alınması gerektiğini söylemiştir.

Dinçer vd. (2016), yaptıkları çalışmada Tatların yeraltı şehri çevresinde meydana gelebilecek kaya düşme riskini araştırmışlardır. İlk olarak detaylı bir mühendislik jeolojisi çalışması yapmışlar, sonrasında üç boyutlu sayısal arazi modelinde HY-STONE kullanarak kaya düşme simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Tatların yeraltı şehri çevresinde gözlenen duraysızlıkların, kaya kütlelerinin mekanik özellikleri ve değişik mekanik davranışlara sahip iki farklı litolojinin etkileşimi ile kontrol edildiğini vurgulamışlardır. Düşen blokların boyutunu kaya kütlelerinin özelliklerinin ve mekanik davranışlarının kontrol ettiğini belirtmişlerdir.

Ei (2017), Ankara Kalesi ve çevresinde meydana gelebilecek kaya düşmelerini incelemiştir. Öncelikle arazi çalışmaları ve laboratuvar deneyleri yaparak iki ve üç boyutlu analizler için gerekli olan verileri elde etmiştir. Yaptığı analizler sonucunda gevşemiş ve düşmüş blokların kaldırılması gerektiğini, kaldırılamayan blokların ise yerine sabitlenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Koçyiğit (2017), tez çalışması kapsamında Nevşehir'in Göre İlçesi'nde doğal miras için tehdit oluşturan kaya kütle duraysızlıklarının oluş mekanizmasını ve bu süreç üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek amacı ile laboratuvar ve arazi çalışmaları, 2 boyutlu simülasyonlar ve kinematik analizler yapmıştır. Yaptığı analizler sonucunda, çalışma sahasının orta ve güney bölümünde daha büyük bir risk olduğunu belirlemiştir.



Şekil 1. 2 boyutlu kaya düşme simülasyonu (Koçyiğit, 2017)

Çapar (2018), yaptığı çalışmada kaya düşme analizlerinde kullanılan gerekli girdi parametrelerinden biri olan geri verme katsayısının etkisini analitik yöntemlerle ve deneysel olarak incelemiştir. Yaptığı araştırmada MATLAB programı ile yazılan N-TEK programından ve RocFall programından elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır.

Mineo vd. (2018), İtalya'da Doğu Sicilya'nın en değerli kültürel miraslarından Taormina Şehri'nin yamaçlarında duraysızlıktan kaynaklanan tehlikeyi, kaya düşme analizleri ile incelemiştir. Yersel Lazer Tarayıcı (TLS) ölçme tekniği ve kaya kütlesi araştırmaları ile tehlikeli bölgeleri saptamak amacıyla niteliksel Gelişen Kaya Düşmesi Tehlike Değerlendirmesi (ERHA) kullanmışlardır. Kinematik analizler sonucunda süreksizlik kontrollü yenilmelerin devrilme ve kama tipi/düzlemsel kayması ile temsil edildiğini görmüşlerdir. Olası kaya düşmeleri için yapılmış simülasyonların kinetik enerji ve

kaya düşme hatları açısından ileride meydana gelebilecek kaya düşmelerinin olumsuz etkilerinin incelenmesine ışık tutmuştur.

Özata ve Arun (2018), yaptıkları çalışmada Ortahisar Kalesi çevresinde bulunan kaya şevlerini inceleyerek, kalenin stabilite sorunlarını analiz etmeyi ve çözüm yöntemleri oluşturmayı amaçlamışlardır. Kaya örneklerinin kimyasal, mineralojik, petrografik, mekanik özelliklerini ve kaya malzemesindeki bozunmayı incelemişlerdir. Şevlerde bulunan süreksizliklerin kaya düşmeleri açısından önemli olduğunu ve bozunma sürecini olumsuz etkilediğini vurgulamışlardır.

Kırbaş (2019), yaptığı çalışmada Eskişehir’e bağlı Kızılınler Köyü’ndeki kaya düşme vakalarını incelemiştir. Köyün yamaçlarında bulunan blokların iki boyutlu analizlerini yapabilmek için ilk olarak arazi ve laboratuvar deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda elde ettiği verileri kullanarak iki boyutlu analizler yapmış ve blokların tren yolu için risk oluşturduğunu tespit etmiştir.

Keskin (2019), Zonguldak İlinde bulunan Kilim Yolu’nda kaya düşmesi potansiyelini incelemiştir. İlk olarak arazide süreksizlik analizleri yapmıştır ve laboratuvar deneylerinde kullanmak için örnekler almıştır. Alığı örnekleri kullanarak yaptığı deneyler sonucunda kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Elde ettiği verileri kullanarak iki boyutlu kaya düşme analizi yapmıştır. Analizler sonucunda düşen blokların yol için tehlike teşkil ettiğini gözlemlemiş ve beton bariyer yapılmasını önermiştir.

Alptekin (2020), yaptığı çalışmada aşırı yağış sonucu Mersin İlinde bulunan Karahıdırlı Mahallesi’nde meydana gelen kaya düşme vakasını incelemiştir. Düşen bloğu ve izlediği güzergahı üç boyutlu modellerini oluşturmuş ve kaya düşmesi analizleri yapmıştır.

Çelik ve Narsery (2021), Trabzon İli Maçka İlçesinde bulunan Güney Mahallesinde Kanlıpelit ve çevresinde yaptıkları çalışmada alternatif kaya ıslah çözümlerini araştırmışlardır. İlk olarak laboratuvar ve arazi deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda elde edilen verileri kullanarak iki boyutlu analizler yapmışlar ve yaptıkları analizler sonucunda blokların sıçrama yüksekliğini, enerjilerini ve hızlarını tespit etmişlerdir. Elde ettikleri verileri dikkate alarak eğimi çok yüksek arazilerde uygulanan çelik bariyere alternatif olarak toprakarme duvarlar uygulanması yapılması yönünde çalışmalar yapmışlardır. Veriler ışığında toprakarme duvarı boyutlandırmış ve iki boyutlu analizler ile duvarın performansını test etmişlerdir. Yaptığı testler sonucunda toprakarme duvarın düşen kaya bloklarını tuttuğunu tespit etmişlerdir.

Akın vd. (2021), yaptıkları çalışmada, Ürgüp'ün Akköy ilçesinde bulunan kaya tutma hendeğinin performansını, üç boyutlu sayısal yüzey modeli üzerinde kaya düşme analizleri yaparak değerlendirmişlerdir. Buna ek olarak otomatik görüntü işleme yöntemini kullanarak mevcut hendeğin derinliğini azaltmış ve arttırmış, buna bağlı olarak hendeğin kaya tutma oranındaki değişimi incelemişlerdir. Yaptıkları simülasyonlar sonucunda hendek derinliğinin, hendek performansında çok önemli bir etkisi olduğunu tespit edilmiştir. Kaya tutma hendeği içerisinde zamana bağlı olarak biriken bloklar sebebi ile hendek derinliğinde oluşacak azalmanın, hendek verimliliğini önemli ölçüde düşüreceğini ifade etmişlerdir.

Sengani ve Mulenga (2021), yaptıkları çalışmada Güney Afrika'nın Limpopo Vilayetinde bulunan R518 yolunda meydana gelebilecek kaya düşmeleri için analizler yaparak kaya düşme tehlike matrisi tablosu geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Kinematik analizler ile süreksizlik kontrollü yenilme türlerini ortaya koymuşlardır. Kaya düşmesini etkileyen parametreleri belirleyebilmek amacıyla RocFall programını kullanmışlardır. Kullanılan bu program aynı zamanda düşen, yuvarlanan ve zıplayan kayaların kinetik enerjisinde meydana gelen değişimleri gözlemek için de kullanılmışlardır. Rocfall programı ile yapılan simülasyonlar şev açısının, şev yüksekliğinin ve bitki örtüsünün düşen blokların yuvarlanma mesafesi ve hızı üzerinde önemli etkisinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Sayısal ve ampirik bulguları kullanarak kaya düşmesi tehlike derecelendirme tablosu geliştirmişlerdir.

Arslantürk (2022), Erzurum ili İspir ilçesi Yedigöller köyü yamaçlarında tehlike oluşturan kayaların olası hareketleri sonucunda meydana gelecek etkileri ortadan kaldırmak amacıyla laboratuvar ve arazi çalışmaları yapmış, bu çalışmalar sonucunda elde ettiği verileri kullanarak koruma ve önleme yöntemleri önermiştir. Koruma yapılarını RocPro3D ve RocFall yazılımlarını kullanarak tasarlamıştır.

Bulut (2022), Nevşehir ilinde yer alan ve bu bölgenin en önemli turizm merkezlerinden biri arasında olan Uçhisar Kalesi'nde meydana gelebilecek kaya düşmelerini iki ve üç boyutlu analizler ile incelemiştir. Üç boyutlu analizlerde, insansız hava aracı (İHA) kullanılarak elde edilen fotoğraflardan, fotogrametrik yöntemler ile elde edilen nokta bulutu ile hazırladığı sayısal yüzey modellerini kullanmıştır. Yaptığı analizler sonucunda blokların sıçrama yüksekliğinin 20 m'nin üzerine çıkabileceğini, bu sebeple olası kaya düşme vakalarına karşı tedbir alınması gerektiğini ortaya koymuştur.



Şekil 2. Uçhisar Kalesi çevresinin kaya düşme risk haritası (Bulut, 2022)

Caymaz (2023), Mersin ili, Erdemli ilçesinde bulunan, geçmişte çok sayıda kaya düşmesi gerçekleşen afete maruz bölgede araştırmalar yapmıştır. İlk olarak insansız hava aracı ile yüksek çözünürlüklü ortofoto ve nokta bulutu verisi üreterek çalışma alanının sayısal haritasını oluşturmuştur. Geçmişte düşen kaya bloklarının ve düşme riski olan kaya bloklarının konumlarını belirlemiştir. Sonrasında kaynak kaya olan kireçtaşlarının jeolojik özelliklerini de dikkate alarak üç boyutlu analizler yapmıştır. Yaptığı analizler sonucunda blokların maksimum sıçrama yüksekliği ve kinetik enerjilerinin sönümlendiği mesafeleri dikkate alarak koruma yöntemlerini değerlendirmiştir.

Okuyay (2023), yaptığı tez çalışması kapsamında, bulunduğu coğrafya sebebi ile taşkın, kaya düşmesi, deprem ve sel gibi doğal afetler ile daima karşı karşıya kalan Amasya ilindeki kaya düşme tehlikesi ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Yüksek çözünürlüklü SYM verileri üzerinden kaya düşme potansiyeli taşıyan kaynak zonlar ve düşmüş olan kaya bloklarının ortalama boyutlarına göre Rockfall programından 192000 adet kaya düşmesi simülasyonu gerçekleştirmiştir. Simülasyonlar sonucunda çalışma alanının büyük bir bölümünde kaya düşmesi tehlikesinin devam ettiğini ve düşen blokların ilerleme potansiyeli göz önüne alındığında, birçok bloğun yerleşim birimine ulaşabileceğini görmüştür.

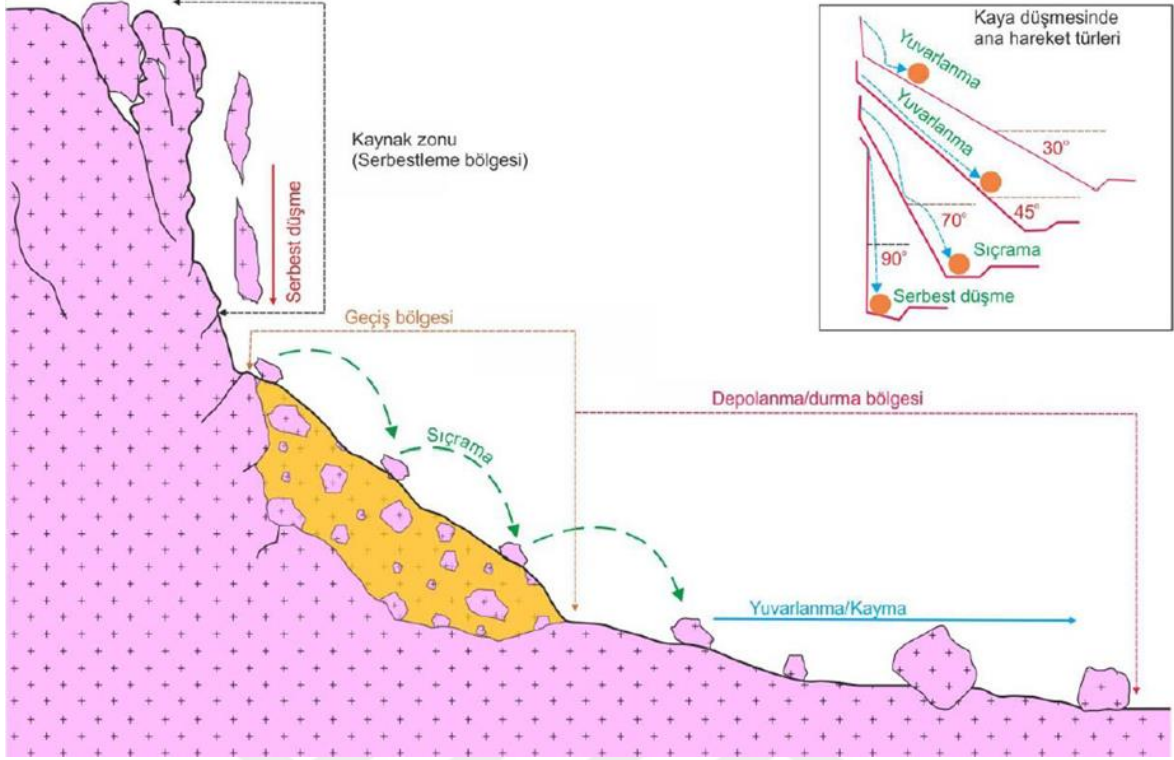
1.4. Kaya Düşmesi Kavramı ve Kaya Düşmesinde Hareket Tipleri

Kaya düşmesi, eğimli ve dik yamaçlarda-şevlerde bulunan farklı kaya bloklarının, iç ve dış olaylar etkisi ile hareket etmesi olayıdır. Aşınmaya-ayrışmaya karşı dayanıklı olmayan kısımların aşınmasıyla altı boşalan kaya kütlelerinde oluşan büyük çatlaklar zamanla giderek ilerler, böylece parçalanan kayalar şev-yamaçtan eğim aşağı düşer ya da yuvarlanırlar. Kaya düşmelerine sebep olan bir başka dış etkende titreşimdir (Altay 2015).

Kaya düşme-yuvarlanma olayları, dağlık ve engebeli arazilerde, kazı şevlerinde, açık maden ocaklarında meydana gelen bir doğal kaynaklı afettir.

Kaya düşme olayları neticesinde mühendislik yapılarında ve çeşitli ulaşım aksamalar, araçlarda hasarlar ve bundan kaynaklı ekonomik hasarlar oluşabileceği gibi, düşen kayalar can kayıplarına da sebep olabilmektedir. Öteki doğa kaynaklı afet türleri ile karşılaştırıldığında her ne kadar daha sınırlı bir bölgede etkili olsalar da kaya düşmelerinin binalara ya da insanlara ciddi zarar vermektedirler (Dinçer 2016).

Kaya düşmesi, farklı boyuttaki kayaların eğimli olan bir yamaç ya da şevden düşey yönde hareketi olarak tanımlanmaktadır. Kaya düşmeleri esnasında topoğrafyanın eğimine göre olarak sıçrama (zıplama), serbest düşme, yuvarlanma şeklinde gelişen hareket çeşitlerinden oluşmaktadır (Şekil 3). Hareket eden kaya bloklarının sahip olduğu enerjiyi yitirmesiyle bloğun yuvarlanma hareketiyle blok kayması da meydana gelebilir.



Şekil 3. Yamaç eğimlerine göre kaya düşmelerinde gözlenen hareket türleri ve diğer morfolojik parametreler (Ritchie 1963, Evans and Hungry 1993, Fanos ve Pradhan 2018)

Kaya düşmeleri, şev yüzeylerinde meydana gelen bir duraysızlık türüdür. Şev yüzeyleri oldukça heterojen ortamlar olduğundan belirsizlikler çok fazladır ve değerlendirmelerde hata payı yüksektir.

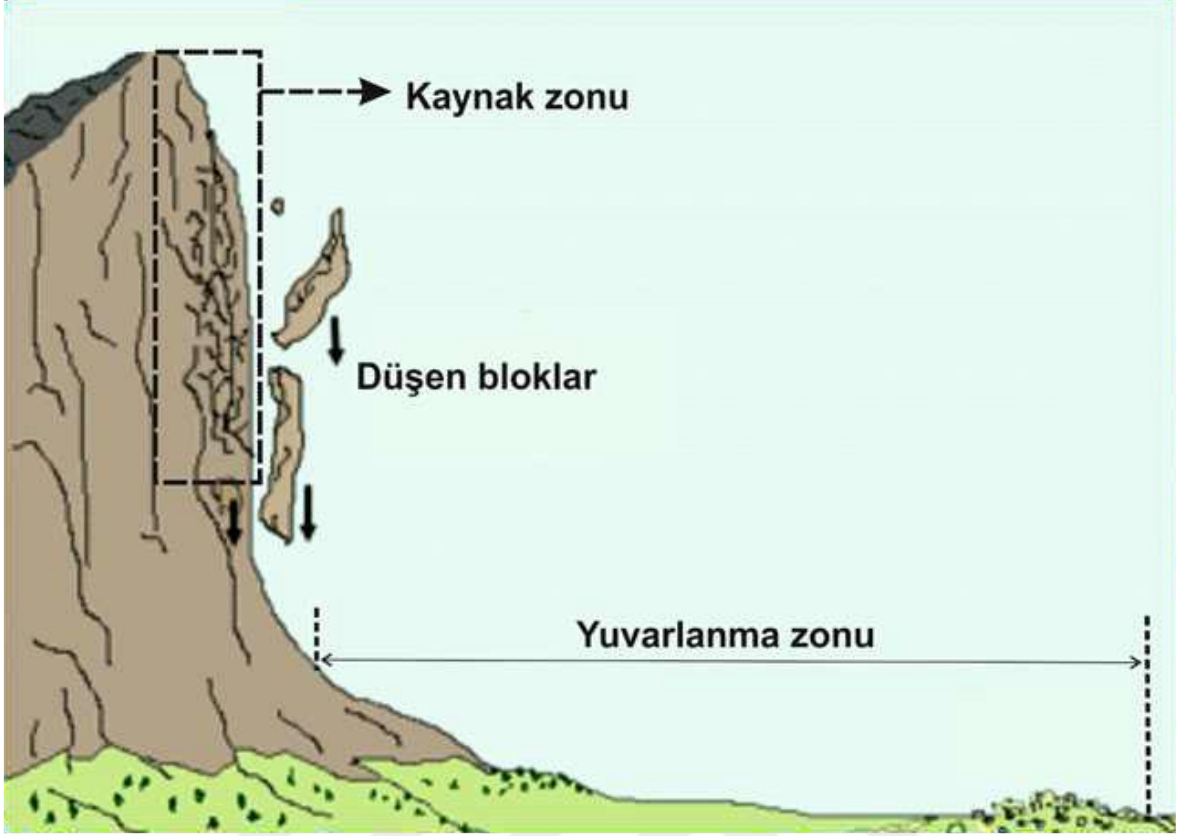
Kaya düşmelerini etkileyen; şev açısı, şev pürüzlülüğü, şev yüksekliği, bitki durumu, blok boyutu, jeolojik yapı, blok şekli, jeomorfolojik yapı gibi birçok faktör vardır.

1.5. Kaya Düşmelerinde Kaynak Zonu ve Yuvarlanma Zonu

Kaya düşme olaylarında hareketin meydana geldiği hat, yüzey şekline, topografik eğime, depolanma durumlarına ve jeolojik yapılara bağlı olarak farklı alanlara ayrılmaktadır.

Kayaların çeşitli sebeplerden ötürü kaya kütesinden ayrılarak yerçekimi etkisi ile düşme hareketine başladığı ilk kesime “kaynak zonu” denir.

Kaynak zonlar çoğunlukla dik bir topografik eğime sahip, kırıklı ve çatlaklı bir yapıya sahiptir. Kaynak zonundan kopan kaya blokları, yaptıkları düşme hareketinin ardından yamaç-şev üzerinde yuvarlanarak ya da sıçrayarak hareketlerini sürdürmeye devam ederler ve kaya düşme olaylarında bu alan “yuvarlanma zonu” olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4. Kaya düşmelerinde kaynak zonu ve yuvarlanma zonu (Koçyiğit, 2017)

1.6. Kaya Düşmelerine Neden Olan Faktörler

Kaya düşme olayları, değişik dış ve iç kaynaklı kuvvetlerin etkili olduğu alanlarda oluşmaktadır. Kaya düşme olaylarını başlatan birden farklı etken söz konusudur. Bu etkenler yapısal, insan kaynaklı ve çevresel olarak başlıca üç ana gruba ayrılmaktadır. Üç ana gruba ait alt faktörler ise şu şekildedir;

1. Yapısal faktörler
 - a) Yamaç veya şevin jeolojik özellikleri
 - b) Süreksizlik yüzeylerinin özellikleri
 - c) Kırıklı ve çatlaklı kaya kütlesi
2. Çevresel faktörler
 - a) Yağış
 - b) Donma ve çözünme
 - c) Fırtına-Rüzgar
 - d) Ani Kar erimeleri

- e) Ani yağışlar kaynaklı yüzeysel akışlar
 - f) Su sızıntılar
 - g) Hayvanlar
 - h) Fiziksel ve kimyasal ayrışma
 - i) Bitki ve ağaç kökleri
 - j) Doğal titreşimler
3. İnsan Kaynaklı
- a) Kontrolsüz yapılan patlatma uygulamaları
 - b) Büyük inşaat araçlarının ve trenlerin oluşturduğu yapay sarsıntılar
 - c) Uygun olmayan kazı şevi tasarımları

1.7. Kaya Kütlelerinde Yenilme Analizleri

Kaya düşme tehlikesinin ortaya koyulabilmesi için ilk olarak kaya düşmesi analizleri yapılarak; düşen kaya bloklarının ulaşabileceği en uzak mesafe, düşen kaya bloklarının maksimum sıçrama yüksekliği, düşen blokların hızı ve kinetik enerjisi belirlenmelidir.

Kaya düşme sorunu olan arazi ve kaynak noktası belirlendikten sonra gerçekleştirilen analizler sonucunda maksimum yuvarlanma mesafesi göz önüne alınarak kaya düşmesi tehlike haritaları hazırlanır.

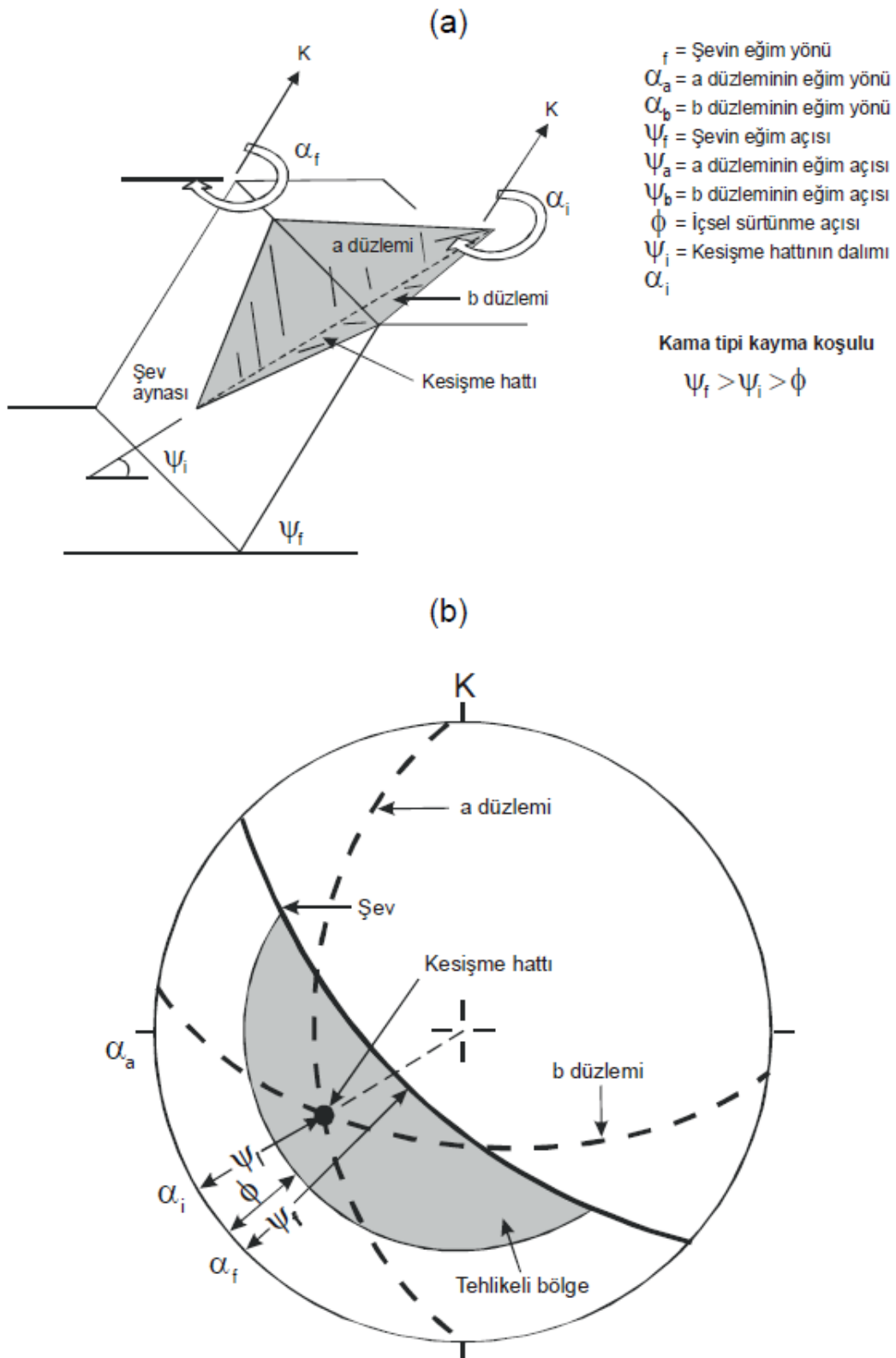
1.7.1. Kinematik Analizler

Ayrıntılı analizler yapmaya başlanmadan önce, stabilitenin süreksizlik takımları tarafından kontrol edildiği kaya kütlelerinde duraysız ve duraylı olabilecek şevlerin ayırt edilebilmesi amacı ile kinematik analiz yöntemlerine başvurulur.

Bu yöntemde; kama tipi kayma, düzlemsel kayma ve devrilme türü duraysızlıklar incelenir ve yalnızca; süreksizlik yüzeylerine ait içsel sürtünme açısı, şevin duruşu ve süreksizliklerin yönelimi dikkate alınır. Bunların dışında kalan; şev geometrisi, yeraltı suyu koşulları, dış yükler, kohezyon, dinamik yükler ve kayan kütlenin ağırlığı gibi etkenler ise göz ardı edilir.

(b) Düzlemsel kaymanın kinematik analizi

Şekil 5. Düzlemsel Kayma Koşulu ve Kinematik Analizinin Esasları (Norrish ve Wyllie, 1996)



1.7.2. Limit Denge Analizleri

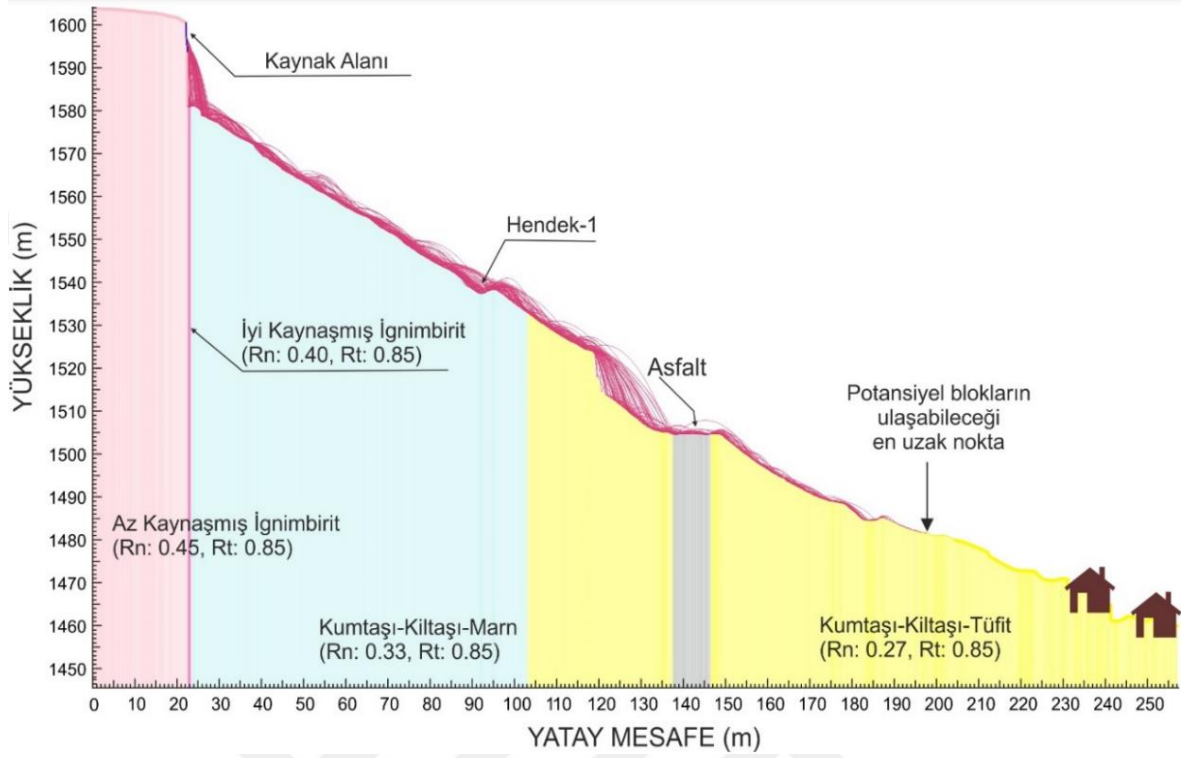
Limit denge analizleri, duraysızlık modellerine bağı olarak, kayan kütlenin dilimlere ayrılması ve ilk olarak her dilimin ayrı ayrı dikkate alınarak, sonrasında bütün dilimler birlikte göz önünde bulundurularak kayan kütlenin dengesinin tespit edilmesi ve incelenen şev için en küçük güvenlik katsayısının hesaplanması esasına dayanır. Hesaplamalar yapılırken yenilme yüzeyinin üzerinde bulunan malzeme serbest kütle şeklinde varsayılır.

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi_p - u - v \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + v \cos \psi_p} \quad (1)$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen güvenlik katsayısı, yalnızca incelenen yenilme yüzeyi için geçerlidir. En küçük güvenlik katsayısını veren kritik kayma yüzeyi belirlenene kadar hesaplamalar yapılmaya devam edilir. Hesaplanan en küçük güvenlik katsayısı, incelenen duraysızlık türü için o şevin güvenlik katsayısı olarak kabul edilir.

1.7.3. 2 Boyutlu Analizler

Topografik haritalar üzerinden alınan kesit hatları boyunca yapılan kaya düşme analizleri iki boyutludur, X ve Z düzlemi üzerinde gerçekleşir. İki boyutlu analizler; yazılımlara daha kolay erişilebilmesi, kolay ve hızlı uygulanabilir olması sebebi ile sıklıkla tercih edilse de yuvarlanma alanının tespit edilememesi, düşen bloğun yamacın 3 boyutlu şeklinin yuvarlanma hattı ve hareket üzerindeki etkisinin belirlenememesi dezavantajlarına sahiptir.



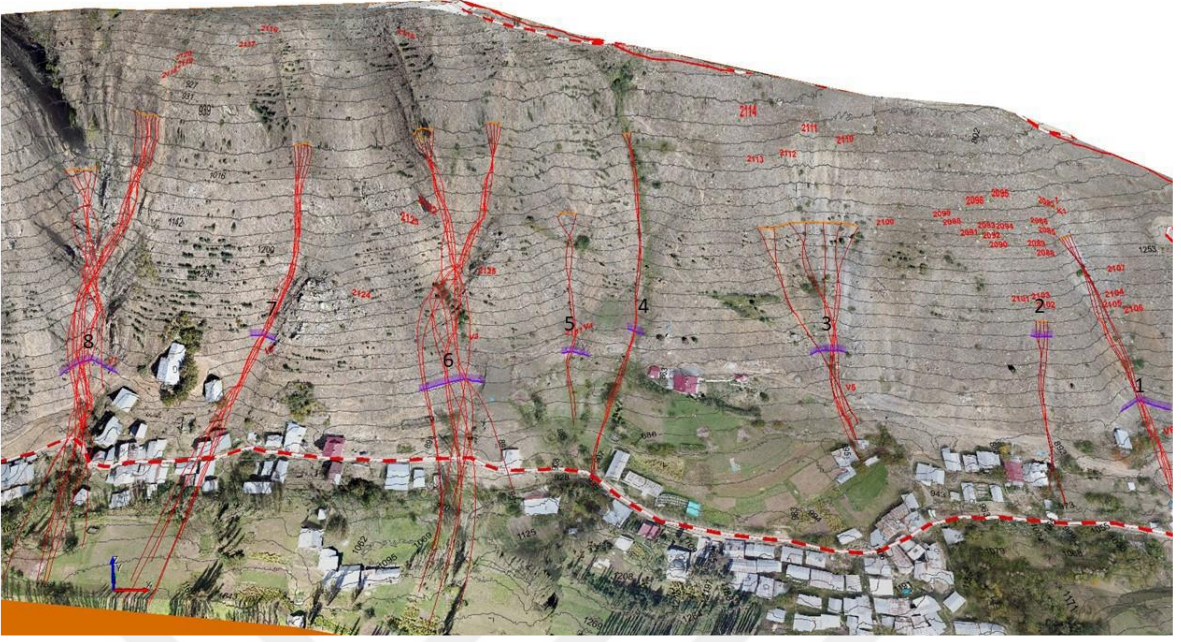
Şekil 8. İki boyutlu kaya düşme analizi ile kaya bloğunun yuvarlanma mesafesinin belirlenmesi örneği (Buz, 2019)

1.7.4. 3 Boyutlu Analizler

Topografyada bulunan düzensizliklerin, kaya düşme hatlarının yöneliminin ve yuvarlanma mesafelerinin üstünde önemli bir etkisi vardır. Bu etkileri incelemek ve daha doğru veriler elde etmek amacı ile X, Y ve Z düzlemleri üzerinde gerçekleştirilen 3 boyutlu analizler kullanılır.

Kaya düşme simülasyonları yazılımlar yardımı ile kaya bloklarının harekete başladığı noktadan itibaren düşüş hızları, kaya bloklarının şekli, kaya bloklarının ağırlığı yüzeyin jeolojisi ve üç boyutlu yüksek çözünürlüklü sayısal arazi modeli gibi birçok girdi parametresi kullanılarak yapılır. Yapılan analizler ile kaya bloklarının hareketleri sırasındaki sıçrama yükseklikleri, maksimum yuvarlanma mesafeleri, kinetik enerjileri, blokların hareketinin izi gibi çıktılar elde edilebilir.

Bu analizlerde Hy-STONE, Rockfall, Rotomap, RocPro3D, Rockyfor3D, Rockfall Analyst gibi yazılımlar kullanılmaktadır.



Şekil 9. Yamaç için yapılan üç boyutlu kaya düşme analiz örneği (Arslantürk, 2022)

1.8. Kaya Düşmelerinde İyileştirme Yöntemleri

Kaya düşme olaylarında can ve mal kaybına engel olmak için öncelikle riskli bölgelerin belirlenmesi sonrasında ise önleme projeleri ve koruma projeleri hazırlanması gerekir. Proje aşamasına geçmeden önce yapılacak analizlerde ilk olarak kütle hareketini tetikleyen sebep olacak süreksizliklerin jeolojik özelliklerinin tespit edilmesi, yenilme türünün ortaya konulması ve hareket mekanizmasının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir (San, 2017; Koçyiğit, 2017; Çapar, 2018; Kırbaş, 2019; Buz, 2019; Keskin, 2019).

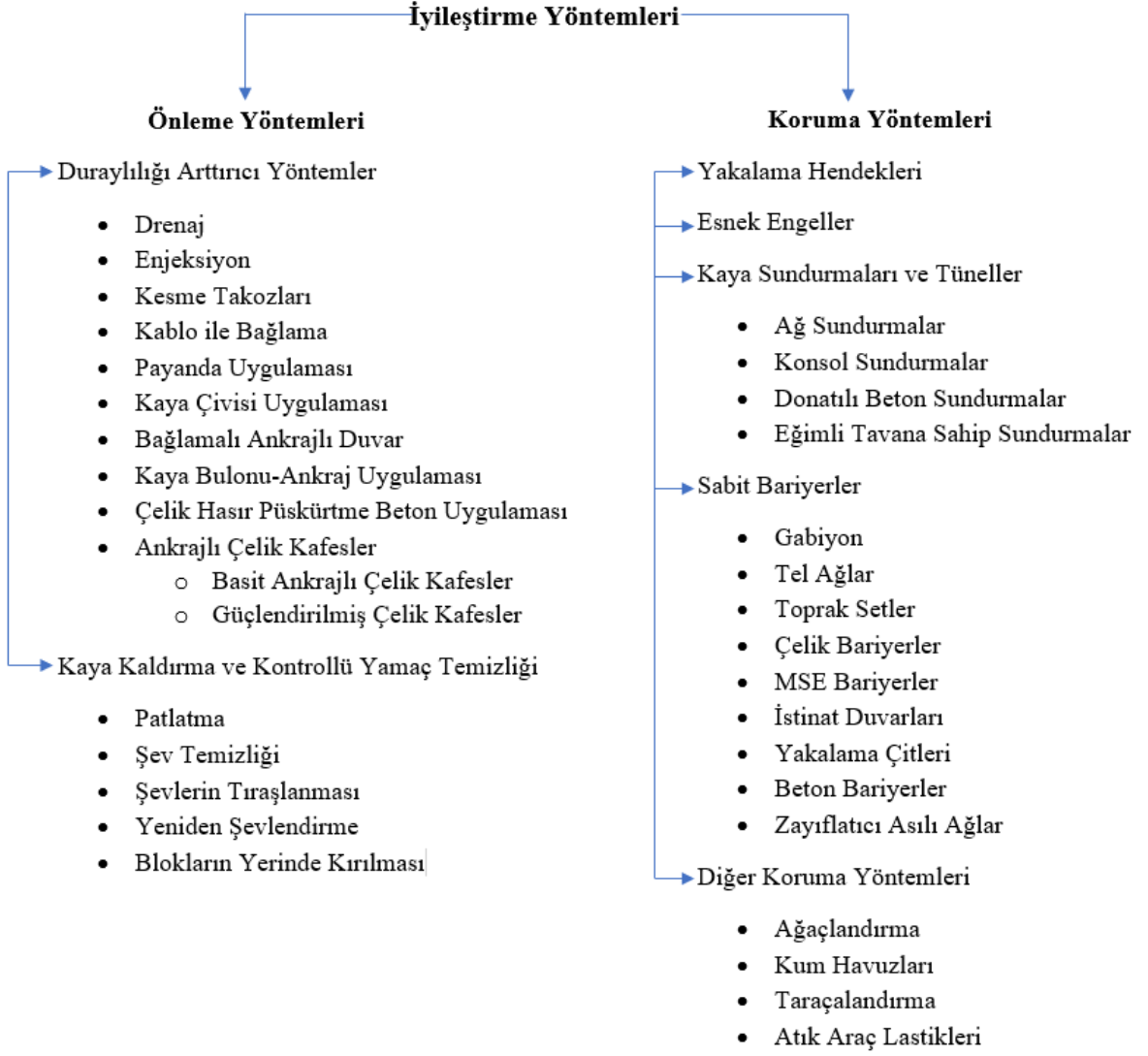
Mühendislikte kullanılan önlemler üç ana başlıkta incelenebilir. Bu başlıklar: stabilizasyon (önleme), koruma ve kaçınmadır. Önleme yöntemlerinin amacı düşme riski bulunan kaya bloklarının bulundukları yere sabitlenerek ya da kontrollü olarak bir şekilde uzaklaştırılması ile kaya düşme potansiyelini azaltmaktır. Koruma yöntemlerinin amacı düşen blokları durdurmak ve korunması gereken alanlara girişini önlemektir. Kaçınma yöntemlerinin amacı ise kaya düşme riskini azaltmak yerine, kişilerin ya da tesislerin kaya düşme riski olan alanlardan uzaklaştırılarak, güvenli bir yere taşınmasıdır.

Değişik türlerde kütle hareketlerinin meydana gelme mekanizmaları farklı olduğundan önerilecek koruma-önleme yapılarının başarısı da yenilme türünün doğru şekilde belirlenmesine bağlıdır. Oluşacak kütle hareketi türünün kaya düşmesinin meydana geleceği belirlenmesi durumlarında hareket etme riski yüksek blokların izleyecekleri

yörüngeler, farklı yönler boyunca hareket edecek farklı kaya bloklarının çarpma hızı, sıçrama yüksekliği, kinetik enerjisi ve önleme-koruma yöntemlerinin uygunluğu 2 boyutlu ve 3 boyutlu yaklaşımlar ile analiz edilmelidir (Akın vd. 2019).

Bunların yanı sıra, analizlerde kullanılan jeolojik parametrelerin temininde, uygulanacak yöntemin belirlenmesinde ve uygun ıslah-koruma yöntemlerinin tasarlanmasında laboratuvar ve arazi çalışmaları önemli bir yer tutmaktadır. Laboratuvar ve arazi deneyleri ile kaya malzemesine ait fiziksel ve mekanik özellikler, kaya kütlelerini ayıran süreksizliklerin özellikleri, kütle hareketi sebepleri, hareket çeşitleri, düşen veya düşme ihtimali yüksek blokların geometrileri, hareket eden kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri ve izledikleri yörüngeleri belirlenebilmektedir.

Kaya ıslahı projelerinde pasif veya aktif yöntemler önerilmektedir. Aktif yöntemlerde amaç kaya bloğunun harekete geçmesini önlemektir. Pasif yöntemlerde ise harekete gecen kaya bloğunun kontrollü bir biçimde durdurmak ya da tehlikesiz alana iletmek hedeflenmektedir. (Grosic vd., 2009). Bu sebeple aktif yöntemler önleme yöntemleri, pasif yöntemlerse koruma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Koruma ve önleme yöntemleri ayrı ayrı uygulanabildiği gibi bütünleşik bir biçimde de uygulanabilmektedir (Volkwein vd., 2011). Şekil 10'da koruma ve önleme yöntemleri detaylı bir şekilde verilmiştir.



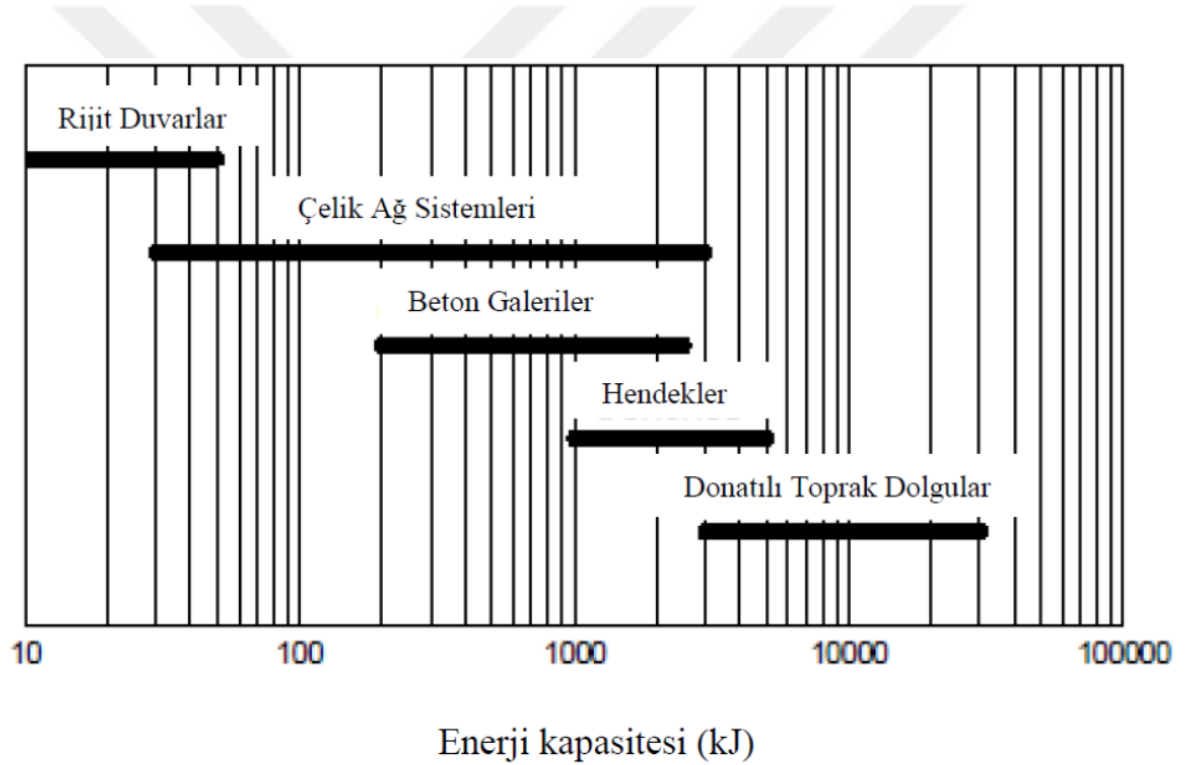
Şekil 10. Kaya düşmelerinde iyileştirme (önleme ve koruma) yöntemleri (Grosic vd., 2009; Fanos ve Pradhan 2019'dan değiştirilerek)

Kaya düşmesi olaylarında kullanılan önleme yapıları çelik tel ağ sistemleri, farklı bariyerler ve tutucu yapılar olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Çelik tel ağ sistemleri; ankastre ve galvaniz kaplama olarak iki farklı biçimde kullanılmaktadır. İki sistemde de sadece düşük enerjili blokları tutabilir. Bariyerler ise kendi içerisinde betonarme, toprak dolgu, zayıflatıcılar, esnek bariyerler ve yapısal duvarlar olmak üzere beş gruba ayrılmaktadır. Kaya düşme vakalarında toprak dolgu setler çok yüksek çarpma enerjilerine karşı koyabilecek önleme yapılarındandır.

Önleme yapıları arasında donatılı toprak dolgu setler en büyük kinetik enerjiye karşı koyabilen bariyerlerdir. Son olarak tutucular; hibrit hendekler ve hendekler olarak ikiye ayrılır. Bariyerle ile hendeğin birlikte kullanıldığı hendekler hibrit hendeklerdir.

Toprak dolgu koruma yapıların bu denli yaygın kullanılmasına rağmen, zeminin lineer olmayan gerilme şekil değiştirme davranışı yüzünden çarpma anında meydana gelen deformasyonlar, zeminin dinamik davranışı konusundaki bilinmezlikler ve zeminin donatı ile etkileşimindeki bilinmezliklerden ötürü bu tasarım prosedürü şuan için literatürde yer almamaktadır.

Şekil 11’de karşı koyulan enerji düzeyleri, Tablo 1’de ise kaya düşmelerine karşı önleme yapıları, dezavantajları ile beraber verilmiştir.



Şekil 11. Enerji kapasitelerine göre kaya düşmesi önleme yapıları (Grassl ve diğ. 2002)

Tablo 1. Kaya düşmelerine karşı kullanılan önleme yapıları (Andrew ve diğ.)

Önleme Yapısı	Tanımı / Amacı	Kısıtlamalar
Tel Ağ Sistemleri		
Kaplama Ağlar	Eğimli bir arazi yüzeyine aşınmayı yavaşlatmak, düşen kayaların kontrolünü sağlamak ve onları bir toplama alanı içinde tutmak için kaplanmış altıgen tel örgü, kablo şeklinde ağlar, ya da yüksek çekme dayanımlı çelik hasır.	Bir toplama alanı gerektirir. Bağlantı noktaların kar yükü gibi yüklerden zarar görebilir. Çapı 1.5 metreden küçük kayaların düşme ihtimali olan alanlar için uygundur.
Ankastre Ağlar	Yerinde tutturulmuş ağlar veya örgüler. Yamaçtaki kayalar ve toprağı tutmak amacıyla, aktif tutma kuvveti uygulamak için kullanılır.	Birikmiş kaya cepleri oluşturabilir. Temizlemesi zor olabilir.
Bariyerler		
Toprak Bariyerler	Doğal zemin ve kayalardan veya mekanik olarak stabilize edilmiş dolgudan inşa edilen bariyerlerdir. Etkinliğini arttırmak için bir toplama alanının önüne inşa edilirler. Özellikle MSE duvarlar daha büyük çarpma enerjilerine ve tekrarlı çarpmalara karşı koyabilirler. Kolay onarılabılır ve maliyetleri düşüktür.	Biriken kaya bloklarını toplamak için düşen kayaları toplama alanı periyodik olarak temizlenmelidir. Yüksek setler geniş taban alanı gerektirirler.
Beton Bariyerler	Düşük çarpma enerjilerinden korunmayı sağlarlar. Kolay ve hızlı inşa edilebilir ve ekonomiktirler.	Yüksek çarpma enerjilerinde rijitliğin yüksek olması nedeniyle çatlaklar ya da kırıklar oluşabilir.
Yapısal Duvarlar	Rijit bariyerler düşen kayaları durdurmak ve belirli bir alanda toplamak için kullanılırlar. Yüksek kinetik enerjili ve tekrarlı çarpmalara karşı koyabilirler.	Biriken kaya bloklarını toplamak için düşen kayaları toplama alanı periyodik olarak temizlenmelidir. Çok yüksek enerjili çarpmalar karşısında büyük hasarlar olma ihtimali yüksektir.
Esnek Bariyerler	Dayanımı ve enerji absorbe kapasitesi yüksek tel örgülerden yapılan esnek bariyerler çelik direkler ya da ankrajlı ipler gibi durdurucularla desteklenebilirler.	Çarpma sırasında bariyerler tarafından yönü değişen kayalar için boşluklar gerektirir. Periyodik olarak temizlenmelidir. Yüksek enerjili çarpmalarda ağır hasarlar meydana gelir ve imalatı pahalıdır.
Zayıflatıcılar	Esnek bariyerlere benzer bir tel örgü sistemine sahiptirler. Düşen kayaların hareketine yavaş bir şekilde izin verilir ve bir toplama alanına yönlendirilir. Bakım onarım maliyeti düşüktür.	Bir toplama alanı ve bu alanın periyodik olarak bakımı gerekir.
Tutucular		
Hendekler / Hibrit Hendekler	Eğim boyunca belirli şekillerde yapılmış önleme yapılarıdır. Estetik olarak en avantajlı koruma yapılarıdır. Hibrit hendekler bariyer ve hendeklerin birleşiminden oluşurlar.	Pürüzlü ve dik yamaçlar büyük toplama alanları gerektirirler. Toplama alanı periyodik olarak temizlenmelidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Coğrafi Durum ve Çalışma Alanı Hakkında Genel Bilgiler

Rize İli Hemşin İlçesi sınırları içerisinde bulunan çalışma alanı (Şekil 12 ve 13) 1/25.000 ölçekli Artvin F45c3 paftası içerisinde kalmaktadır. Çalışma sahası ve çevresi sarp bir topoğrafyaya sahip olup bu haliyle Doğu Karadeniz topoğrafyasının tipik özelliklerini taşımaktadır. İlçe merkezi ve yakın çevresinde topografya üst kotlara doğru giderek daralan vadiler akarsular sebebi ile derin şekilde yarılmıştır. 350 metre kotundaki akarsu düzlüklerinin sağ ve sol sahilinde yükseklik aniden değişmekte ve 1500-2000 metrelik yatay mesafelerde 1000 metreyi aşmaktadır.

Çalışma konusu olan ve kaya düşme vakasının yaşandığı kaya kütlesi ilçe merkezinin yaklaşık 1300 metre güneyinde bulunan Hemşin Çok Programlı Anadolu Lisesine ait spor kompleksinin doğu yamacında yer almaktadır (Şekil 14).



Şekil 12. Çalışma alanının Google Earth uydu görüntüsündeki konumu



Şekil 13. Proje konusu çok programlı lise güneybatısında bulunan ve kaya düşme vakasının yaşandığı kaya kütlesi ve çevresine ait ortofoto

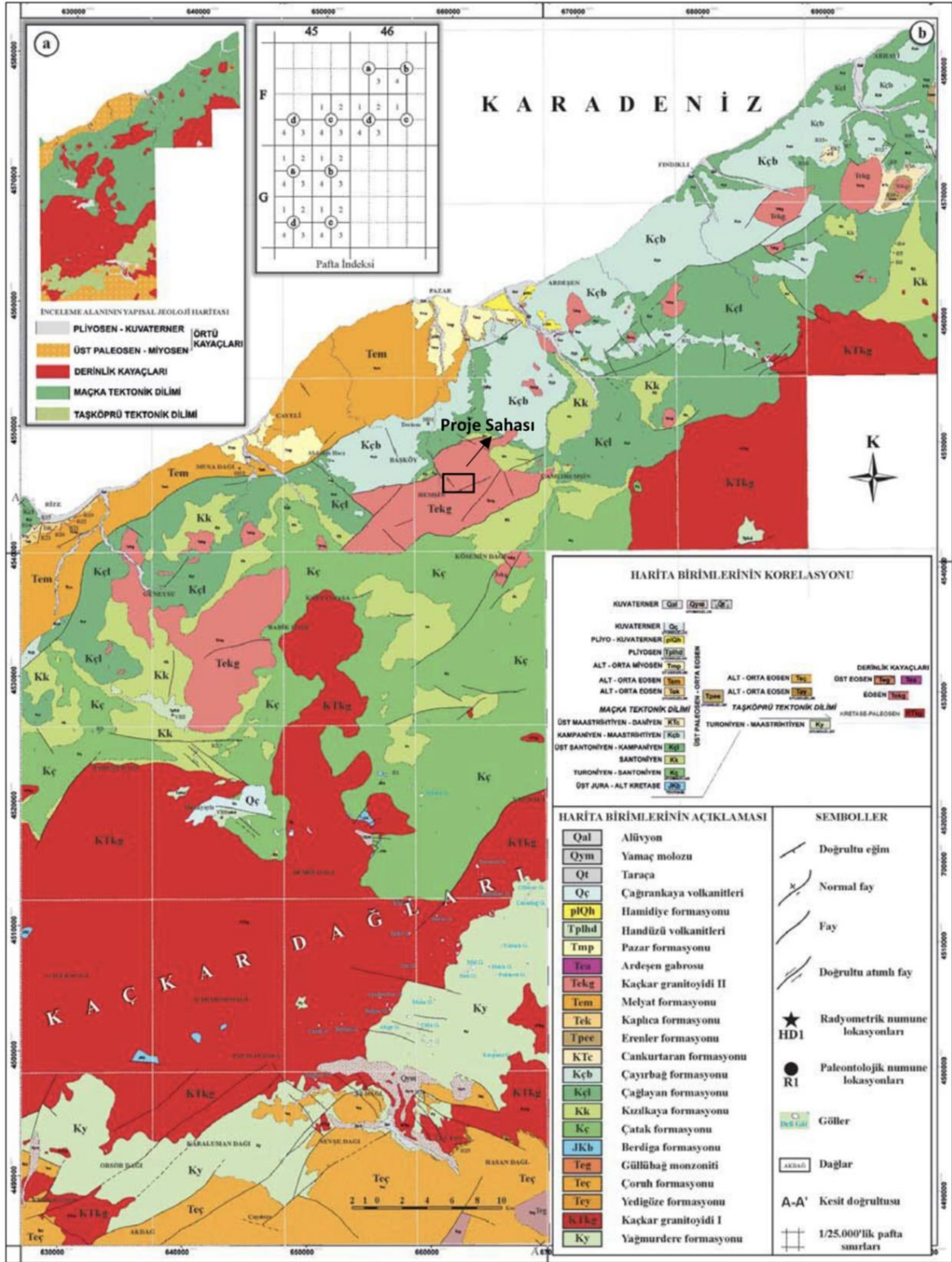


Şekil 14. Kaya düşme vakasının geliştiği kaya şevi (üst şekil) ve spor tesisin arka duvarını kırarak tesisin içine giren bloklar

2.2. Çalışma Alanının ve Çevresinin Jeolojisi

Çalışma alanında yer alan kayaçlar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları (NACS, 1983) esas alınarak yapılmıştır, çalışma sahasında Eosen yaşlı Kaçkar Granitoidinin yüzeylendiği belirlenmiştir (Şekil 14). Proje sahasının tamamında yüzeyleme veren birimler Güven (1990) tarafından ise Üst Kretase yaşlı birimlerini kesen ve Eosen yaşlı birimleri ile aşınma uyumsuzluğu ile örtülen granitoidler Kaçkar Granitoidi olarak adlandırılmıştır. Granit bileşimli kayaçlar genel olarak GB-KD doğrultulu bölgesel antiklinal yapılarının merkezi kesimlerinde gözlemlenir. Granitoidler yer yer koyu gri, açık gri, açık pembe renkte olup, genelde mikro kuvarşlı diyorit, granit-granodiyorit, mikro granit bileşimlidir. Taneli yapıda kuvars, biyotit, alkali feldispat, yer yer hornblend içermekte olan bu granitoidlerin eklem düzlemleri yoğundur. Genellikle Çağlayan, Çatak, Berdiga, Kızılkaya, Mescitli ve Hamurkesen formasyonları ile dokanak ilişkisi sunan bu granitoidler yer yer yoğun hidrotermal alterasyona uğramıştır. Genellikle Üst Kretase yaşlı birimleri kesen ve Eosen yaşlı birimlerle uyumsuzluk ile örtülen bu birimin yaşı Eosen olarak alınmıştır.

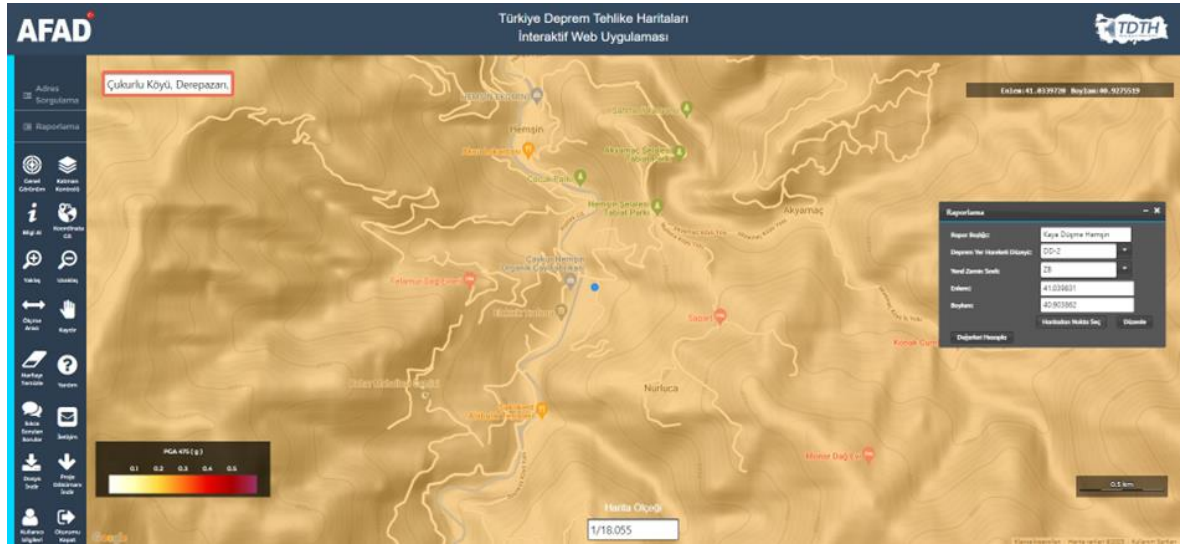




Şekil 15. Proje sahasını da içine alan Rize-Fındıklı-Hemşin çevresine ait jeoloji haritası (Alan vd. 2019)

2.3. Çalışma Alanının Deprem Durumu

Bir bölgede meydana gelmiş depremlerin ürettikleri hasar, oluş zamanları, mekanizmaları, büyüklükleri ve coğrafik dağılımları o bölgenin depremselliğini tanımlar. Depremsellik çalışmaları ise daha çok bir bölgenin sismik riskini değerlendirmek için yapılmaktadır. Çalışma kapsamında gerekli veri 2018 TBDY dikkate alınarak AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından bulunmuştur (Şekil 16).



Şekil 16. Proje sahasının AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasındaki konumu ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyine göre maksimum yer ivmesi değeri

Proje sahası için 2018 TBDY dikkate alınarak; “deprem yer hareketi düzeyi” **DD-2** olarak ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl), “yerel zemin sınıfı” şev stabilite analizleri için **ZB** olarak alınmış ve aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

$$S_s \text{ (kısa periyot harita spektral ivme katsayısı)} = 0.572$$

$$S_1 \text{ (1 sn periyot için harita spektral ivme katsayısı)} = 0.128$$

$$S_{DS} \text{ (kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı)} = 0.515$$

$$S_{D1} \text{ (1 sn periyot için tasarım spektral ivme katsayısı)} = 0.102$$

$$PGA \text{ (en büyük yer ivmesi)} = 0.241g$$

$$PGV \text{ (en büyük yer hızı)} = 12.006 \text{ cm/s}$$

2018 TBDY’ne göre şevlerin duraylılık analizlerinde zemin cinsine göre bir göçme modeli olarak kabul edilerek, kaya kütlesi veya zemin dengesinin araştırılması gerektiği

belirtilmiştir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda bir şevin toptan göçmeye karşı güvenli olabilmesi için aşağıda yer alan eşitlikte verilen koşul sağlanmalıdır:

$$E_t \leq \frac{R_t}{\sigma_{RK}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte, E_t göçmeye zorlayan etkilerin toplamı, R_t göçmeye karşı koyan etki ve dirençlerin toplamı, σ_{RK} ise kaymaya karşı güvenlik sayısı olarak tanımlanır.

Kaymaya karşı güvenlik sayısı (σ_{RK}) ardışık yaklaşım ile elde edilmektedir. Toptan göçmeye karşı yeterli güvenlik düzeyi, özel riskler içeren durumlar hariç $\sigma_{RK} \geq 1.10$ olarak kabul edilebilir. Yönetmeliğe göre düşey ve yatay eşdeğer deprem katsayısı değerleri (k_v ve k_h) aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}), AFAD Türkiye Deprem Tehlikesi Haritası kullanılarak 0.515 olarak belirlenmiştir.

$$k_h = 0.2 \times S_{DS} = 0.2 \times 0.515 = 0.103 \quad (3)$$

2.4. Arazi Çalışmaları

Kaya kütlelerinin en belirleyici özelliklerinden olan süreksizliklerin, dağılımlarının ve yönelimlerinin belirlenmesi amacıyla kaya mühendisliği uygulamalarında çok sayıda yöntem geliştirilmiştir.

Bu yöntemler içinde en çok kullanılan hat etüdü yöntemidir. Hat etüdü yöntemi ile kaya kütlelerinin mühendislik yönünden tanımlanması ve sınıflandırılmasında kullanılmaktadır ve bu yöntem ile istatistiksel anlamda en anlamlı sonuçlar elde edilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında, uygun kaya yüzeylerinde seçilen hatlar boyunca yapılan ölçümler ile kaya malzemesinin ve süreksizlik özelliklerinin, yeraltı suyu varlığı, kaya kütlelerini tanımlayan özellikler ve dolgu durumu belirlenmiştir, jeoteknik birimlerde gözlemlenen farklı süreksizlik zonları için farklı nicel tanımlamalar yapılmıştır ve kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri ISRM (1978 ve 1981) tarafından önerilen standartlar göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

Hat etüdü yönteminin uygulamasında aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

- Öncelikle süreksizlik ara uzaklığı ve devamlılığı dikkate alınarak uygun uzunluğa sahip mostra yüzeyleri seçilmiştir. Ölçümler genelde tek hat üzerinde yapılmıştır.
- Mostranın seçimi yapılırken, süreksizliklerin en az yarısının uçları görünecek biçimde olmasına dikkat edilmiş ve en az 100 adet süreksizliğin ölçülmüştür.
- Mostraların bazı durumlarda yer yer döküntü ile kapanmış olduğundan ölçümlerde zorluklar yaşanmıştır.
- Ölçüm yapılacak hattın üzerine şerit metre konulmuş ve spreyci boya ile hat çizilmiştir. Çizilen hattın yarım metre altından yarım metre üstünde kalan süreksizlikler ölçülmüştür.

Açıklanan bu maddeler doğrultusunda yapılan hat etüdü çalışmalarında ISRM (1981) tarafından tavsiye edilen tanımlamalar çerçevesinde öncelikle mevcut süreksizliklerin yönelimlerini belirlemiştir, sonrasında süreksizlik devamlılığı, açıklığı, ara uzaklığı, süreksizlik yüzeylerinin dalgalılığı ve pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeylerindeki bozuşma, dolgu ve su durumu gibi özellikler incelenmiştir.

2.4.1. Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Setleri

Mühendislik uygulamaları amacıyla yeraltında veya yüzeyde yapılan çalışmalar kapsamında kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinden daha çok süreksizlik sistemlerine ait özellikleri ve davranışları önemlidir. Bu sebeple, mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere yapılacak olan kaya kütleleri sınıflamaları, laboratuvar çalışmalarından bulunan verilerden ziyade arazide bulunan kaya kütlelerinin davranışlarını kontrol ederek, süreksizliklerin yönelimlerinin ve bu süreksizliklere ait özelliklerinin belirlenmesi esasına dayanır (Goodman, 1989).

Süreksizlik setlerinin sayısını ve bu setlerin ağırlıklı yönelimlerini belirlemek ve mühendislik uygulamalarında değerlendirebilmek amacı ile, işlenen kutup noktalarından faydalanılarak kontur diyagramları hazırlanmaktadır. Kontur diyagramlarının hazırlanma amacı, benzer özelliklere sahip olan süreksizliklerin yoğunlaştığı, dolayısıyla kutup noktalarının birleşmesinden hareketle süreksizlik takımı sayıları ve bu takımların egemen yönelimlerinin tespit edilmesidir. Kontur diyagramlarında değerlendirme yapılırken, kutupların en fazla yığıldığı konturların merkezi alınarak süreksizlik takımları için egemen yönelimler tespit edilmektedir. Bununla beraber, en fazla gözlemlenen yönelim

değerlerinden sapma gösteren tali süreksizlik yönelimlerin bulunabileceği değerlendirmelere de dikkat edilmelidir. Yapılan çalışmada, çalışma konusu proje konusu yamaçta yüzeylenen kaya kütleleri üzerinde yapılan pusula ölçümleriyle her bir ana süreksizlik takımları ve bu takımların yönelimleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerle Dips v5.0 programı kullanılarak kontur diyagramları hazırlanmıştır.

2.4.2. Süreksizlik Ara Uzaklığı

Bir süreksizlik setinde bulunan süreksizlikler arasındaki dik uzaklıklar süreksizlik ara uzaklığı olarak tanımlanmaktadır (ISRM, 2007). Süreksizlik ara uzaklığı, sondaj karotlarından tayin edilebileceği gibi kaya yüzeylerinde süreksizlik doğrultusuna dik yönlerde serilen bir şerit metre boyunca görülen süreksizliklerin sayılmasıyla da belirlenebilir. Sondaj eksenini veya ölçüm hattı boyunca iki süreksizlik arasında ölçülen uzaklık “görünür ara uzaklık” olarak isimlendirilir. Bu çalışmada kaya mostrasında yapılan hat etüdü çalışmaları sonucunda süreksizlik ara uzaklığı değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

2.4.3. Süreksizlik Açıklığı ve Dolgu

Bir süreksizlik yüzeyine ait birbirine bakan karşılıklı iki zıt yüzeyin arasındaki dik uzaklık açıklık olarak tanımlanmaktadır. Açıklıklar boş olabileceği gibi su ya da başka bir dolgu maddesiyle de dolmuş olabilir (ISRM, 2007). Yapılan çalışma kapsamında, kompas kullanılarak süreksizliklerin açıklıkları ölçülmüş ve ortalama süreksizlik açıklık değerleri belirlenmiştir. Süreksizlik açıklığı, ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerinden faydalanılarak değerlendirilmiştir.

2.4.4. Süreksizliklerin Devamlılığı

Süreksizliklere ait devamlılık, süreksizliklerin bir düzlem üzerindeki alansal yayılımının göstergesi olup, duraylılığı etkileyen en önemli özelliktir. Süreksizlik devamlılığı alansal oran olarak tanımlanmasına rağmen, alansal ölçümün zor olması nede ile genel olarak mostradaki süreksizliklere ait izinin ölçülmesi ile tespit edilebilmektedir

(ISRM, 2007). Devamlılık genel anlamı ile, süreksizlik izi olarak ele alınmalıdır. Yapılan çalışma kapsamında, devamlılık parametresi ISRM’de (2007) bulunan tanımlamalar esas alınarak, mostra yüzeylerinde şerit metre ile doğrudan ölçümler yapılarak tespit edilmiştir.

2.4.5. Süreksizliklerin Pürüzlülüğü

Süreksizliklere ait yüzeyinin küçük ölçekte düzlemsellikten sapmasının pürüzlülüğü, büyük ölçekte ise düzlemsellikten sapmasının dalgalılık denmektedir (ISRM, 2007).

Her iki temel özellik de süreksizlik yüzeylerine ait kesme dayanımının önemli bir bileşenidir. Süreksizliklerin pürüzlülüğünün belirlenmesine yönelik farklı yöntemler önerilmiştir (ISRM, 2007). Bu yöntemler şöyledir: doğrusal profil alma yöntemi, mekanik profilometreler ile yapılan ölçümler ve pusulada bulunan klinometre ile yapılan ölçümlerdir. Profilometreler, laboratuvar ölçeğinde veya arazide süreksizliklerin pürüzlülük profillerinin sayısallaştırılması amacı ile kullanılan mekanik gereçlerdir.

Standart pürüzlülük sayısı olan (JRC) değerleri 0-20 arasında değişmektedir. Barton ve Bandis (1982 ve 1990) süreksizlik yüzeylerinden alınan değişik ölçüm uzunlukları için JRC değerini bulmak amacıyla pürüzlülük genliği ve ölçüm uzunluğundan faydalanmışlardır.

2.4.6. Süreksizliklerin Yüzeylerinin Bozunma Derecesi

Kaya kütlelerinin yüzeye yakın olan bölgelerinde genellikle bozunmuş, daha derin kısımlarda ise hidrotermal süreçlerden kaynaklı olarak bozunmaya uğramış olabilirler. Bu nedenle süreksizlik yüzeylerine ait dayanım, bu yüzeylerin ve yakın çevresindeki kaya malzemesinin bozunma derecesi ile yakından alakalıdır. Süreksizlik yüzeylerinin dayanıma etkisi bakımından taşıdığı önem dikkate alınarak, ilk etapta kaya kütlelerinin daha sonra kayaç malzemesine ait bozunma derecesinin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada kapsamında ISRM (2007) tarafından, arazi çalışmaları yapılırken kullanılabilecek bozunma sınıflaması ölçütleri kullanılmıştır.

2.5. Laboratuvar Deneyleri

Kayaçların sınıflandırılmasında ve mühendislik özelliklerinin tespitinde kaya mekaniğine ve bu alandaki tasarım uygulamalarının en önemli parçasıdır. Kayaç malzemesinin sınıflandırılması açısından tanımlamaya yönelik özellikler, indeks özellikleridir ve bu özellikler arasında yüksek korelasyon kat sayılarına ulaşılması mümkündür. Doğru indeks deneylerinin seçilmesi şartıyla, kökenleri dikkate alınmaksızın, birbirine yakın indeks değerine sahip kayaçların benzer mühendislik davranışları göstermeleri beklenir (Ulusay ve Sönmez, 2002). Buna ek olarak, bu tür indeks deneyleri ile elde edilen parametreler, mühendislik tasarımlarında doğrudan kullanılabilir. Mühendislik projelerinde dikkate alınan girdi parametreleri: kayaçların üç eksenli ve tek eksenli sıkışma koşulları, makaslama ve çekilme kuvvetleri altındaki davranışlarıdır. Bu parametrelerin, tasarım deneyleri kullanılarak tayin edilmesi gerekir.

Bu çalışmada, birim hacim ağırlık, yoğunluk, nokta yükü dayanım indeksi deneyi ve tek eksenli sıkışma dayanımı gibi tasarım deneyleri ISRM (2007) standartları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

2.6. Yamaç Stabilite Analizleri

Düzlemsel kaymanın en önemli sebebi yamaçlara fazla yük koyulması, yamaç topuklarında meydana gelen aşınmalar, yer altı ve yüzey suları, hidrasyon olayı, alterasyon, farklı litolojide kayaçların aralanması ve yerçekimidir. Bütün bu faktörler zayıflık zonlarındaki basınç ve direnç (içsel sürtünme açısı, kohezyon) özelliklerinin değişmesine sebep olur.

Kaya veya kazı şevinde düzlemsel kaymanın meydana gelmesi için aşağıda verilen geometrik koşulların oluşması gerekmektedir:

- Kaymanın meydana geldiği düzlemin doğrultusunun şev yüzeylerine paralel veya paralele yakın (yaklaşık $\pm 20^\circ$ içinde) olmalıdır.
- Kayma düzleminin şev düzlemini kesmesi gereklidir; yani düzlemin eğiminin şev yüzeyinin eğiminden daha küçük olması gereklidir.
- Kayma düzlemine ait eğimin, aynı düzlemin sürtünme açısından daha fazla olması gerekmektedir.
- Kayma yüzeyinin üst kısmı şevin üst kısmını kesmelidir.

- Hareketin yanal sınırını belirleyebilmek için, kaymaya karşı ihmal edilebilir direnç gösteren zayıflık düzlemlerinin tespit edilmesi gerekir.

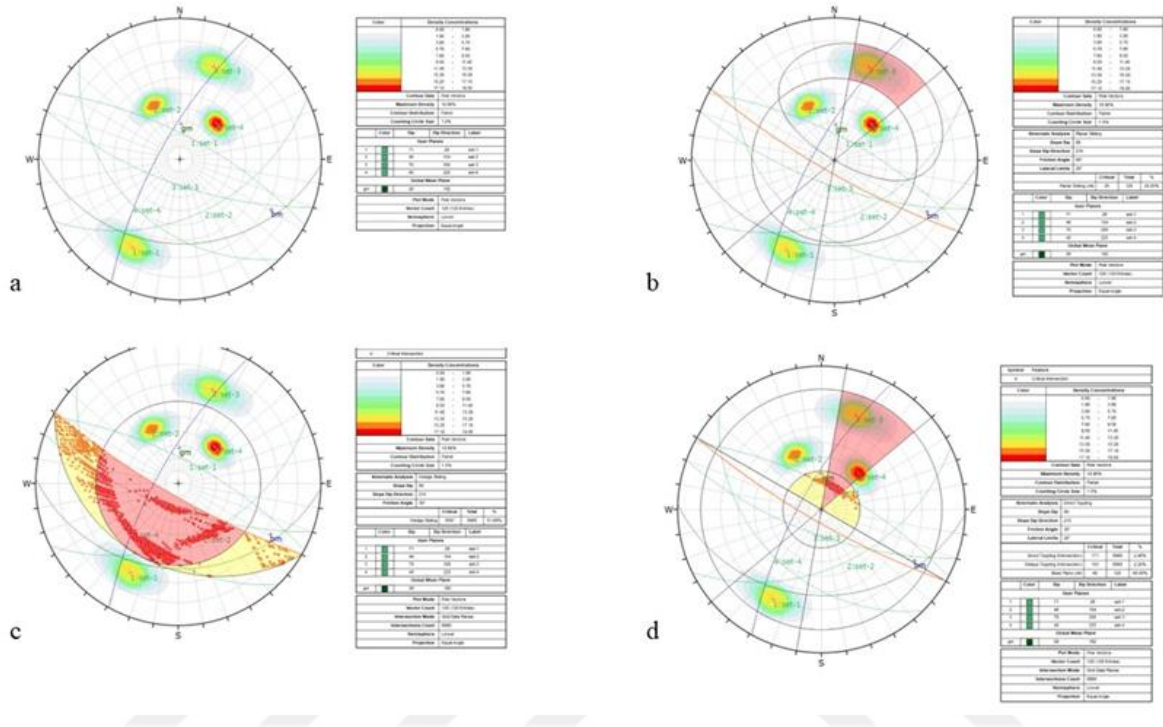
Kama tipi yenilme süreksizlik yüzeylerinin şev yüzeyine eğimli olduğu ve kaymanın da bu tür iki düzlemin arakesit düzlemi boyunca geliştiği yenilme türü olarak adlandırılır. Kama tipi yenilmeler geometrik ve jeolojik şartların düzlemsel yenilmelere oranla çok daha geniş bir aralıkta değiştiği koşullarda meydana gelmektedir. Bu nedenle, kama tipi kaymada duraylılığının incelenmesi kaya şevi mühendisliğinin önemli bir bileşenlerinden biridir. Kama tipi hareketlerin kinematik analizinde düzlemsel yenilmelerin analizine benzer şekilde yapılmaktadır. Analizde iki süreksizliğe ait arakesite dik düzlemle arakesitten geçen düşey düzlemden geçen doğrunun izdüşümü stereonet üzerine çizilir; bu noktanın şev yüzeyini kesmesi durumunda kama tipi yenilme meydana gelir. Kinematik analizlerde kama tipi kayma yönü için düzlemsel yenilmelerinkine oranla daha az kısıtlama söz konusudur.

Devrilme tipi yenilmenin oluşma sebebi bloklara ait ağırlık vektörünün taban alanının dışına kaymasıdır. Ayrıca blokların en/boy oranları da devrilme üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Devrilmenin meydana gelebilmesi için, şev içine doğru eğimli olan süreksizliklerin eğim yönü, şevin eğim yönünden en fazla 30° sapma göstermeli ve şev yüzeyine paralel bir takım blok oluşturmalıdır. Buna ek olarak düzlemlerin eğimi de düzlemler arası kayma oluşmasına yetecek büyüklükte olmalıdır. Kayma, sadece uygulanan gerilmenin açısının, bloğa ait normal ile süreksizlik yüzeyleri arasındaki sürtünme açısından (Φ) büyük olduğu durumlarda gerçekleşir (Goodman ve Bray, 1976).

2.6.1. Kinematik Analizler (Dips Programı)

Yüksek lisans tez kapsamında arazide ölçülen süreksizlik setlerine ait kinematik analizler Rocscience yazılımlarından biri olan Dips 8.023 (2023) versiyonu kullanılmıştır. Kinematik analizde arazi çalışmaları esnasında kaya şevinde bulunan doğal süreksizliklerin pusula kullanılarak ölçülen eğim ve eğim yönü açıları kullanılmaktadır. Ölçülen eğim ve eğim yönü açıları kullanılarak hakim süreksizliklere ait eğim ve eğim yönü açısı değerleri tespit edilir. Sonrasında kaya şevi düzlemine ait eğim ve eğim yönü açısı değerleri programa girilerek kinematik analiz yapılır (Şekil 17). Kinematik analiz yardımıyla bir şevde olası düzlem kayma, kama tipi kayma, direk ve esnek devrilme riskinin olup olmadığı tespit edilmektedir. Kaya şevinde olası bir hareket türü tespit edildikten sonra bu hareket türü için

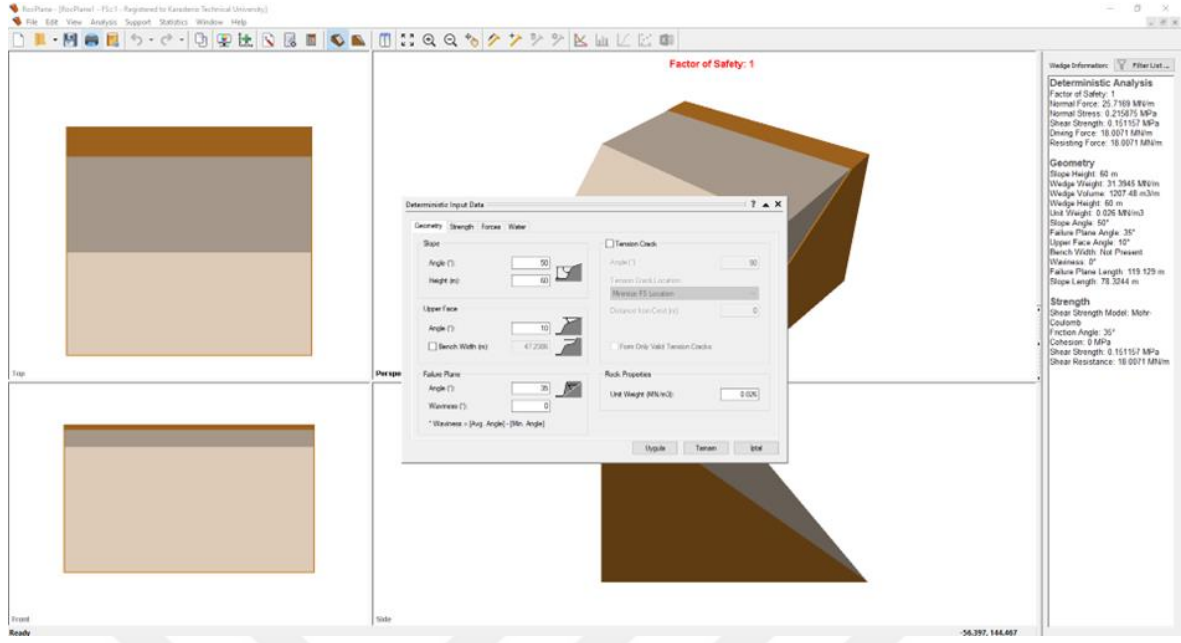
bir güvenlik sayısı veren limit denge analizleri yapılmaktadır. Ayrıca kinematik analiz ile kaya şev için güvenli şev açısı ve yönü de tespit edilmektedir.



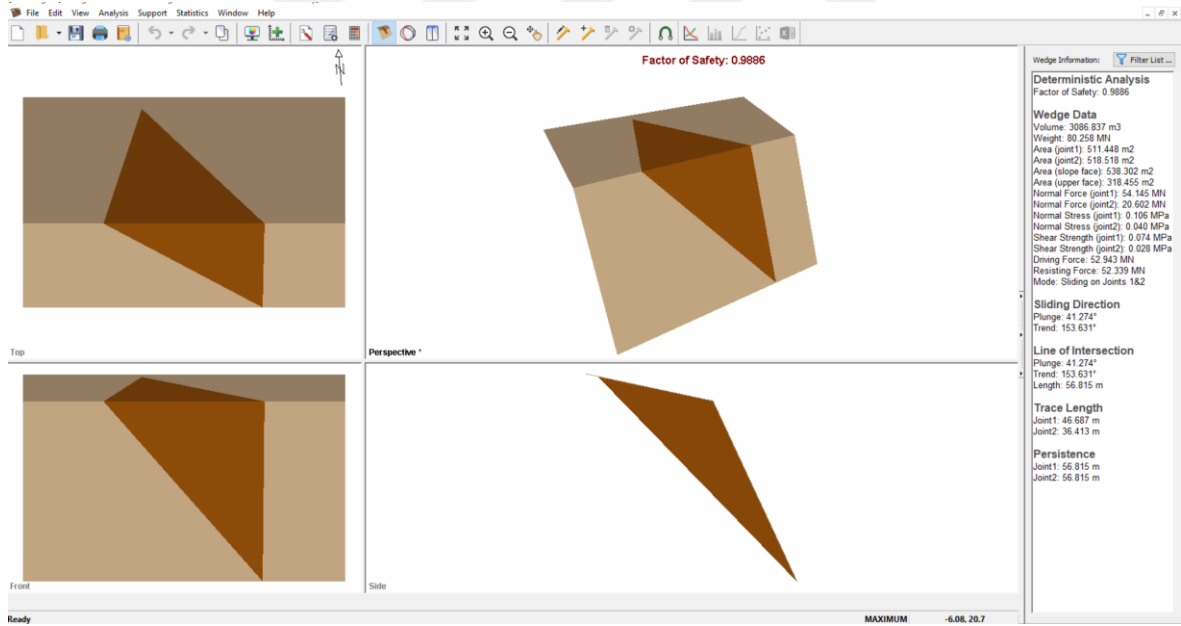
Şekil 17. Hakim süreksizlik yönünün tespit edilmesi (a), düzlemsel kayma analizi (b), kama tipi kayma analizi (c) ve devrilme türü analizler (d)

2.6.2. Limit Denge Analizleri

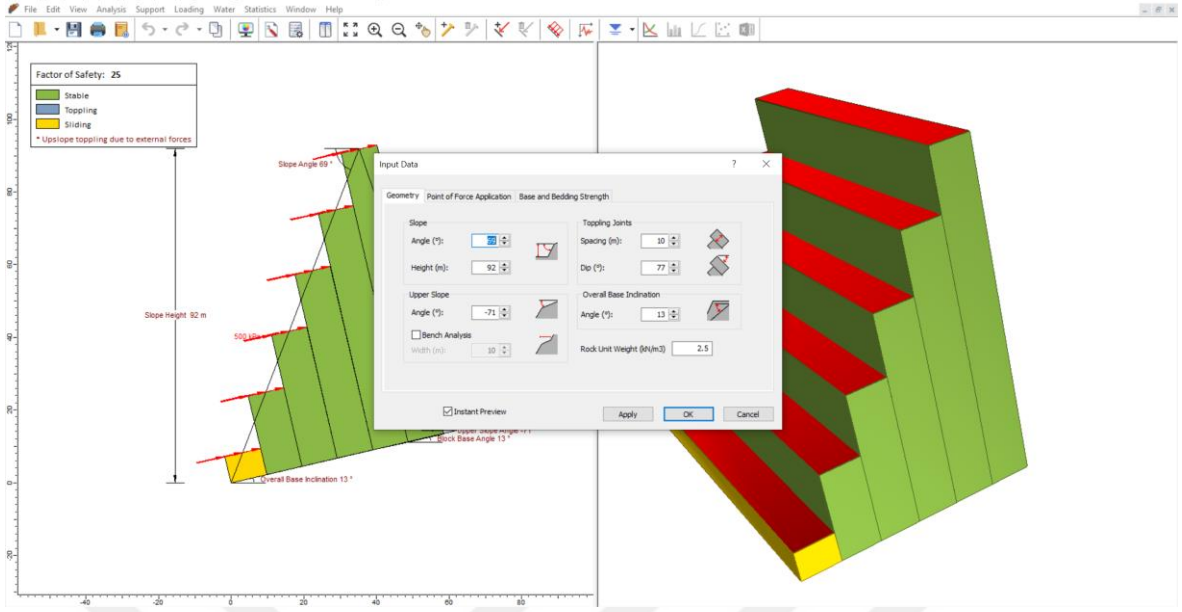
Kaya şevlerinde yapılan kinematik analiz sonuçlarında olması muhtemel kütle hareketi türüne göre şev için bir güvenlik sayısı veren limit denge analizleri yapılmaktadır. Kinematik analiz ile olası hareket, limit denge ile şevin o hareket türü için güvenlik sayısı tespit edilmektedir. Tespit edilen bu güvenlik sayısı ile şevin güvenli olup olmadığına karar verilir. Kaya şevinde düzlemsel kayma için Rocplane, kama türü kayma için SWedge ve devrilme türü analizler için ise RocTopple kullanılmaktadır (Şekil 18-20). Bu her 3 programda da girdi parametresi olarak; hakim süreksizliklere ait eğim-eğim yönü açısı, şevin geometrisi, süreksiz düzlemine ait kohezyon-işsel sürtünme açısı ve yerlatı suyu durumu girilmektedir.



Şekil 18. Rocplane programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi



Şekil 19. SWedge programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi

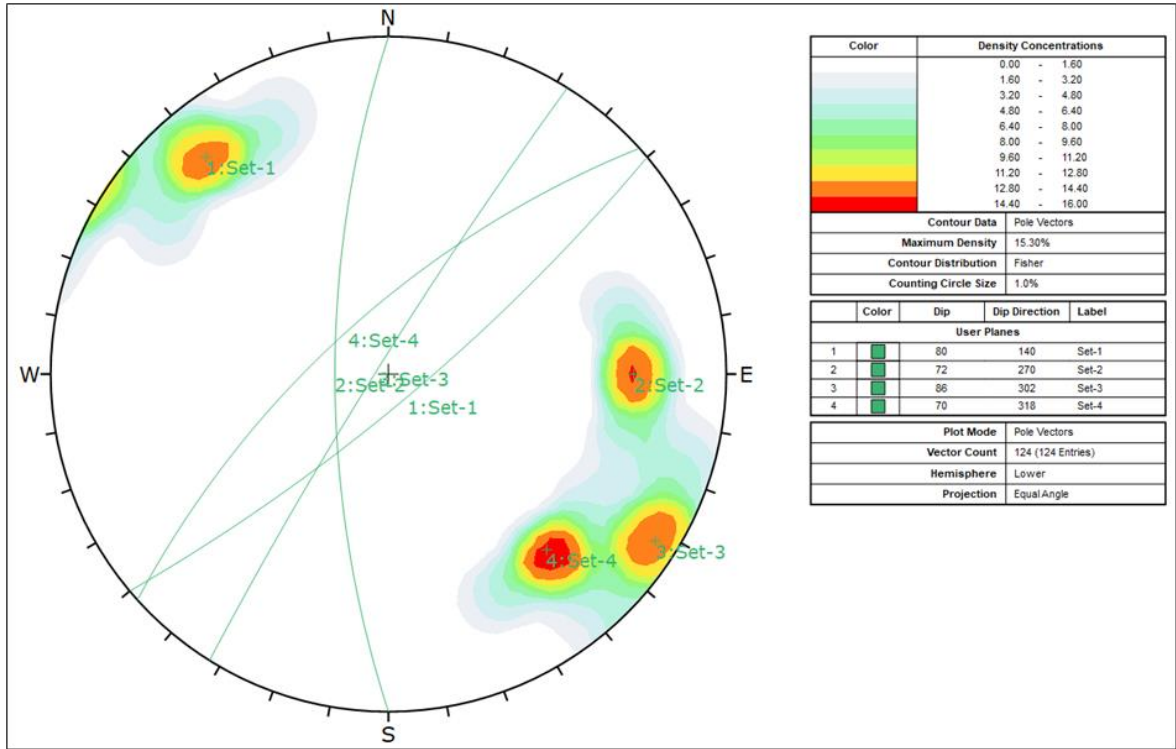


Şekil 20. RocTopples programına ait ara yüz ve veri giriş penceresi

3. BULGULAR

3.1. Süreksizlik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kontur diyagramının yorumlanması sonucu bazaltlara ait kaya kütlesi için 4 adet süreksizlik takımı belirlenmiştir. Belirlenen süreksizliklerin arazideki konumları Şekil 21’de, kaya kütlelerine ait süreksizlik takımlarının yönelimleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 21. Granodiyoritlerden oluşan kaya kütlelerindeki süreksizlik setlerine ait kontur diyagramı (alt yarı küre) ve ana süreksizlik takımlarının konumları

Tablo 2. Süreksizlik setlerine ait eğim yönü ve eğim açısı değerleri

Litoloji	Takım No	Süreksizlik Türü	Eğim Yönü Açısı	Eğim Açısı
Granodiyorit	1	Eklem	140	80
	2	Eklem	270	72
	3	Eklem	302	86
	4	Eklem	318	70

Yapılan çalışmada kaya mostrasında yapılan hat etüdü çalışmaları sonucunda süreksizlik ara uzaklığı değerleri ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Süreksizlik ara uzaklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için ortalama süreksizlik ara uzaklığı değerleri

Aralık (mm)	Tanımlama	Süreksizlik Ara Uzaklık Değeri (mm)			
		1	2	3	4
<20	Çok dar ara uzaklıklı				
20-60	Dar ara uzaklıklı				
60-200	Yakın ara uzaklıklı	120		160	
200-600	Orta derecede ara uzaklıklı		230		400
600-2000	Geniş ara uzaklıklı				
2000-6000	Çok geniş ara uzaklıklı				
> 6000	İleri derecede geniş ara uzaklıklı				

Süreksizliklerin açıklığı, ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Süreksizlik açıklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik açıklığı değerleri

Açıklık (mm)	Tanımlama	Süreksizlik Ara Uzaklık Değeri (mm)			
		1	2	3	4
< 0.1	Çok sıkı				
0.1-0.25	Sıkı	0.2	0.25		
0.25-0.5	Kısmen açık				
0.5-2.5	Açık			2.4	1.4
2.5-10	Orta derecede geniş				
> 10	Geniş				

Bu çalışmada, devamlılık parametresi ISRM'deki (2007) tanımlamalar esas alınarak doğrudan şerit metre ile mostra yüzeylerinde yapılan ölçümler ile belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Süreksizlik devamlılığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981) ve çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik devamlılığı değerleri

Açıklık (m)	Tanımlama	Devamlılık Değerleri			
		1	2	3	4
<1	Çok düşük devamlılık				
1-3	Düşük derecede devamlılık				
3-10	Orta derecede devamlılık				
10-20	Yüksek devamlılık		15	15	12
> 20	Çok yüksek devamlılık	> 20			

Çalışmada pürüzlülük tarağıyla elde edilen profiller sonucunda JRC değerinin 4-6 arasında değiştiği (az pürüzlü) belirlenmiştir.

Bu çalışmada ISRM (2007) tarafından, arazi çalışmaları yapıldığı esnada kullanılabilecek bozunma sınıflaması ölçütleri kullanılmıştır (Tablo 6). Bu durumda süreksizliklerin bozunma dereceleri W2, W3 olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Süreksizliklerin bozunma derecesi ile ilgili sınıflama

Tanım	Tanımlama Ölçütü	Bozunma
Bozunmamış (taze)	Kayacın bozunduğuna ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla birlikte, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözükmemektedir.	W1
Az bozunmuş	Kayaç malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiştir. Kayaç taze halinden zayıf olabilir.	W2
Orta derecede bozunmuş	Kayacın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Taze veya rengi değişmiş kaya sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W3
Tamamen bozunmuş	Kayacın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	W4
Artık zemin	Kayacın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmamakla beraber zemin taşınmamıştır.	W5

3.2. Kaya Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada, birim hacim ağırlık, yoğunluk, nokta yük dayanım indeksi deneyi ve tek eksenli basınç dayanımı gibi tasarım deneyleri ISRM (2007) standartları dikkate alınarak bulundurulmuş yapılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7. Kaya kütesinden alınan blok örneklerden temin edilen karot örneklerinin fiziksel ve dayanım özellikleri

BHA* (kN/m ³)	TEBD** (MPa)	Nokta yük (MPa)	BHA* (kN/m ³)	TEBD** (MPa)	Nokta yük (MPa)
25.6	95	4.15	27.1	115	4.95
26.2	110	5.10	26.6	87	4.05
26.1	105	5.15	26.7	91	4.20
25.9	114	4.88	27.0	98	4.25

* birim hacim ağırlık, **tek eksenli basınç dayanımı

3.3. Kaya Kütesinin Jeoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.3.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, uygun mostralarda seçilen hatlar boyunca ölçümler yapılmış, süreksizliklerin ve kaya malzemesinin özellikleri, yeraltı suyu varlığı, kaya kütesini ifade eden özellikler ve dolgu durumu belirlenmiştir. Değişik süreksizlik alanları için ayrı nicel tanımlamalar yapılmış ve kaya kütesine ait mühendislik özellikleri ISRM (1978 ve 1981) tarafından önerilen standartlar doğrultusunda araştırılmıştır.

Hoek-Brown yenilme kriteri sağlam kayada bulunan yer altı açıklıklarının tasarımında gerekli olan analizlerde kullanılacak girdi verilerini elde etmek amacı ile ortaya atılmıştır. Kriterde ilk olarak kırıksız kaya malzemesinin özelliklerinden bahsedilmiş, sonrasında kaya kütesindeki süreksizliklerin özelliklerini azaltabilmek için çeşitli faktörler önerilmiştir. Hoek ve Brown, mevcut kaya kütesi sınıflama sisteminden biri olan, Bieniawski (1989) tarafından geliştirilen Kaya Kütesi Puanlama sistemi (RMR) kullanarak, ampirik kriteri jeolojik gözlemler ile bağdaştırmayı denemişlerdir. Uygun alternatiflerin bulunmaması sebebi ile Hoek-Brown kriteri kısa zamanda kaya mekaniği çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve kriterlerin kullanımı, dayanım azaltmaya yönelik ilişkilerini elde etmekte kullanılan orijinal sınırların ötesine geçmiştir.

Bundan dolayı bu ilişkilerin tekrar inceleme gereksinimi ortaya çıkmıştır. Kriterlerin uygulandığı problemlerin geniş aralığı düşünülmüş ve zaman içerisinde kritere yeni parametreler eklenmiştir (Hoek vd., 2002). Kriterde meydana gelen değişimlere ek olarak, yenilme kriterini arazide yapılan jeolojik gözlemler ile ilişkilendirme noktasında, özellikle çok zayıf kayalarda, Bieniawski'nin önerdiği RMR'nin artık yeterli olmadığı kanısına varılmıştır. Böylece Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ortaya çıkmıştır (Hoek vd., 1992; Hoek, 1994, Hoek vd., 1995). Zaman içerisinde Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) daha sonra yapılan bir takım çalışmada (Hoek vd., 1998; Sönmez ve Ulusay, 1999; Hoek, 2000 ve 2001) zayıf kaya kütlelerinde uygulanmak üzere değiştirilmiştir.

Hoek vd. (2013) tarafından geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) grafiğinde kullanılan girdi parametrelerinden biri olan süreksizlik durumu puanı (JCond89) ise Bieniawski (1989) tarafından önerilen tablodan faydalanılmış ve yukarıda belirtilen standartlar dikkate alınarak hesaplanmıştır (Tablo 7).

Süreksizlik durumu puanı (RMR89) değerleri ise arazi çalışmaları ve kaya kütlelerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda 12 olarak hesaplanmıştır. Tez çalışması kapsamında RQD değeri hesaplanırken aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlikte α : süreksizlik sıklığı (1 metredeki ortalama süreksizlik sayısı)

$$RQD (\%) = 100 e^{-0.1\alpha} (0.1\alpha + 1) \quad (4)$$

Çalışmalar sonucunda elde edilen tüm verilerin değerlendirilmesi sonucunda orta derecede ayrılmış kaya kütlelerine ait GSI değeri Hoek vd. (2013) 35 olarak hesaplanmıştır (Tablo 8, Şekil 22).

Tablo 8. Kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması

Devamlılık (m)	<1	1-3	3-10	10-20	> 20
Puan	6	4	2	1	0
Açıklık (mm)	Yok	< 0.1	0.1-1	1-5	> 5
Puan	6	5	4	1	0
Pürüzlülük	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan
Puan	6	5	3	1	0
Dolgu	Yok	<5 mm (Sert)	> 5 mm (Sert)	<5 mm (Yumuşak)	> 5 mm (Yumuşak)
Puan	6	4	2	2	0
Bozunma	Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş
Puan	6	5	3	1	0
PUAN					12

3.3.2. Hoek-Brown Yenilme Kriteri ve Kaya Kütle Dayanımı

Kayaçlar küçük ölçeklerde dikkate alındığında kayaç malzemesi önem kazanmaktadır ancak, ölçek büyüdükçe sağlam kayaç malzemesinin öneminden, eklemli kayaç kütlelerinin önemine geçiş söz konusudur. Bu sebeple çok fazla sayıda süreksizlik seti içeren kaya kütlelerinin davranışını kaya malzemesi ve süreksizlikler belirlemektedir. Bu sebeple, çatlaklı kaya kütlelerinin dayanımını belirleyebilmek için Hoek ve Brown (1980a ve b) ampirik yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu yöntemde kayma dayanımı eğrisel bir Mohr zarfı tarafından temsil edilmektedir. Bu dayanım kriteri laboratuvar deneyleri ile arazideki kaya kütlelerinde gözlenen davranışlarından ve sünek olmayan kayadaki kırığa ait Griffith çatlak teorisinden (Hoek, 1968) türetilmiştir (Marsal, 1967; Brown, 1970; Jaeger, 1970).

Sönmez ve Ulusay (1999, 2002) tarafından önerilen bir yaklaşımla, hacimsel eklem sayısı (J_v) değerleri kullanılarak belirlenen bir yapısal bir özellik ISRM (1981) tarafından önerilen aralıklara uygun olarak tanımlanan GSI sistemine uyarlanmıştır.

En küçük ve en büyük asal gerilmeler cinsinden ifade edilen genelleştirilmiş Hoek-Brown dayanım kriteri aşağıda verilmiştir (Hoek, 1994).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (5)$$

Burada m_b : süreksizlik içermeyen bir kaya malzemesinin sabiti olan m_i 'nin aşağıdaki gibi ifade edilen azaltılmış değeridir.

$$m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right] \quad (6)$$

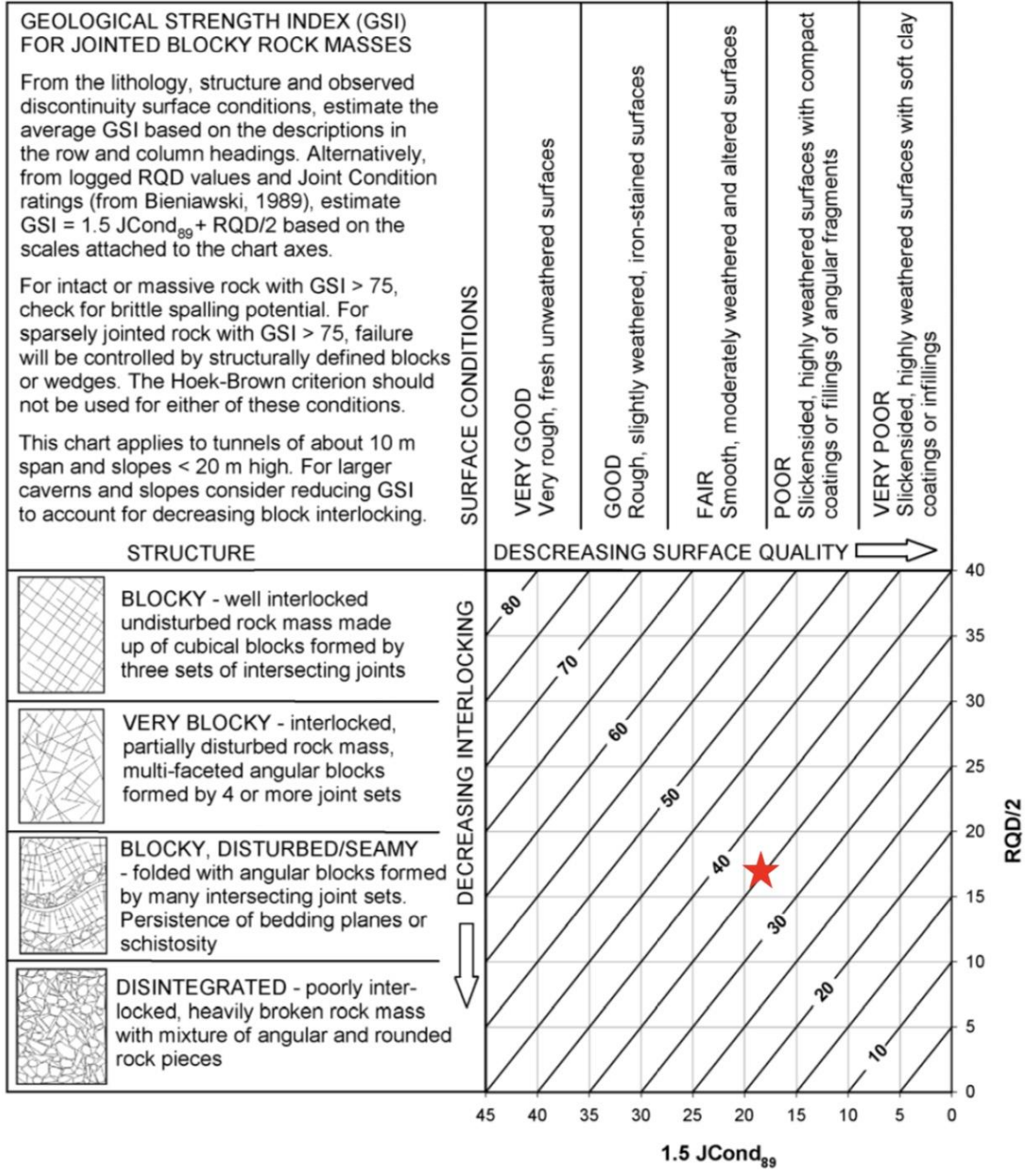
Hoek-Brown eşitliğinde kaya kütlesi için s ve a sabitleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$s = \exp \left[\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right] \quad (7)$$

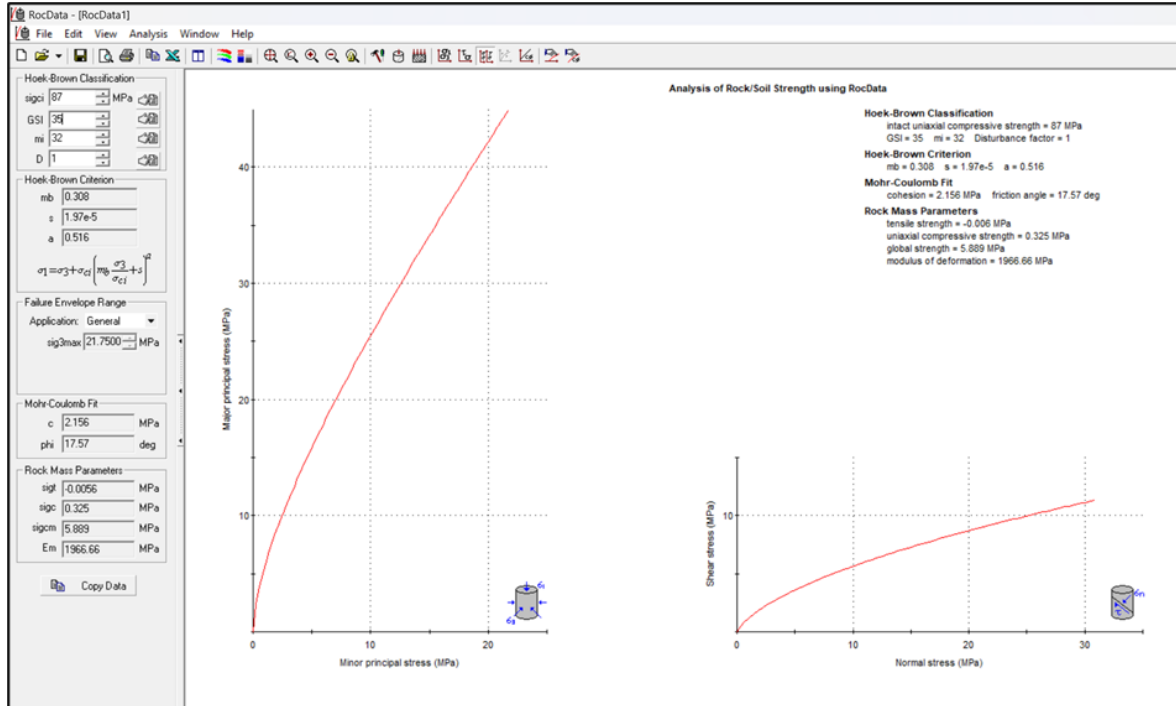
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right] \quad (8)$$

Buradaki D terimi, kaya kütlesinde patlatma hasarları ve gerilme azaltma neticesinde maruz kaldığı örselenme derecesine bağlı bir faktördür. Örselenmemiş kaya kütleleri için bu değer 0'dan başlayarak, çok örselenmiş kayalarda 1'e kadar çıkabilmektedir.

Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiğinde kullanılan girdi parametrelerinden biri olan süreksizlik durumu (JCond89) puanı ise Bieniawski (1989) tarafından önerilen tablo (Tablo 8) kullanılarak yukarıda belirtilen standartlar göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiği ve kaya kütlesine ait GSI değerleri



Şekil 23. Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak belirlenen kaya kütle özellikleri

Yapılan bütün değerlendirmelerden elde edilen sonuçlar kullanılarak kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri Hoek-Brown yenilme kriteri kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 23). Tablo 9’da kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 9. Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak hesaplanan ve proje konusu kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri

Girdi parametreleri						
GSI	m _i	D	UCS (kaya malzeme)	RMR ₈₉	Litoloji	RQD
35	32	1	87 MPa	12	Magmatik	35%
Hesaplanan Kaya Kütle Özellikleri						
c (MPa)	Sürtünme açısı	Deformasyon modülü	UCS (kaya kütle)	m _b	s	a
2.16 MPa	18 °	1967 MPa	0.325 MPa	0.308	0.0000197	0.516

3.4. Şev Stabilité Analizleri

Şevlerin duraylılığı; kinematik, nümerik analitik ve analiz yöntemlerinden faydalanılarak incelenir. Tez çalışması kapsamında kinematik ve analitik (limit denge) analizler yapılarak güvenli şev açısı ve güvenli şev yüksekliği ilişkisi belirlenmiştir.

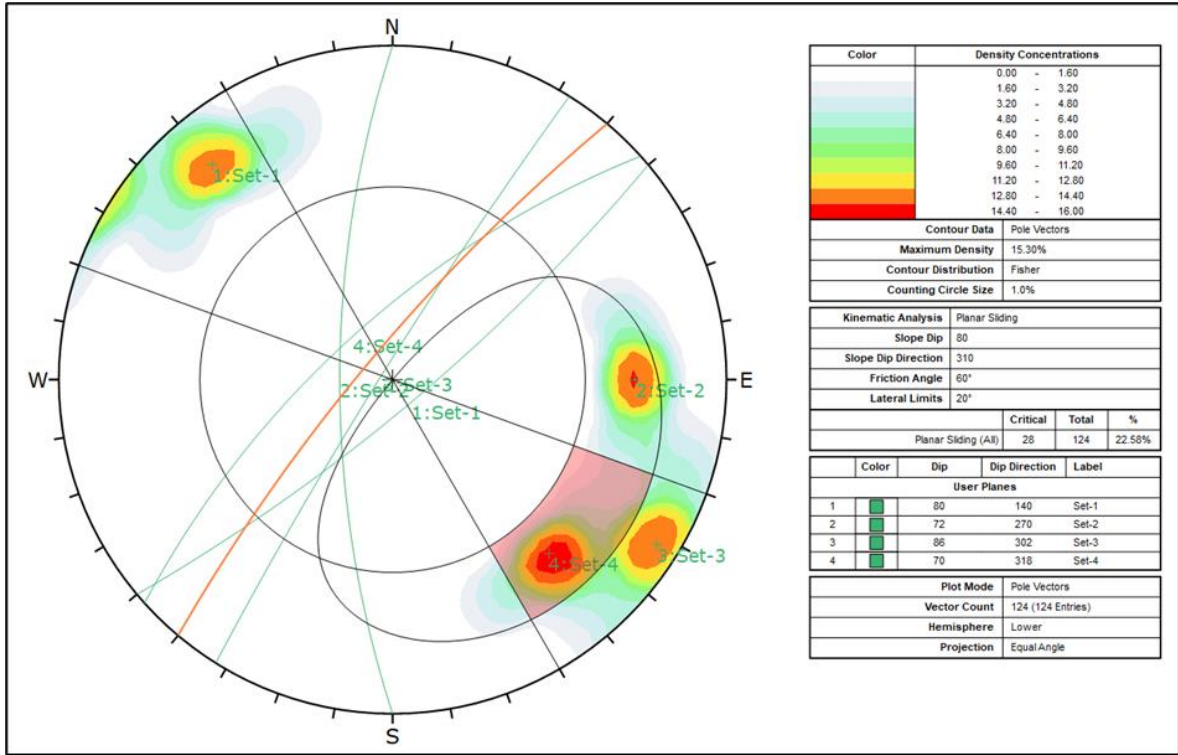
3.4.1. Yapısal Denetimli Analizler (Kinematik Analizler)

Tez çalışması kapsamında yapılan ölçümler sonucunda proje sahasında 100/70 duruşlu şevlerin oluşturulacağı dikkate alınmıştır ve planlanan kaya şevinde yenilme riski olup olmadığı kinematik olarak değerlendirilmiştir (Şekil 24-27). Süreksizlik yüzeylerini temsil eden bloklar üzerinde yapılan tilt denetleri sonucunda süreksizlik yüzeylerine ait içsel sürtünme açısı değerleri yaklaşık 30 derece olarak kabul edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Tablo 10'da özetlenmiştir.

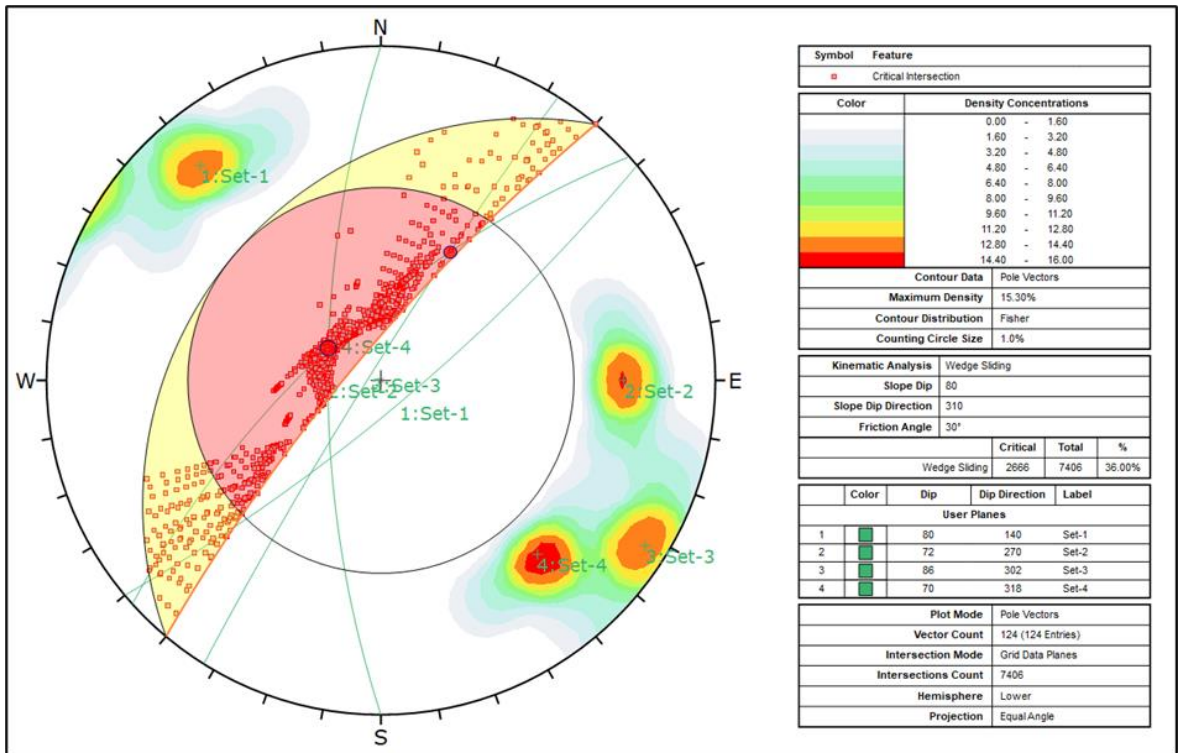
Elde edilen sonuçlar, kütle hareketinin meydana geldiği kaya şevinde riskin hala devam ettiğini, özellikle kama tipi kayma riskinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 10. 120/80 duruşlu şevlerde yapılan kinematik analiz sonuçları

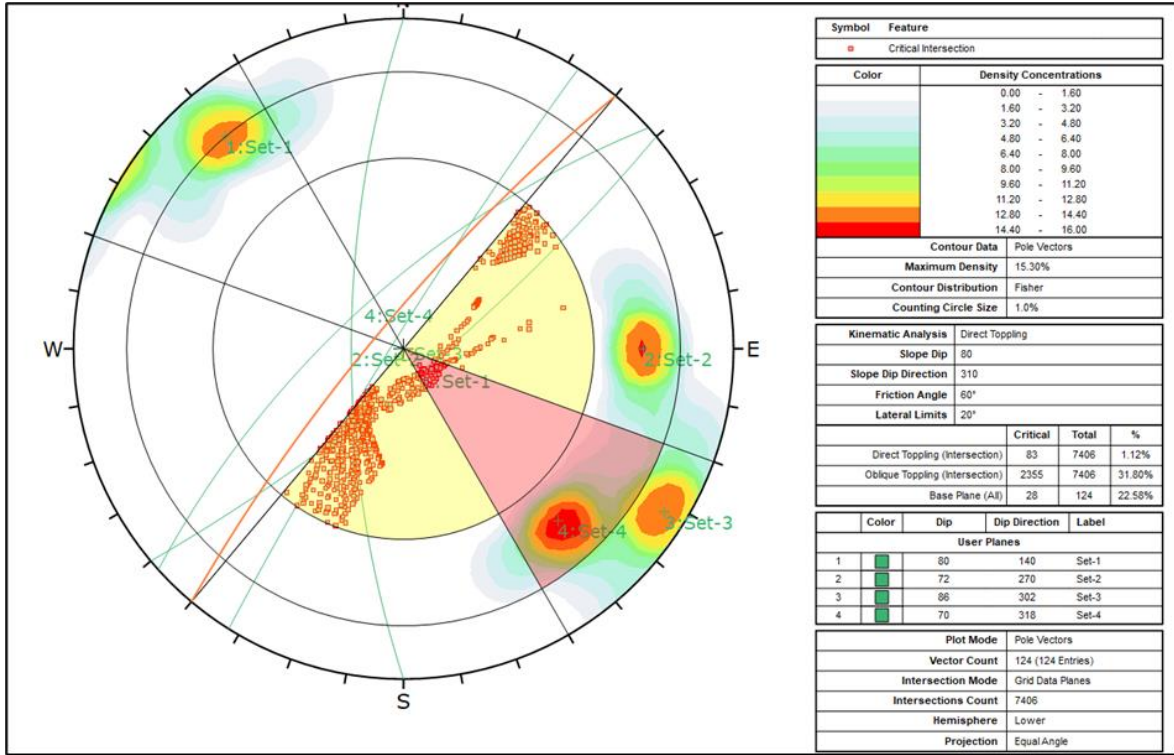
Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma	Düşme	Devrilme
140/80	-	-	-	Risk Var
270/72	-	Risk Var	-	-
302/86	-		-	-
318/70	Risk Var		Risk Var	-



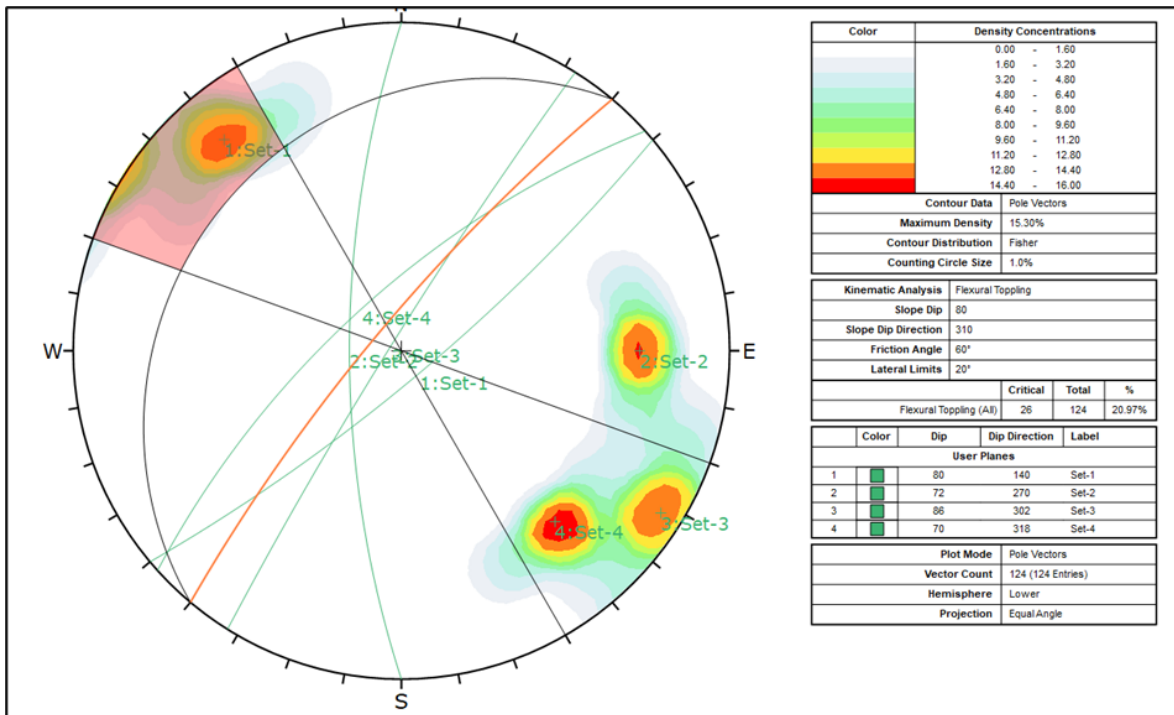
Şekil 24. 310/80 duruşlu şevlerde 4 nolu süreksizlikler boyunca düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 25. 310/80 duruşlu şevlerde 2 ile 4 ve 3 ile 4 duruşlu süreksizlik setlerinin ara kesiti boyunca kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



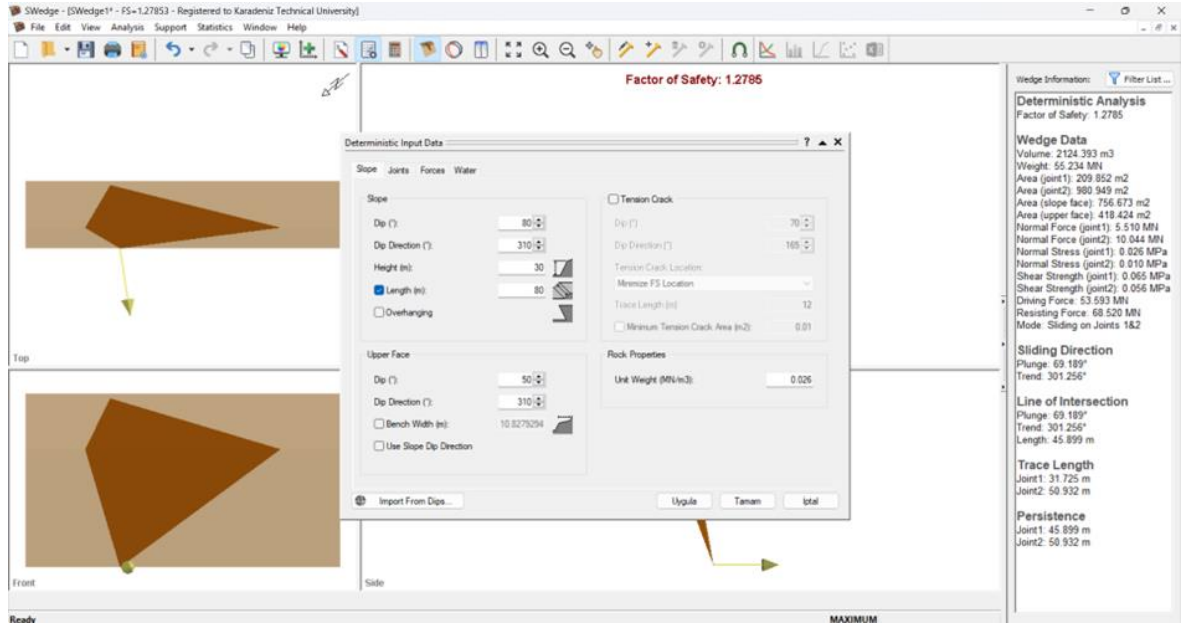
Şekil 26. 310/80 duruşlu şevlerde 4 nolu süreksizlikler boyunca serbest düşme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



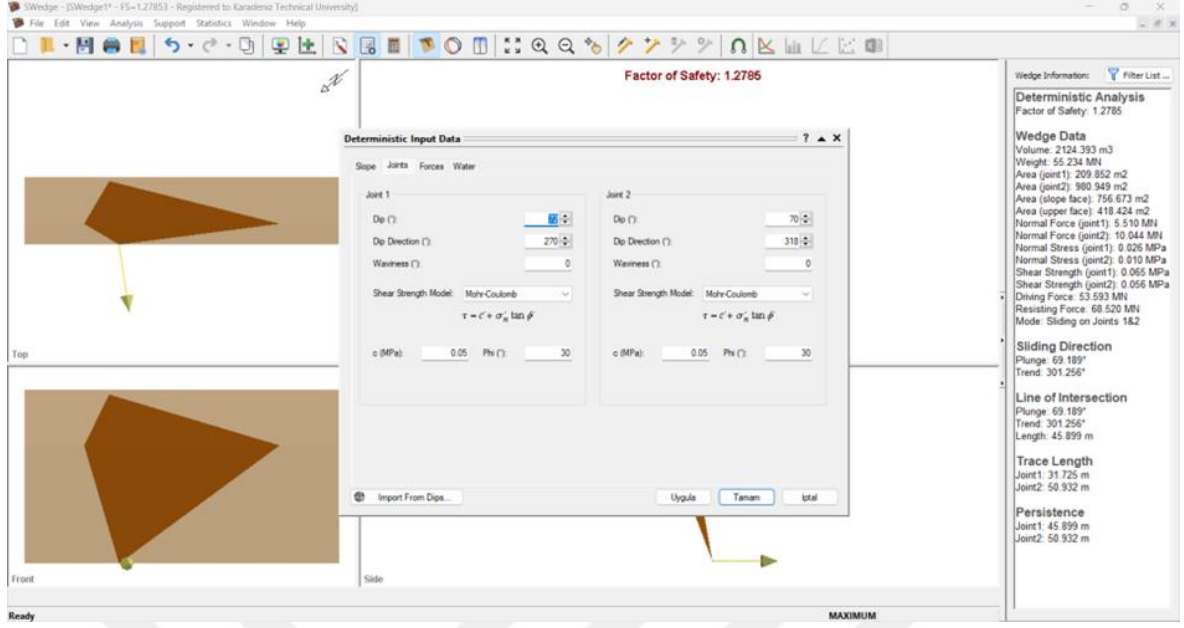
Şekil 27. 310/80 duruşlu şevlerde 1 nolu süreksizlik setlerinde devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi

3.4.2. Limit Denge Analizleri

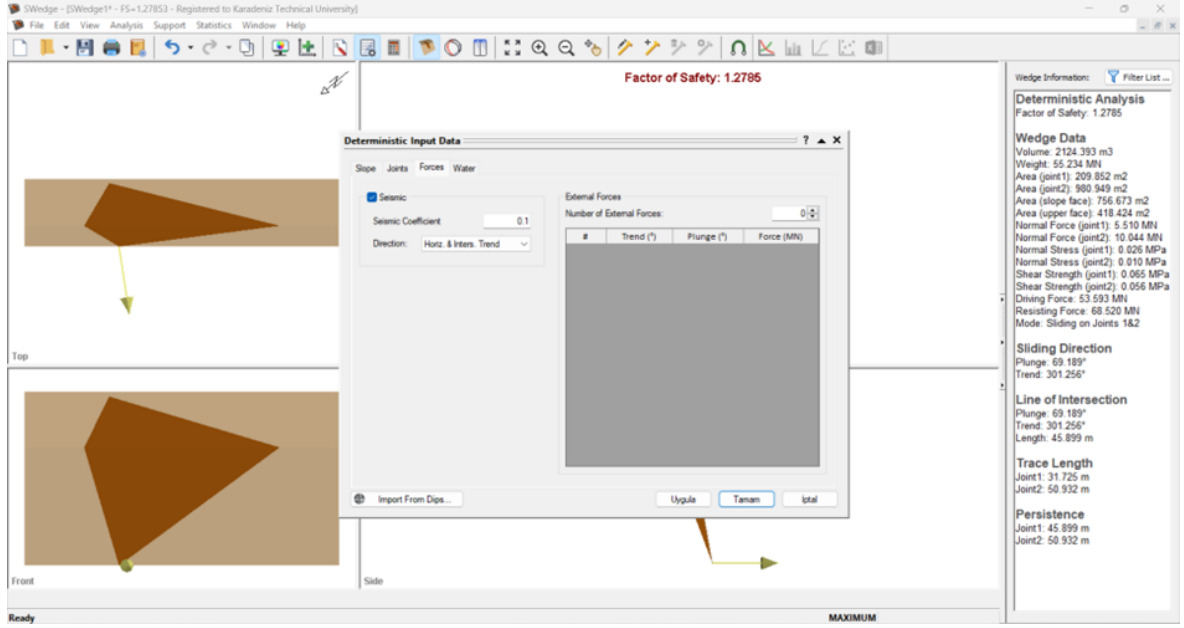
Bu çalışma kapsamında ortamın özellikleri ve kinematik analiz sonuçları dikkate alınarak 270/72 ve 318/70 duruşlu süreksizliklerin ara kesiti boyunca gelişebilecek olan kama tipi kayma için limit denge analizleri uygulanmıştır. Şev geometrisi ve süreksizlik koşullarının SWedge1 programına girilmesi Şekil 28 ve 29’da verilmiştir. Analizlerde TBDY (2018) dikkate alınarak yatay eşdeğer deprem katsayısı değeri de programa girilmiştir (Şekil 30).



Şekil 28. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde şev geometrisinin SWedge1 programına girilmesi



Şekil 29. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde süreksizlik koşullarının SWedge1 programına girilmesi

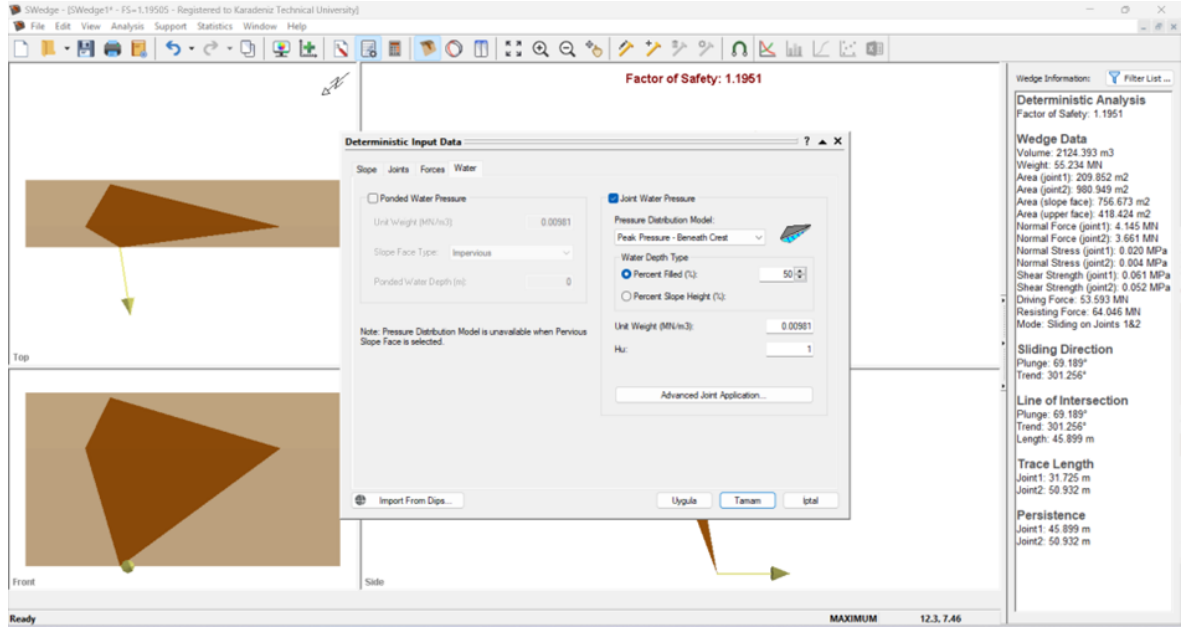


Şekil 30. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde deprem durumunun SWedge1 programına girilmesi

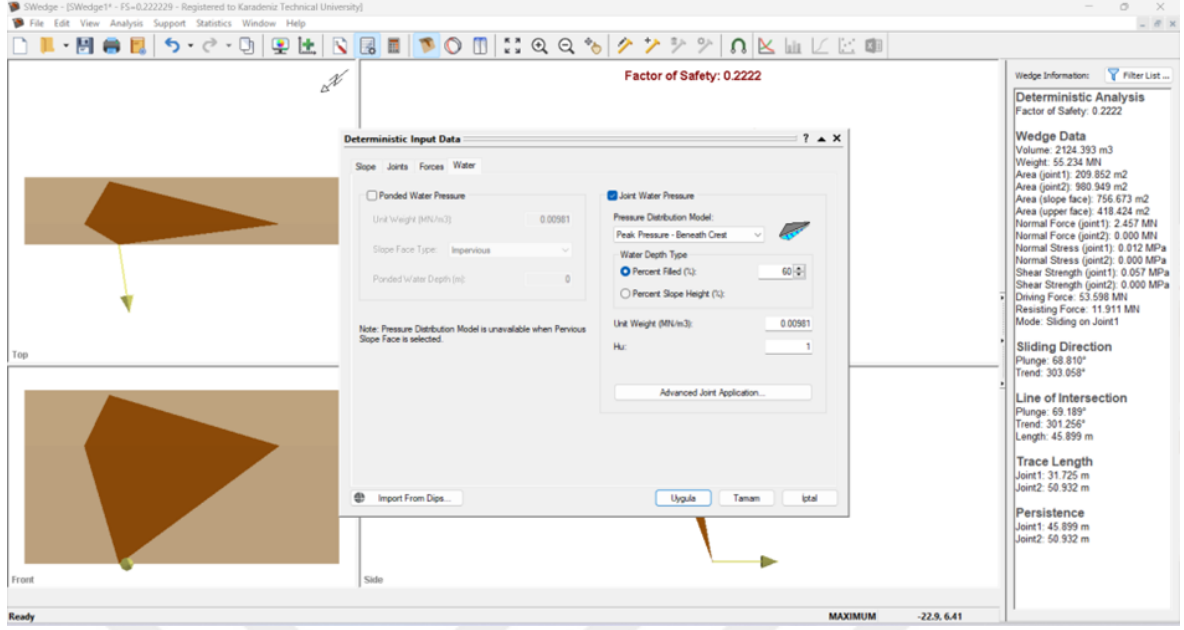
2018 TB DY dikkate alındığında, özel riskler teşkil eden durumlar haricinde kaymaya karşı güvenlik sayısı (γ_{RK}) değerinin 1.10'e sayısına eşit veya daha büyük olması durumu toptan göçmeye karşı yeterli güvenlik düzeyi olarak kabul edilmektedir. Yapılan limit denge

analizlerinde güvenlik sayısı değeri 1.28 olarak hesaplandığı için mevcut koşullarda bir yenilme beklenmemektedir.

Limit denge analizlerinin 2. aşamasında bölgenin yağış potansiyeli dikkate alınarak süreksizliklerin (çatlakların) su ile dolu olma durumu (boşluk suyu basıncı) dikkate alınmış sırasıyla boşlukların %50 ve %60 dolu olma durumu modellenmiştir (Şekil 31, 32). Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 11’de özetlenmiştir.



Şekil 31. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde boşluk suyu basıncının SWedge1 programına girilmesi (boşlukların %50'sinin su ile dolduğu varsayımı)



Şekil 32. Kama tipi kaymanın limit denge analizinde boşluk suyu basıncının SWedge1 programına girilmesi (boşlukların %50'sinin su ile dolduğu varsayımı)

Tablo 11. 270/72 ve 318/70 duruşlu süreksizliklerin ara kesiti boyunca gelişebilecek kama tipi kayma için limit denge analizleri

	Depremli durum	Boşluk suyu %50	Boşluk suyu %60
Güvenlik sayısı	1.28	1.20	0.22
TBDY (2018) $F \geq 1.10$	Güvenli	Güvenli	Riskli

Tablo 10 değerlendirildiğinde, aşırı yağışlara bağlı olarak güvenlik sayısı değerinin düşeceği, çatlaklarda bulunan suyun çatlak hacminin yarısından fazlasını doldurması durumunda süreksizliklerin ara kesiti boyunca bir yenilmenin (kütle hareketi) gelişeceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle mevcut şevin ivedilikte iyileştirilmesi gerekmektedir.

3.5. Kaya Düşme Analizleri

3.5.1. Kaya Düşme Sınıflama Sistemleri

Kaya şevi duraylılığının incelenmesi, doğal yamaçlar, karayolları ve açık kazı ocak madenleri gibi birçok farklı mühendislik tasarımının yapılması için çok büyük önem taşımaktadır. Doğru ve uygun yöntemler kullanılarak tasarlanan şev tasarımları; sadece şevin

duraylılığını arttırmakla kalmadığı gibi, aynı zamanda kazaları en aza indirerek güvenli ortamda çalışma imkânı da sağlamaktadır. Kaya şevlerinde gelişen yenilmeler çoğunlukla kütle içinde bulunan süreksizliklere bağlıdır. Tez çalışması kapsamında proje konusu olan kaya yamaç Saroglou vd. 2021 tarafından önerilen “kaya düşme riski” potansiyeline göre sınıflandırılmıştır (Tablo 11 ve Tablo 12).

Sınıflama yapılırken (Tablo 12’e göre) laboratuvarında yapılan deneylerden ve arazi ölçümlerinde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Mevcut yamaç için hesaplanan kaya düşme riski ağırlıklı puanı 65.10 dır.



Tablo 12. Kaya yamacın kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012)

Parametre	Sınıf/ Parametre Önem Faktörü	Puan				Skor (Puan ve parametre önem faktörünün çarpımı)
1. Şev açısı (°)	A/%7	25-40	Orta 40-50	Yüksek 50-60	Çok Yüksek >60 Konsol	
Puan		10	30	60	100	7
2. Şev yüksekliği (m)	A/%4	<15	15-30	30-60	>60	
Puan		10	30	60	100	1.2
3. Düşme yüksekliği (H toplam şev yüksekliğidir)	A/%7	Kayalar şevin alçak kesimlerinden düşüyor (H/4)	Kayalar şevin orta kesimlerinden düşüyor (H/2)	Kayalar şevin orta-yüksek kesimlerinden düşüyor (3H/2)	Kayalar şevin tamamını kat ediyor (H)	
Puan		10	30	60	100	7
4. Şev pürüzlülüğü	A/%3	Pürüzlü, düzlemsel, (sürtünme ivmeyi düşürüyor)	Düzlemsel kaygan (ivmeyi artırıyor)	Pürüzlü, dar basamaklar (sıçramaya neden oluyor)	Çok pürüzlü, dar basamaklar	
Puan		10	30	60	100	1.8
5. Şevdeki bitki örtüsü	A/%4	Yoğun bitki örtüsü, yüksek ağaçlar	Kısa boylu bitkiler, çalılıklar	Seyrek bitki örtüsü	Bitki örtüsü yok	
Puan		10	30	60	100	2.4

Tablo 12'nin devamı

6. Süreksizlik pürüzlülüğü/ Süreksizliklerdeki dolgu malzemesi/ Süreksizlik açıklığı	B/%6	Pürüzlü, kademeli	Kaygan, kademeli	Dalgalı ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın açılı parçalar içeren dolgu malzemesi ya da orta açıklıkta süreksizlikler 2.5-10 mm	Az pürüzlü düzlemsel ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın >5mm sert kil dolgulu ya da çok geniş açıklık 10-100mm	Kaygan düzlemsel ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın >5mm yumuşak kil dolgulu ya da aşırı geniş açıklık >100mm	
Puan		10	15	30	60	100	3.6
7. Süreksizlik yönelimi (ya da süreksizliklerin kesişimi)	B/%5	Stabilite için olumlu		Orta	Olumsuz	Çok olumsuz	
Puan		10		30	60	100	3.5
8. Süreksizlik devamlılığı (m)	B/%4	Çok düşük <1m	Düşük 1-2m	Orta 2-5m	Yüksek 5-10m	Çok yüksek >10m	
Puan		10	15	30	60	100	4
9. Süreksizlik sıkışma dayanımı (SSD, MPa, süreksizliklerdeki sürtünmeyi etkiler)	B/%1	>30	20-30	5-20	<5 ayrılmış		
Puan		10	30	60	100	0.6	
10. Kaya malzemesinin dayanımı (MPa, düşüğe düşen kayaların parçalanmasını sağlar, yükseğe sıçramayı arttırır)	B/%1	<10	10-30	30-60	>60 MPa		
Puan		10	30	60	100	1	
11. Kaya kütesinin blok verme oranı / Blok hacmi (m ³)	B/%4	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	
Puan		10	15	30	60	100	4
12. Yaklaşık blok sayısı (incelenen)	B/%2	Hiç	1-5	5-10	>10		

Tablo 12'nin devamı

şevin genişliği için)							
Puan		10	30	60	100		2.0
13. Karstik özellikler	B/%2	Karst yok	Seyrek	Orta sıklıkta oyuklar	Sık oyuklar		
Puan		10	30	60	100		0.2
14. Yağış sıklığı ve şiddeti	C/%3	Nadir	Seyrek	Mevsimsel	Sık	Çok sok, yılın her dönemi	
Puan		10	15	30	60	100	3.0
15. Geçirgenlik/Şev drenaj durumu	C/%3	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük	
Puan		10	15	30	60	100	0.9
16. Sismik tehlike (ivme katsayısı a)	C/%4	$a < 0.16$	$0.16 < a < 0.24$	$0.24 < a < 0.36$	$a > 0.36$		
Puan		10	30	60	100		0.4
17. Tutma alanının genişliği (m)	D/%10	>20	10-20	5-10	2-5	Yok	
Puan		10	15	30	60	100	1.0
18. Kaya düşmesi geçmişi	D/%5	Hiç-Az	Ara sıra	Çok sayıda	Sıklıkla	Sürekli	
Puan		10	15	30	60	100	0.75
19. Şev ulaşılabilirliği	D/%5	Her türlü stabilizasyon uygulanabilir	Çoğu stabilizasyon türü uygulanabilir	Birkaç stabilizasyon türü uygulanabilir	Az sayıda stabilizasyon türü uygulanabilir	Ulaşım çok zor	
Puan		10	15	30	60	100	0.75
20. Çarpmanın potansiyel etkisi ve yapıların değeri	D/%20	İhmal edilebilir; insan yapıları ve kalıcı aktivite yok	Düşük; düşük dereceli insan aktivitesi olan bölgeler	Orta sıklıkta insan mevcudiyeti; düşük sıklıkta evler	Yüksek; sık insan mevcudiyeti, çok sayıda ev	Çok yüksek; sürekli insan mevcudiyeti, yoğun şekilde meskûn alanlar	
Puan		10	15	30	60	100	20.0
TOPLAM PUAN							65.10

Bu değer çalışma konusu kaya yamacın “yüksek riskli yamaç (Risk Sınıfı IV)” sınıfına girdiğini göstermektedir (Tablo 13). Bu durumda incelenen kaya yamacın hafif tedbirlerle [Aktif (bulonlama, ankrajlar sistemleri gibi) ve pasif (çelik ağlar, çelik halat destekli ağlar, payandalı duvarlar, çitler, serbest kayaların alınması) tedbirlerin birleşimi] sağlanabilir nitelikte olduğu anlaşılmaktadır.

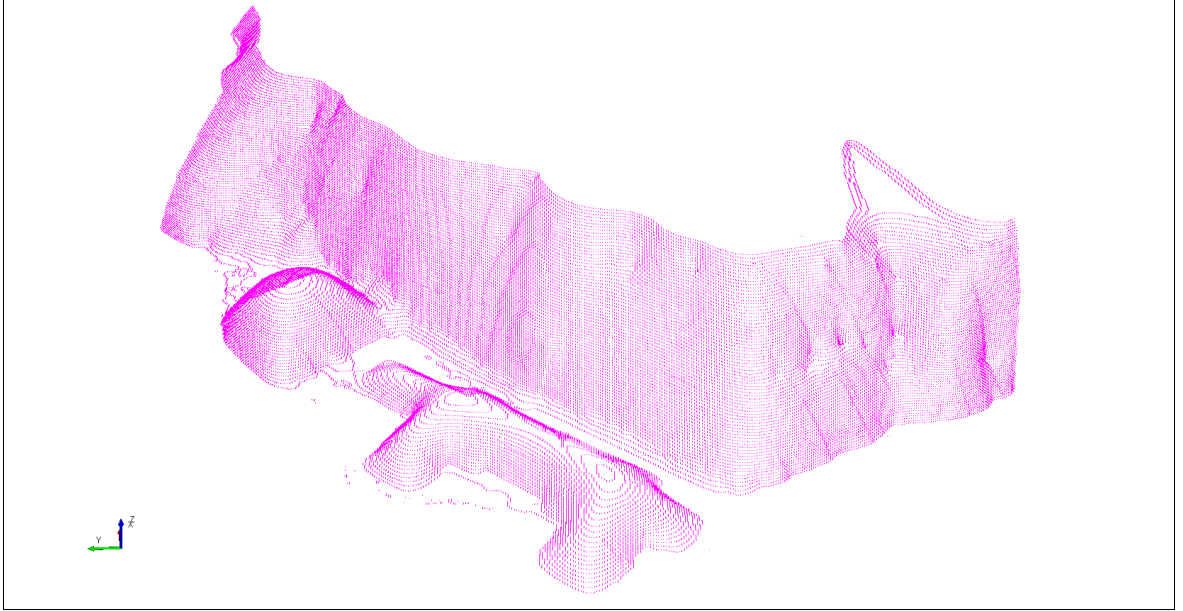
Tablo 13. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu

Risk Sınıfı	Toplam ağırlıklı skor 1-100	Risk	Gösterge koruma tedbirleri (seçim çalışılan bölgeye özgüdür)
I	<20	Çok düşük	Gerek yok. Seyrek müdahaleler olabilir.
II	21-40	Düşük	Kısıtlı derecede
III	41-60	Orta	Hafif tedbirler (örneğin bulonlar, ağlar, duraysız blokların alınması, basit hafif çitler)
IV	61-80	Yüksek	Aktif (bulonlar, ankrajlar gibi) ve pasif (ağlar, çelik halatlar, payandalı duvarlar, çitler, duraysız kayaların alınması) tedbirlerin birleşimi
V	81-100	Çok yüksek	Kritik stabilite durumu, genelleştirilmiş ve/veya güçlü aktif ve pasif tedbirlerin birleşimi. Geriye kalan risk kabullenilmelidir.

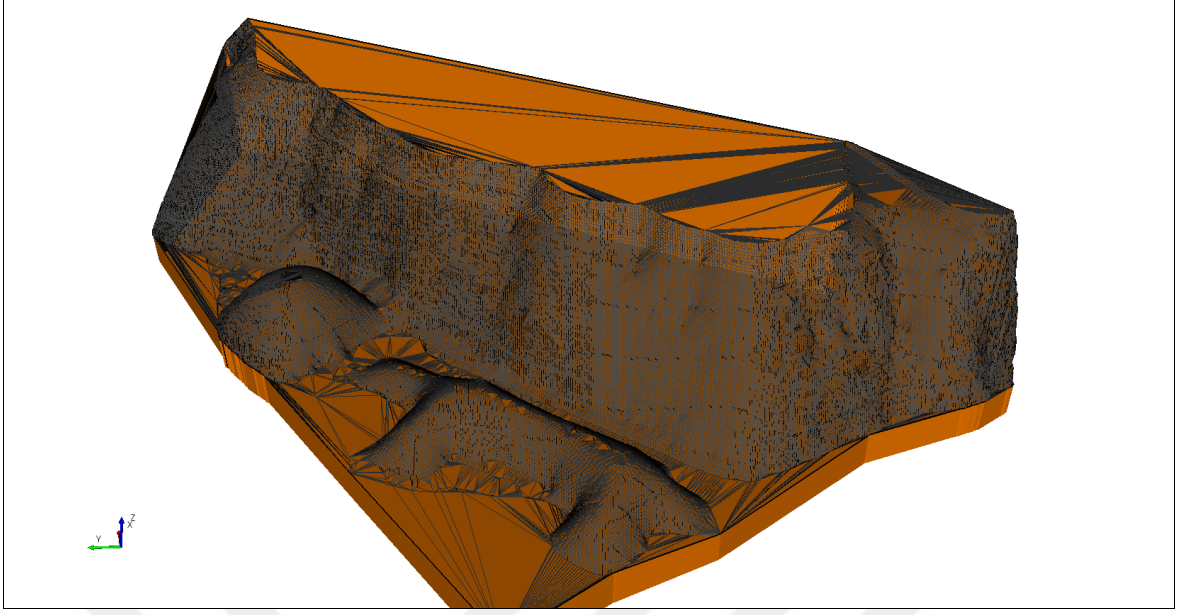
3.5.2. 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri

Araziden ve laboratuvar deney sonuçlarından elde verilen veriler doğrultusunda ilk olarak kinematik analiz sonrasında ise limit denge analizleri yapılmaktadır. Yapılan bu iki analiz ile kaya şevinde bir hareket olup olmayacağı tespit edilmektedir. İki analiz sonucunda kaya şevinde hareket bekleniyor ise 2 boyutlu veya 3 boyutlu analizler yapılmaktadır. Yapılan 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz ile kayaların hareket yolları, çarpma enerjileri, çarpma hızları, çarpma ve sıçrama yükseklikleri, çarpma noktaları ve durdukları yerler belirlenmektedir. Analizler sonucunda elde edilen bu veriler kullanılarak önleme-koruma yapıları önerilmektedir. Önerilen bu koruma ve önleme yapıları ile kaya ıslahı yapılmaktadır. Tez kapsamında sadece 3 boyutlu kaya düşme analizi yapılmıştır. Analizlerde RocPro3D 6.2.1 (2023) versiyonu kullanılmıştır.

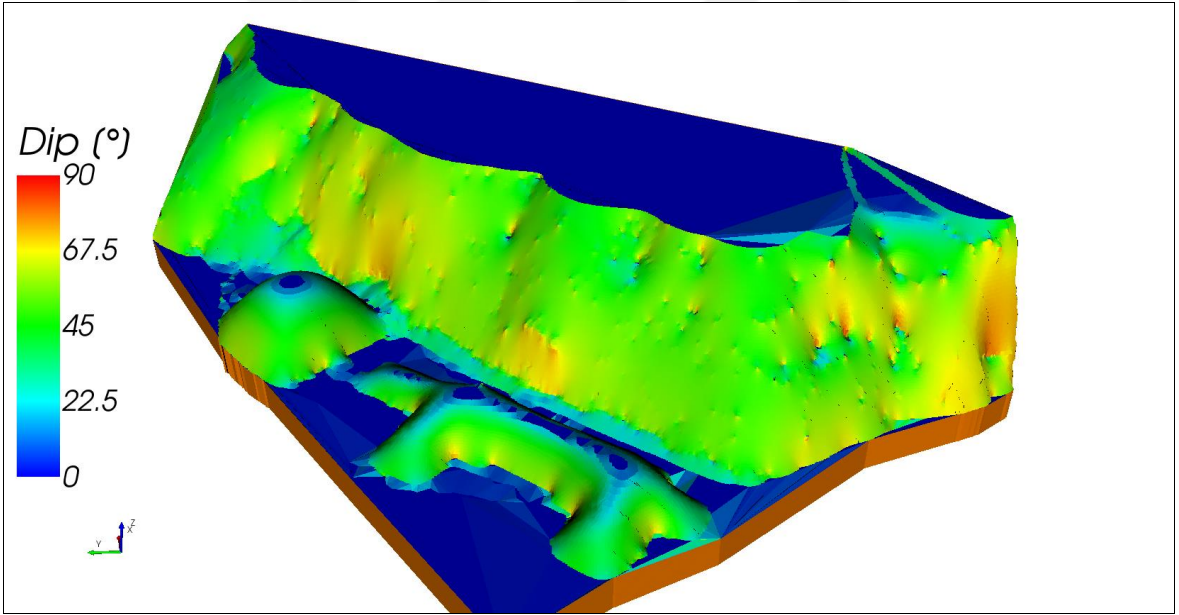
İnsansız hava aracı ile yapılan ölçüler kullanılarak çalışma alanı ve çevresinin nokta bulutu haritası, üçgen modeli, katı model, yükseklik, eğim ve bakı haritaları üretilmiştir. Üretilen bu 3 boyutlu katı model üzerine jeoloji işlenerek çalışma alanının jeolojik modeli hazırlanmıştır (Şekil 33-38). Sonrasında kaynak zonlar katı model üzerine işlenerek analizler yapılır. Yapılan analizler sonucunda çeşitli haritalar üretilir. Üretilen bu haritalar kullanılarak önleme-koruma yapıların yerleri, boyutları ve enerjileri tespit edilir. Önleme ve koruma yapılarının özellikler tespit edildikten sonra koruma ve önleme yapılarının performansı 3 boyutlu olarak test edilmektedir.



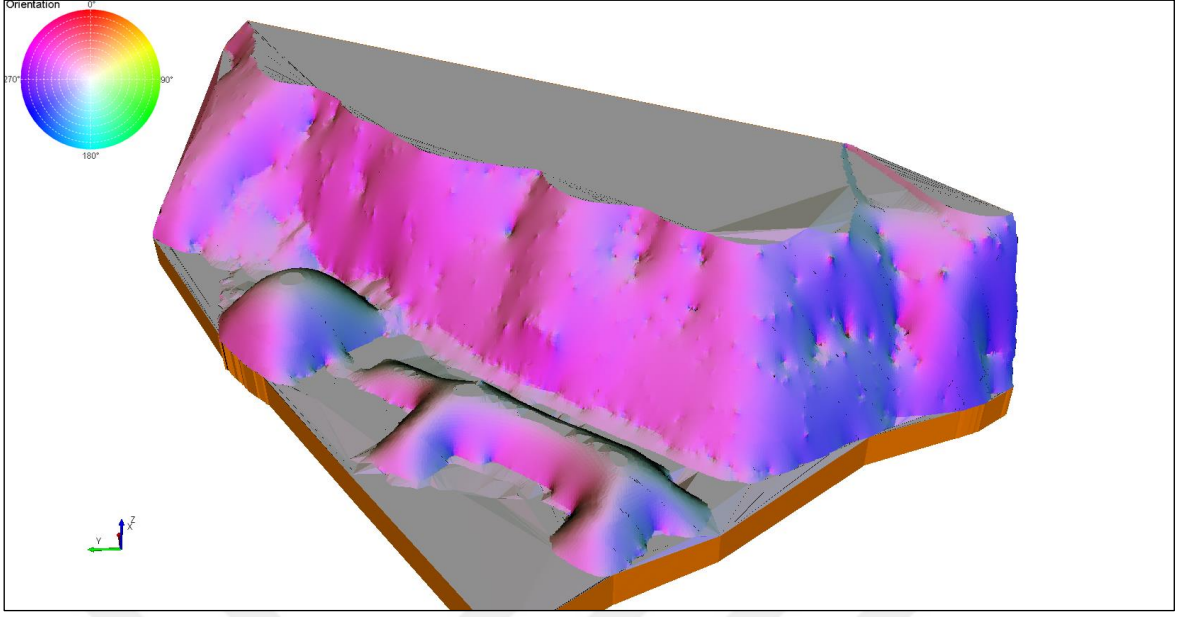
Şekil 33. Çalışma alanı ve çevresinin nokta bulutu



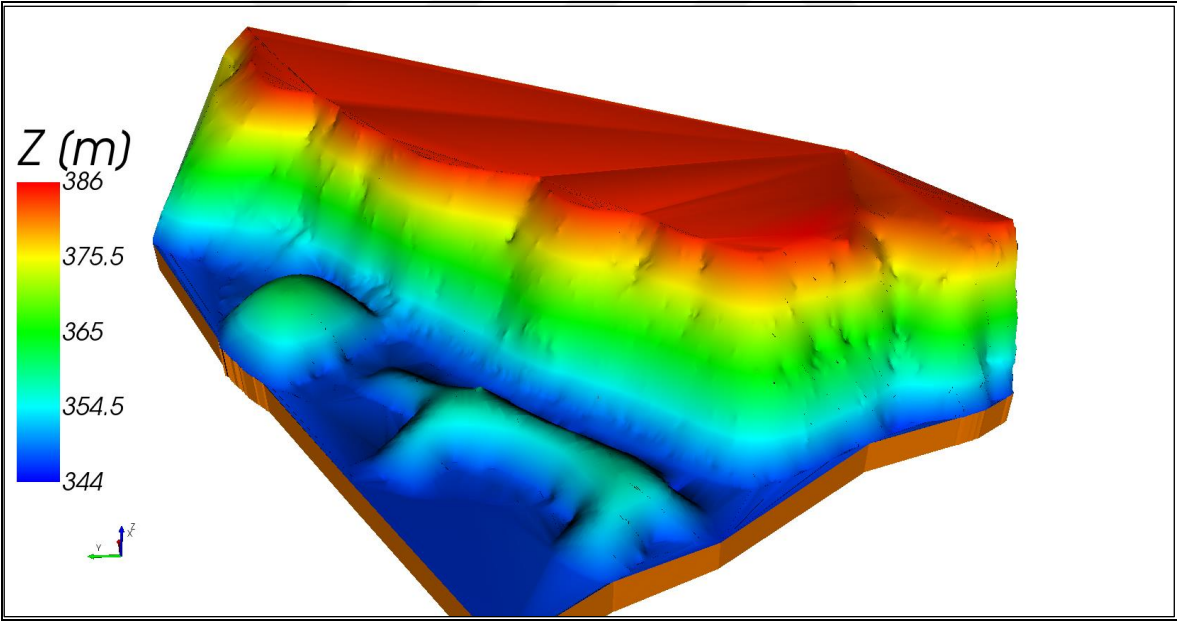
Şekil 34. Çalışma alanı ve çevresinin üçgen modeli



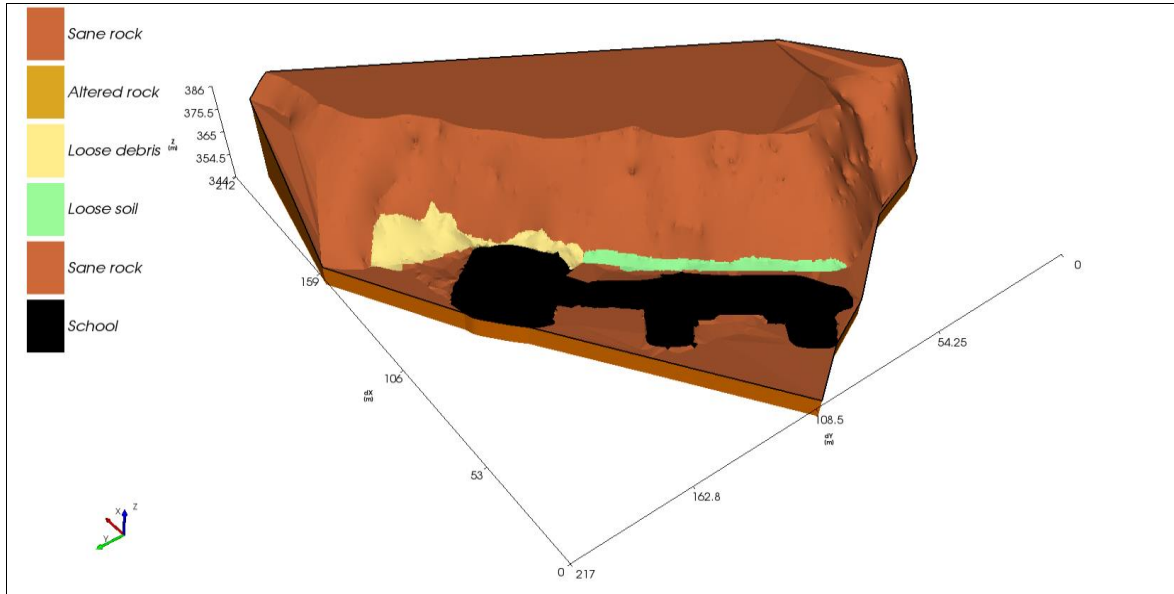
Şekil 35. Çalışma alanı ve çevresinin eğim haritası



Şekil 36. Çalışma alanı ve çevresinin bakı haritası

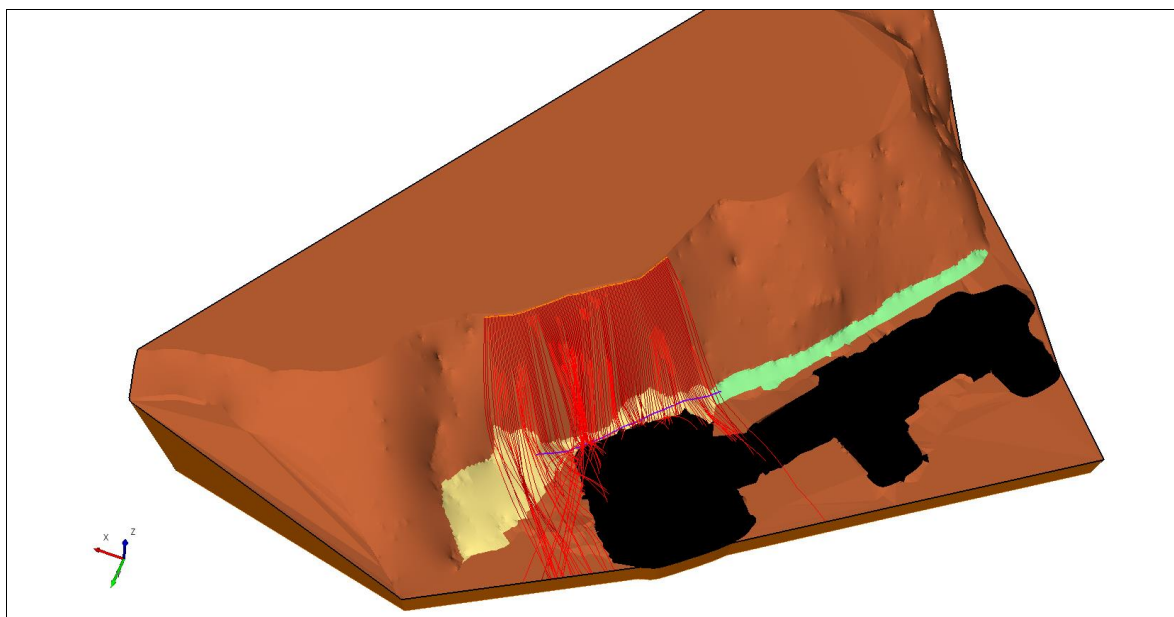


Şekil 37. Çalışma alanı ve çevresinin yükseklik haritası



Şekil 38. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası

Kaya düşmesi olayı, herhangi bir boyutta sahip olan kaya bloğunun yeteri kadar eğimli olan bir şevden veya yamaçtan yerçekimi ile düşey yöndeki hareketi olarak tanımlanır. Kaya düşmesi esnasında topoğrafyanın eğimine bağlı olarak sıçrama, yuvarlanma, serbest düşme (zıplama) şeklinde hareket türleri meydana gelmektedir (Ritchie 1963). Hareket eden kaya bloklarının enerjisinin bitmesi ile bloğun yuvarlanma hareketi ile birlikte blok kaymaları da olabilir (Şekil 39).



Şekil 39. Kaynak bölgeden yuvarlana blokların izledikleri yollar.

Kaya düşme olayının önüne geçmek amacıyla uygulanan tekniklerde amaç güvenlik katsayısının dolayısıyla şev duraylılığının artırılması olmayıp, kaya düşmelerinden kaynaklanabilecek afetlerin önlenmesi ve/veya en aza indirilmesidir. Kaya düşmelerinin denetim altına alınması ve bunlardan korunulması amacıyla değişik yöntemler kullanılmakta olup, bu yöntemlere aşağıda özet olarak değinilmiştir.

(a) Gerdirilmiş tel kafesler: Bu kafesler, yamaçlardan küçük kaya parçalarının düşmesinden korunmak için kullanılır ve şev yüzeyine serilerek tutturulurlar. Tel kafesler, kaya bloğunun enerjisini absorbe ederek kaya düşmelerine karşı şev topuğundaki yol, tesis ve yerleşim bölgeleri için riski azaltırlar. Şev yüzeyine gerilen tel kafesler yamaca ankrajla tutturularak gerdirilirler.

(b) Blok tutma hendekleri: Düşen kaya bloklarının enerjisini azaltmak ve daha uzak mesafelere yuvarlanmalarını önlemek için şev topuğunun ön kısmında blok tutma hendekleri inşa edilir. Hendekler, genişlik (W) ve derinlikleriyle (D) tanımlanırlar ve bu parametreler şev açısı ve yüksekliğiyle ilgilidir (Richie, 1963).

(c) Kaya tutma bariyerleri: Kaya bloklarının düşmesine karşı bir önlem olarak inşa edilen bariyerlerin boyutları; şevin boyutlarına, düşen blokların enerjisine ve yakın civardan inşaat malzemesi temin etme olanaklarına bağlıdır. Bariyerin fonksiyonu, yuvarlanan bloklara karşı bir engel şeklinde bir tür hendek oluşturmaktır. Bariyerler, özellikle blokların yuvarlandıkları, ancak önemli miktarda sıçramadıkları düşük eğime sahip yamaçlarda yararlıdır. En yaygın kullanılan bariyerler, gabionlar ve beton bloklar veya jeofabrik-toprak zemin türü bariyerlerdir.

(d) Geçiş tünelleri: Bu tüneller, kaya düşmelerinin kritik ve iyileştirme tekniklerinin uygulanmasının çok pahalı olduğu ortamlarda inşa edilirler. Ahşap tavana sahip bu tünellerin tavanı, düşen kaya bloğunun yeralacağı darbeye dayanabilecek sağlamlıkta inşa edilir.

(e) Püskürtme beton: Atmosferik etkilerle bozunmaya karşı oldukça duyarlı ve hızlı tepki gösteren birimlerde açılmış şevlerde koruma amacıyla şev yüzeyine basınçlı havayla püskürtme beton uygulanır. Bazen bu betona çim de karıştırılarak doğal bir görüntü verilmesi de sağlanabilmektedir.

Proje konusu alanda meydana gelen kaya düşme vakasının konumu (Şekil 40), topografik koşullar, erişim ve şev önü yapı stoğu parametreleri dikkate alındığında gerdirilmiş tel kafes uygulamasının en etkili çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kütle hareketinin meydana geldiği şev için yapılan kaya düşme riski sınıflaması ise en etkin

yöntemin duraysız kayaların alınması, ağ ve çelik halat uygulamasının tercih edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 40. Kaya düşme vakasının meydana geldiği kaya şevinin spor kompleksi ve çok programlı liseye göre konumu

Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde proje konusu kaya şevinin iyileştirilmesi amacıyla ilk aşamada yamaç temizliğinin yapılması, yamaç temizliği sonrasında tüm yüzeyin güçlendirilmiş çelik kafes ve halatlarla kaplanması gerekmektedir.

Yapılan arazi çalışmaları sonucunda spor tesisinin arka kesiminde bulunan kaya şevinin üst kotlarında kütleleri birkaç tona varan blokların askıda olduğu görülmüştür. Bununla birlikte süresizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinde daha küçük boyutlarda (yaklaşık 100-200 kg) birçok bloğun risk teşkil ettiği anlaşılmaktadır (Şekil 41). Bu nedenle ivedilikle bir ıslah çalışmasına başlamadan önce bu blokların kontrollü düşürülerek yamacın temizlenmesi gerekmektedir. Ancak kaya şevinin hemen önünde spor tesisi bulunmaktadır.

Bu nedenle, çalışma kapsamında yamaç temizliği sırasında ortaya çıkabilecek risklerin ortaya konulması amacıyla uygulanan 3D kaya düşme analizleri 3 temel başlıkta incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bunlar; (i) üç boyutlu arazi modelinin oluşturulması, (ii) farklı

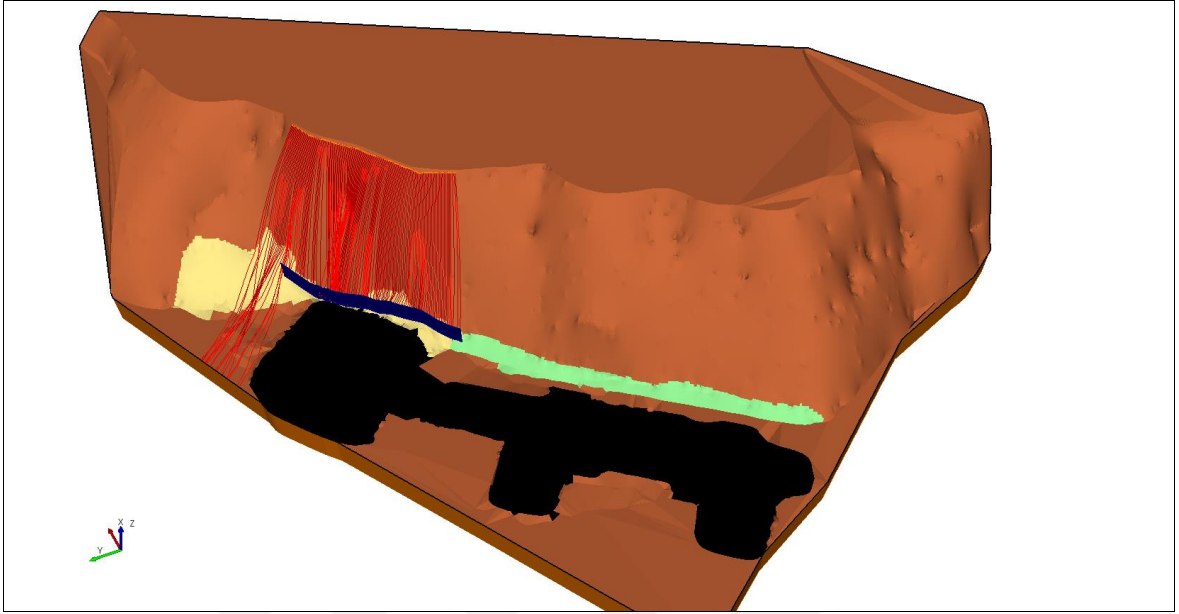
k t lelerdeki blokların hareketinin modellenmesi (Kaya düğüme analizi), (iii) kaya düğüme etkisinin değerlendirilmesi şeklinde sıralanabilir.



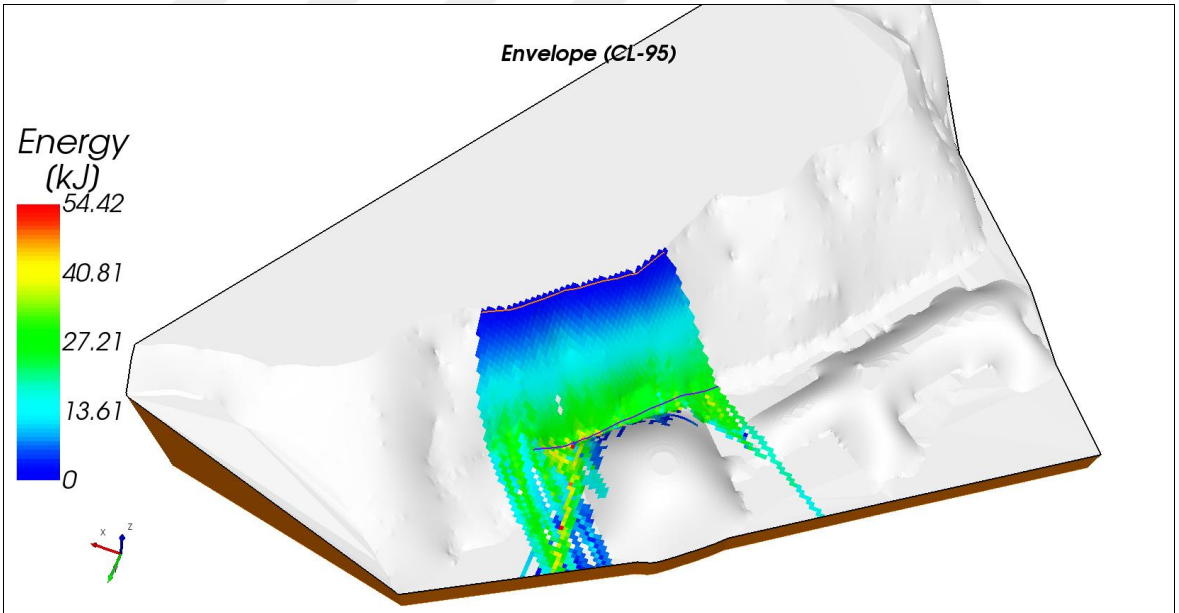
Şekil 41. Kaya  evinin üst kotlarında düğüme riski bulunan bloklar

Analizler için kullanılacak 3-boyutlu sayısal yüzey modeli proje sahasında dron uçuşları ile oluşturulan nokta bulutları kullanılarak hazırlanmıştır. 3-boyutlu kaya düğüme analizleri RocPro3D (RocPro3D, 2023) yazılımı ile gerçekleştirilmiş, sonuçlar  ekil 42-55’de verilmiştir. 3 boyutlu analizler değerlendirildiğinde gerek 100 kg, gerekse 5 tonluk blokların 50 m genişliğindeki bir  ev boyunca temizlenmesi sırasında hareket ederek blokların yaklaşık 2000kJ’luk bir enerji ve maksimum 4 metrelik bir sıçrama ile spor tesisine çarpacağı ve tesisin taşıma sistemlerine hasar vereceği net olarak görülmektedir. Bu nedenle yamaç temizliği uygulamasının kontrollü şekilde yapılması  onerilmektedir.

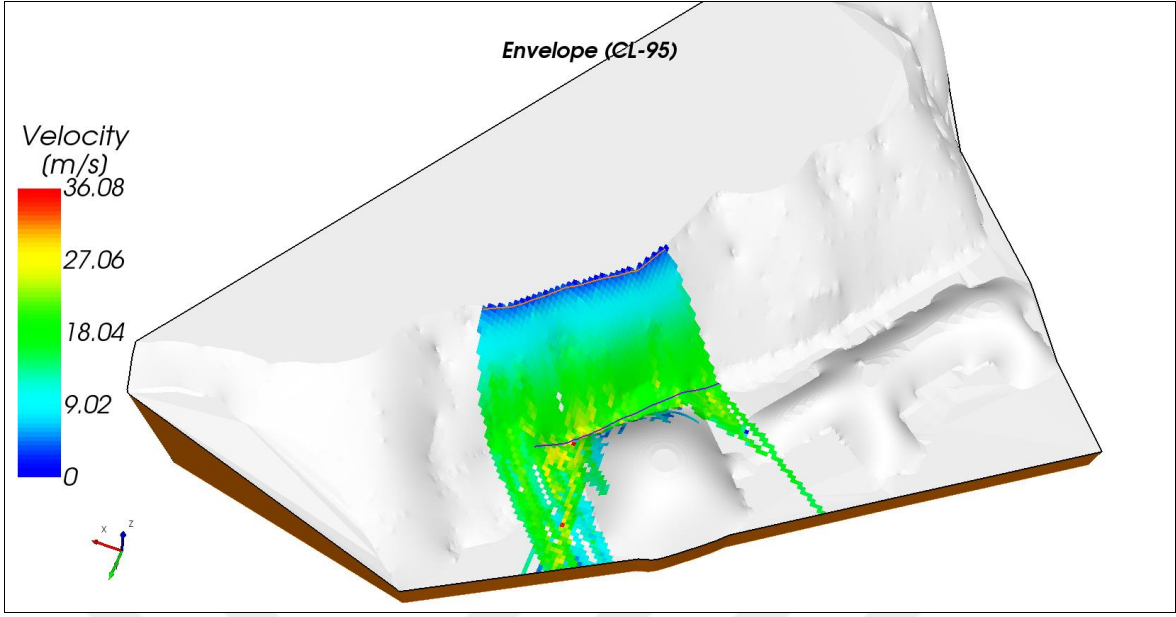
- 100 kg'lık bloklar için yapılan analiz sonuçları



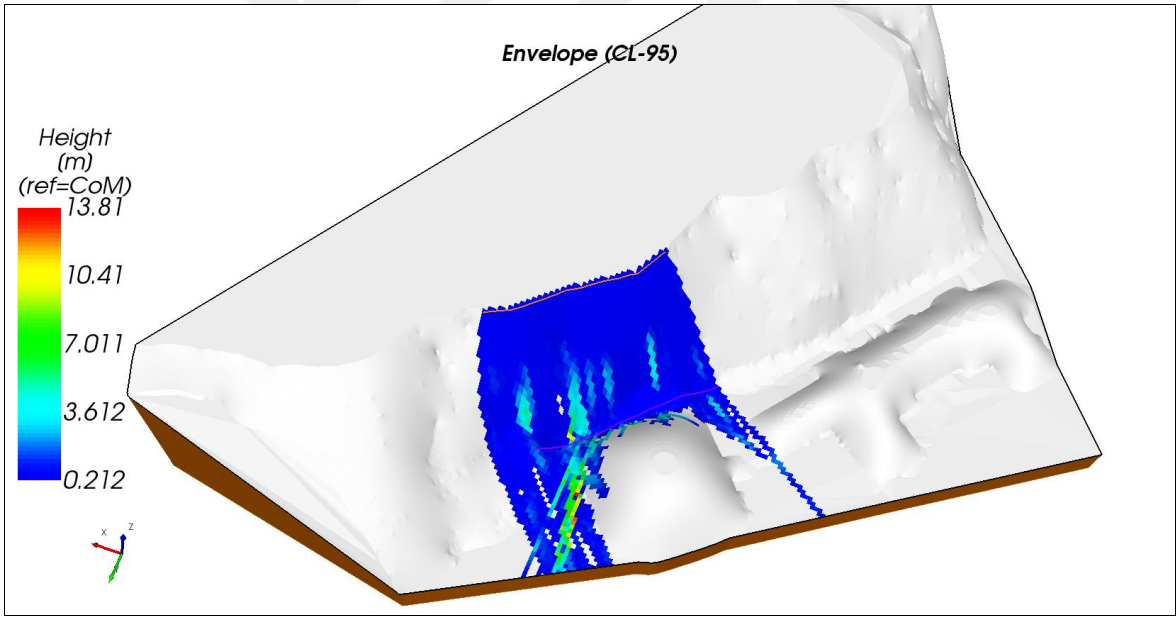
Şekil 42. Blokların izledikleri yörüngeleri



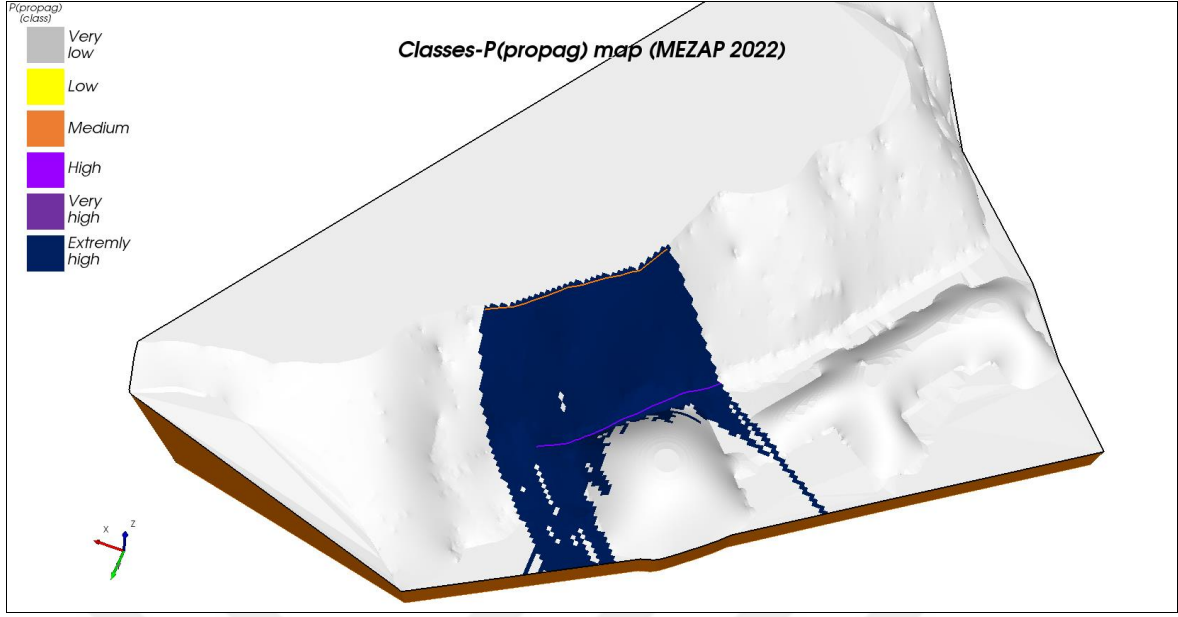
Şekil 43. 100 kg'lık blokların enerji haritası



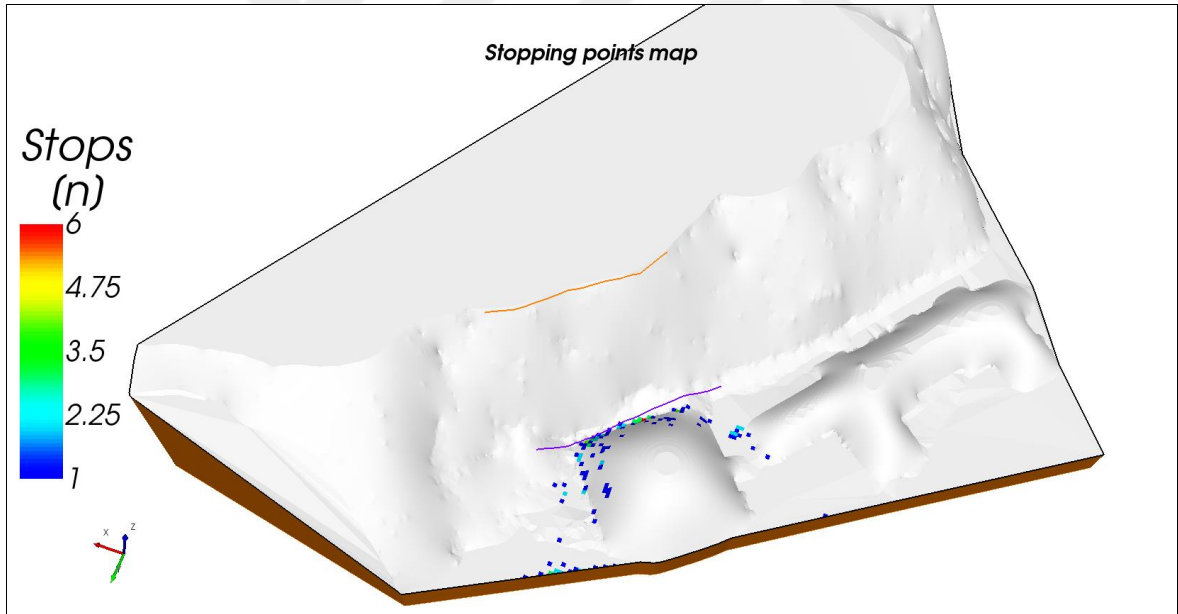
Şekil 44. 100 kg'lık blokların hız haritası



Şekil 45. 100 kg'lık blokların yükseklik haritası

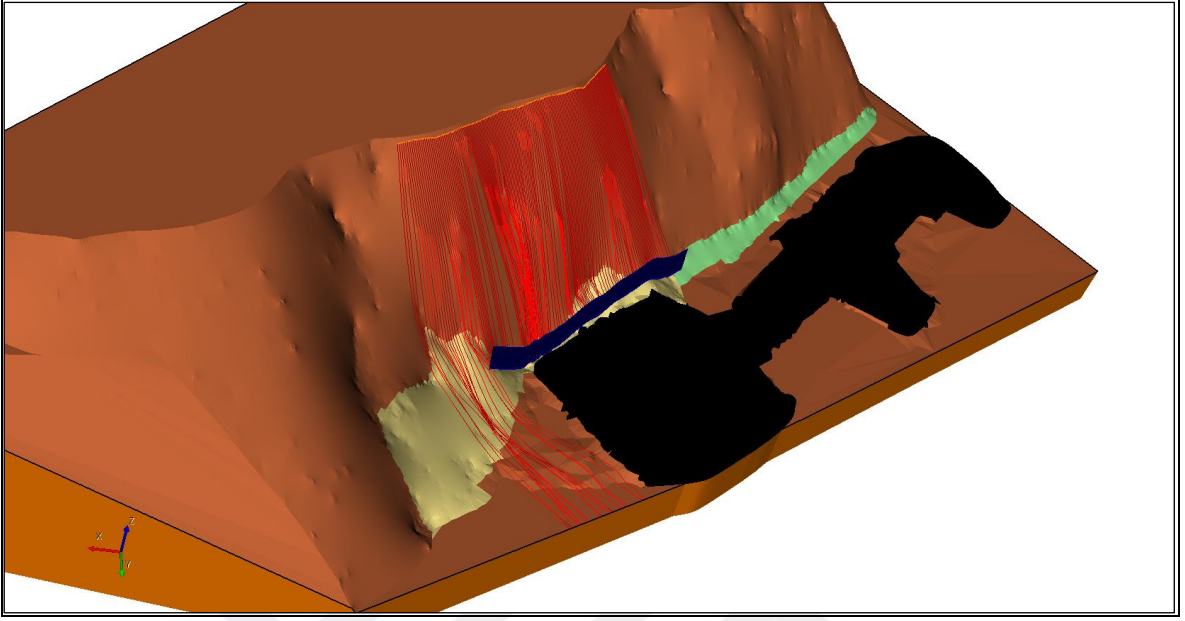


Şekil 46. 100 kg'lık blokların risk haritası

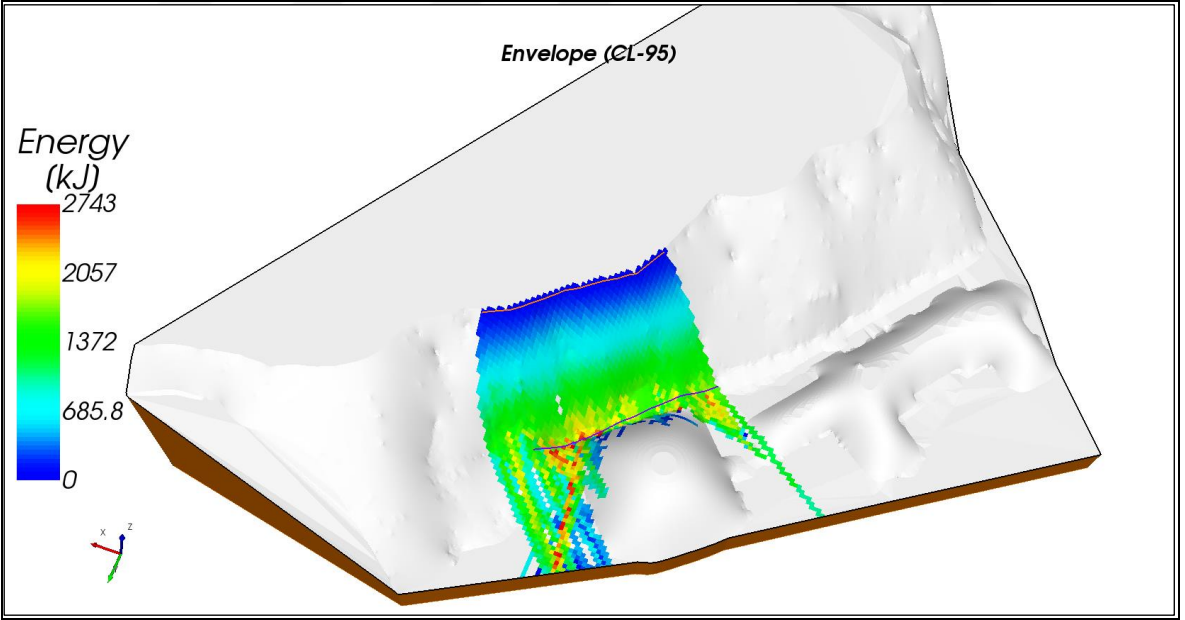


Şekil 47. 100 kg'lık blokların durma noktaları haritası

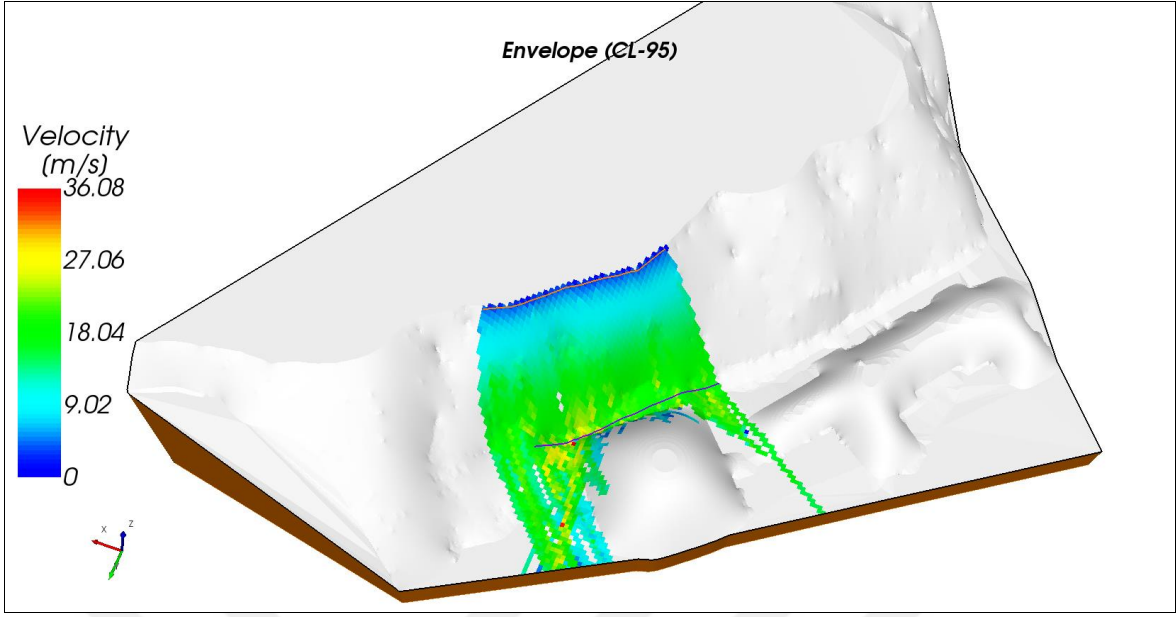
- 5 tonluk bloklar için yapılan analiz sonuçları



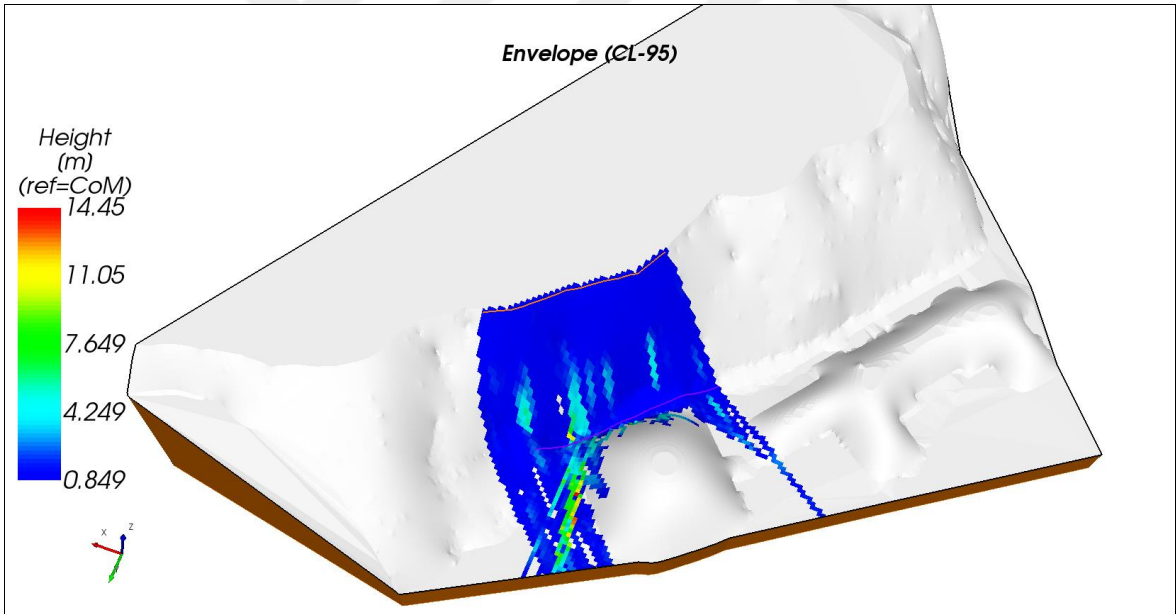
Şekil 48. Blokların izledikleri yörüngeleri



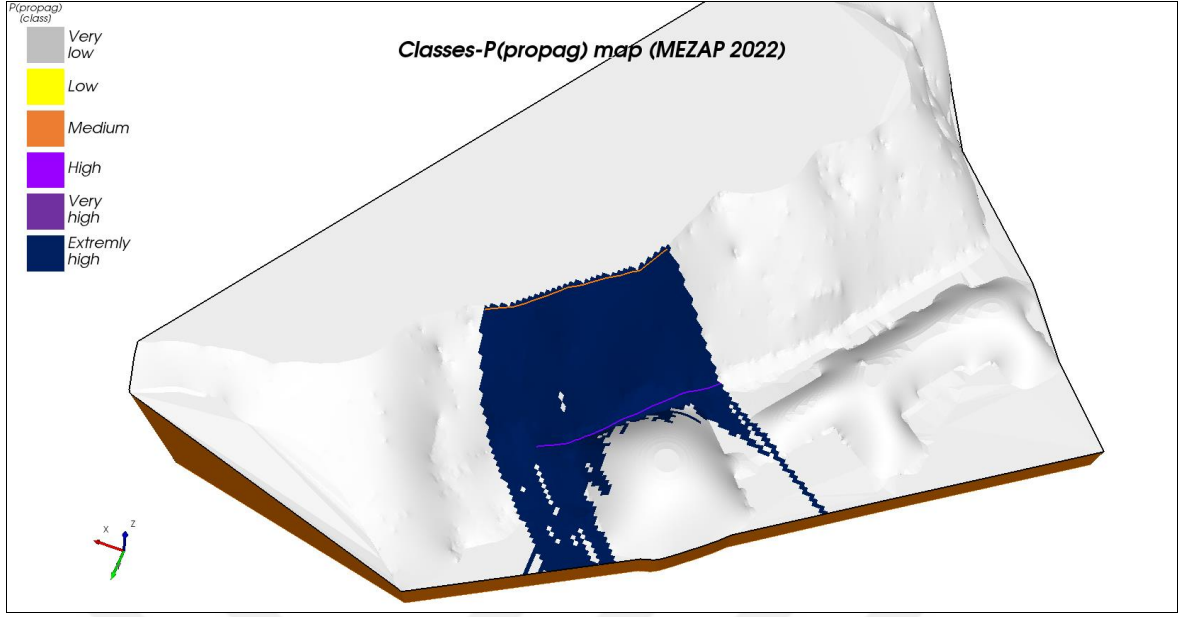
Şekil 49. 5 tonluk blokların enerji haritası



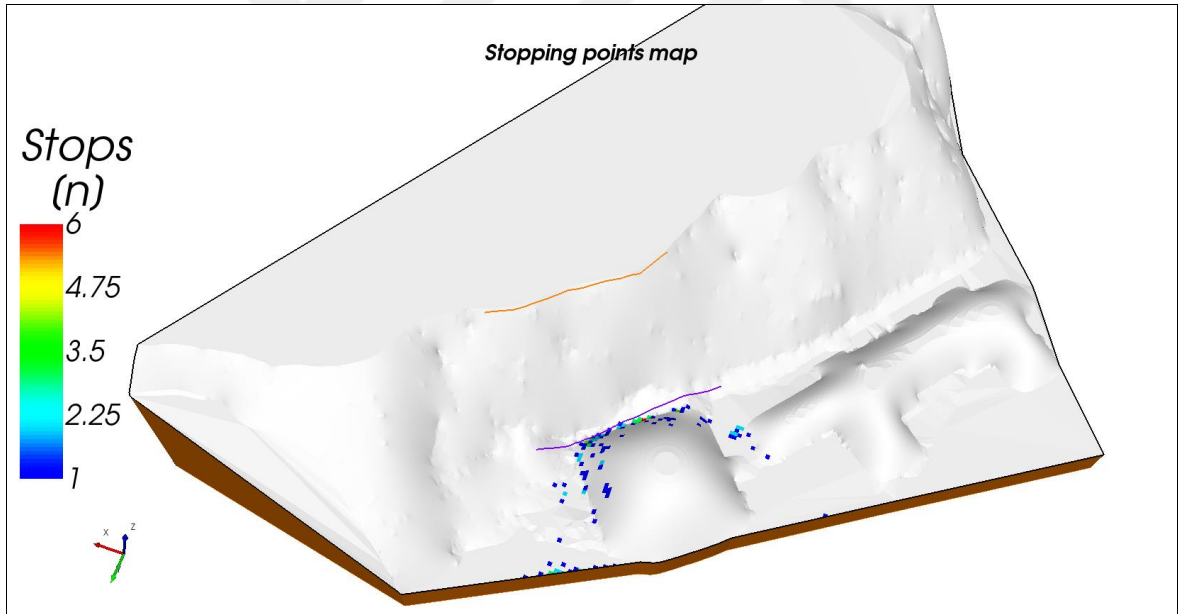
Şekil 50. 100 kg'lık blokların hız haritası



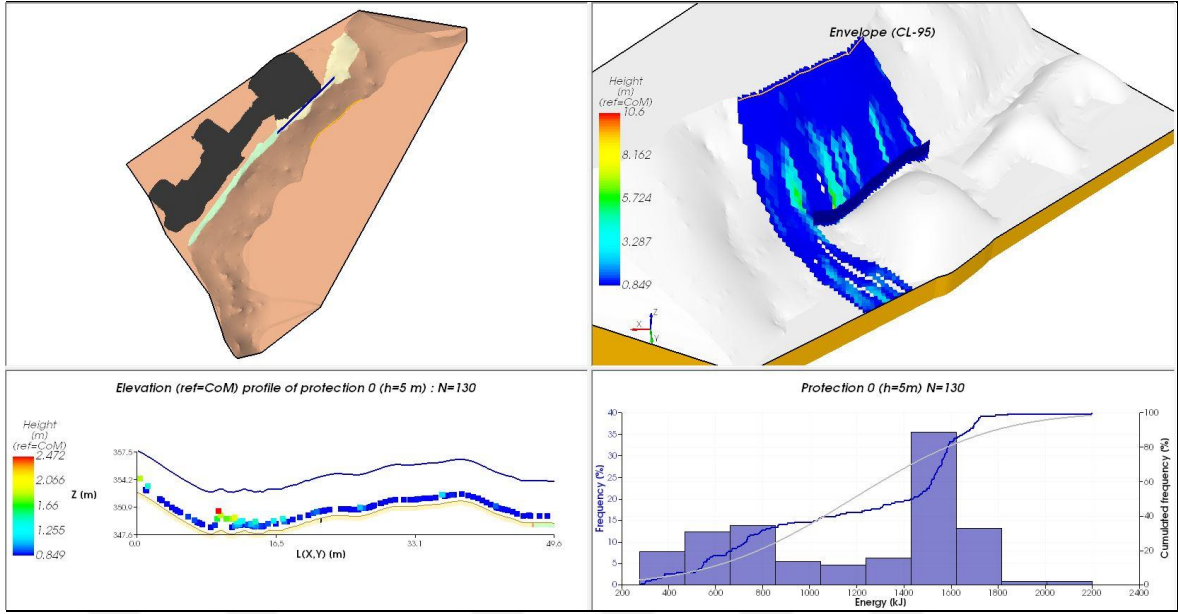
Şekil 51. 5 tonluk blokların yükseklik haritası



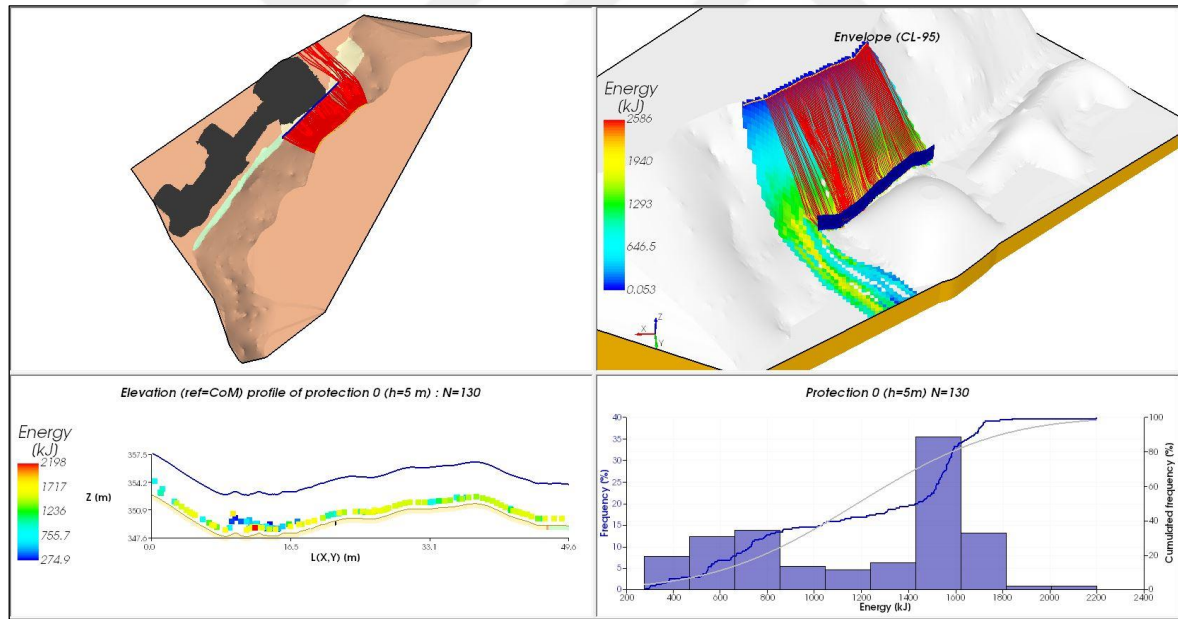
Şekil 52. 5 tonluk blokların risk haritası



Şekil 53. 5 tonluk blokların durma noktaları haritası



Şekil 54. Bariyerlerin çarpma enerjisi bakımından test edilmesi

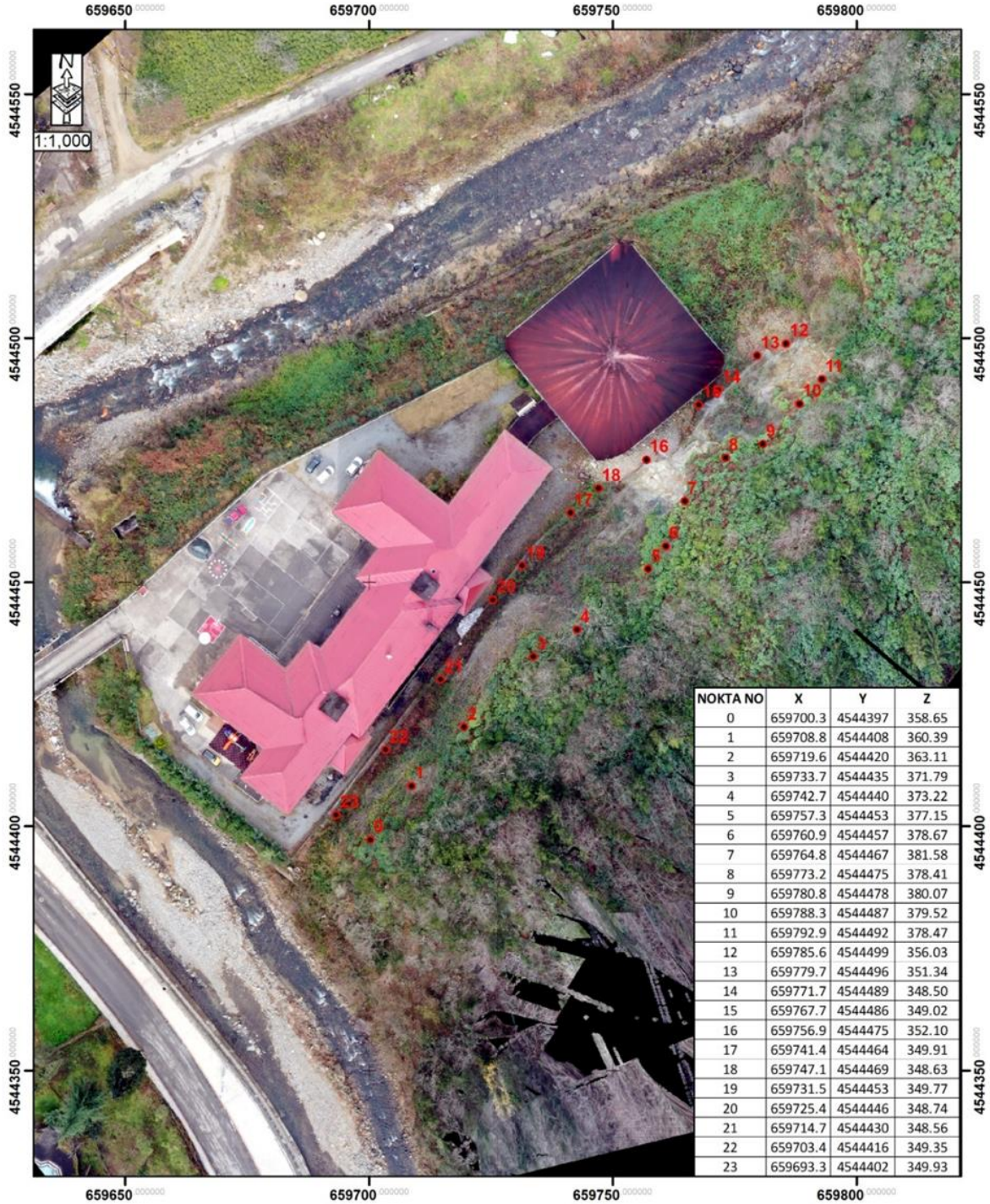


Şekil 55. Bariyerlerin çarpma yüksekliği bakımından test edilmesi

3.6. Kaya Şevi Islah Çalışmalarının Projelendirilmesi

Çalışma kapsamında; (i) jeolojik yapı, (ii) morfoloji, (iii) sahaya ulaşım ve (iv) uygulama yapılacak alan boyutu ve (v) yapı stoğu dikkate alınarak birden fazla ve bütüncül

bir ıslah yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Proje uygulama aşamasında Şekil 56'da verilen nokta ve koordinat verileri kullanılmalıdır.



Şekil 56. Kaya ıslah çalışmalarında kullanılacak konumsal veriler

Yapılan arazi çalışmaları ve değerlendirmeler sonucunda proje sahası 2 ayrı zona ayrılmıştır. Bunlar;

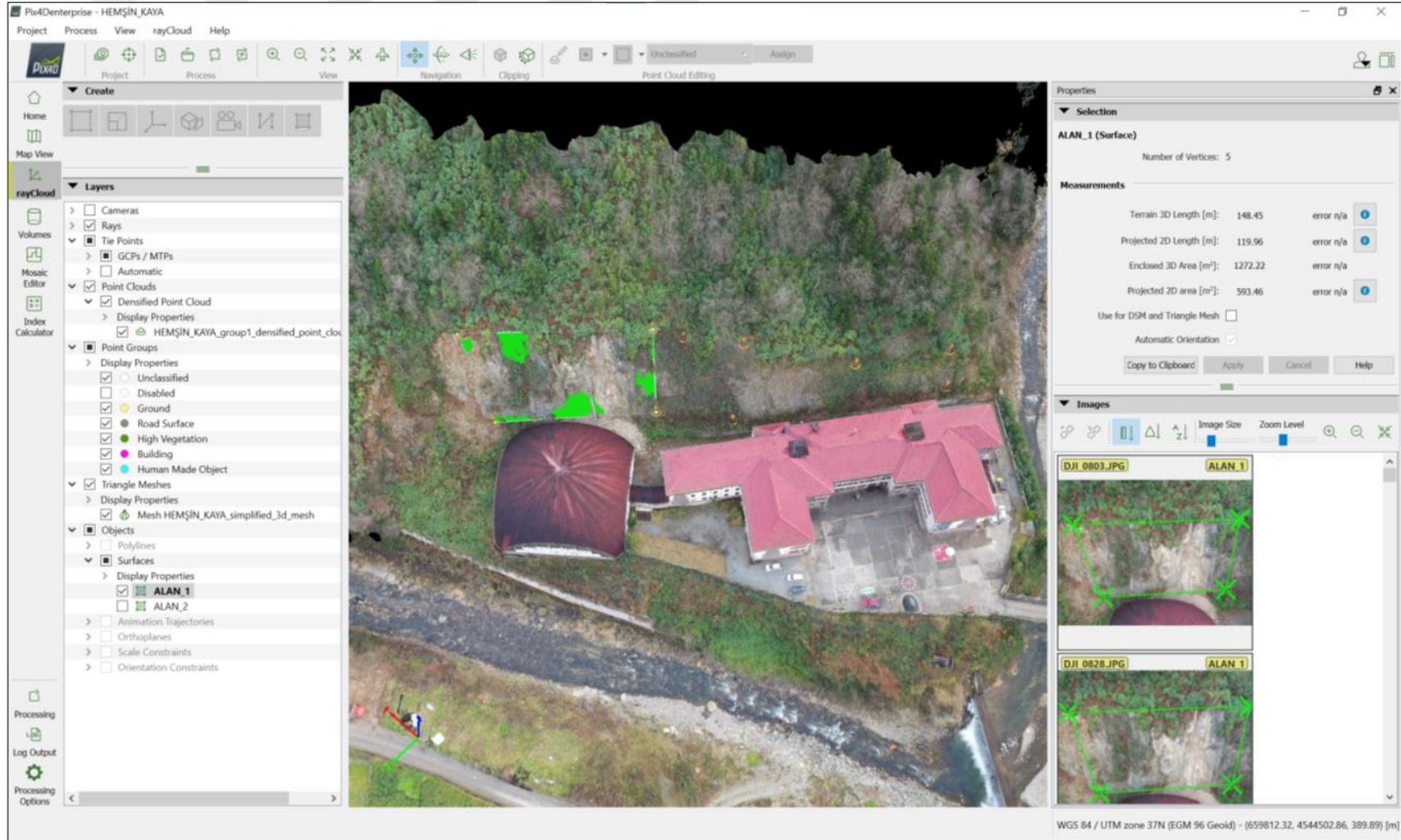
Bölge-1: Spor tesisinin arkasında kalan ve kaya düşme vakasının yaşandığı alan (Şekil 56'da 5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-18-17 nolu noktaları birleştiren alan)

Bölge-2: Çok programlı lisenin arkasında kalan alan (0-1-2-3-4-5-17-19-20-21-22-23 nolu noktaları birleştiren alan)

3.6.1. Bölge-1 İçin Kaya Şevi Islah Çalışmalarının Projelendirilmesi

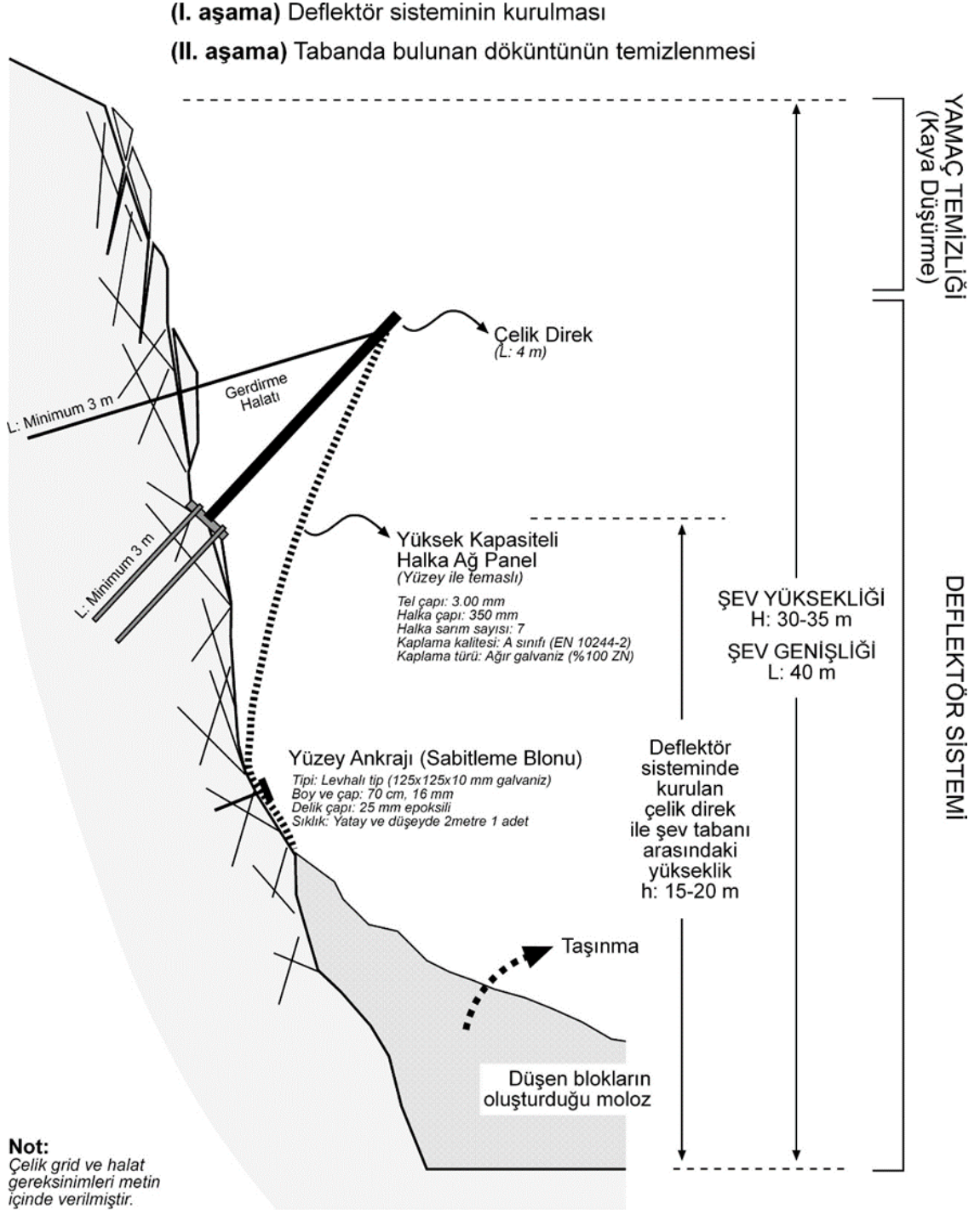
Spor tesisinin arka kesiminde kalan Bölge-1'de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarı dron uçuşları sırasında yapılan ölçümler sonucunda belirlenmiştir (Şekil 57). Yaklaşık 40 m genişliğinde 30 m yüksekliğinde olan Bölge-1'in toplam alanı 1272 m²'dir. Bu alanda, proje aşamasında aşağıda maddeler halinde sıralanan ıslah yöntemlerinin sırasıyla uygulanması önerilmektedir.

- 1) Proje konusu yamaç deflektör sisteminin kurulması: Yamaç temizliği sırasında düşecek blokların spor tesisine ulaşmadan tasfiyesinin sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle kaya şevinin taban kesiminde kaya bariyeri kurmak için yeterli alan olmadığı için şev yüzeyine deflektör sistemi kurulmalıdır. Bu sistem minimum bakım gerektiren bir sistem olup yüksek kapasiteli koruma sağlar. Sistem sayesinde düşen kaya kütleleri yakalama ağına takılır ve ağına içine doğru yönlendirilirler. Bu ağların kütlesi tarafından üretilen atalet (eylemsizlik) kuvvetinin, aşınmış büyük kayaları, kayalıklardan dibine doğru yönlendiren bir frenleme etkisi vardır. Bunun sayesinde, düşen bu aşınmış kayaların hızı ve enerjisi önemli ölçüde azalır. Proje kapsamında, düşen blokların sisteme zarar vermemesi amacıyla bariyerin blok enerjisinin 1000kJ'u, sıçrama yüksekliğinin 2 metreyi geçmediği bir yüksekliğe kurulması önerilmektedir. Şekil 57'de görülen 3 boyutlu kaya düşme analizleri değerlendirildiğinde şev ortasına (şev tabanından itibaren 15-20 m yüksekliğe) kurulacak deflektör sisteminin belirtilen gereksinimi konumsal olarak sağlar nitelikte olacağı görülmektedir. 40 m genişlik boyunca uygulanacak sisteme ait kesit Şekil 58'de verilmiştir.



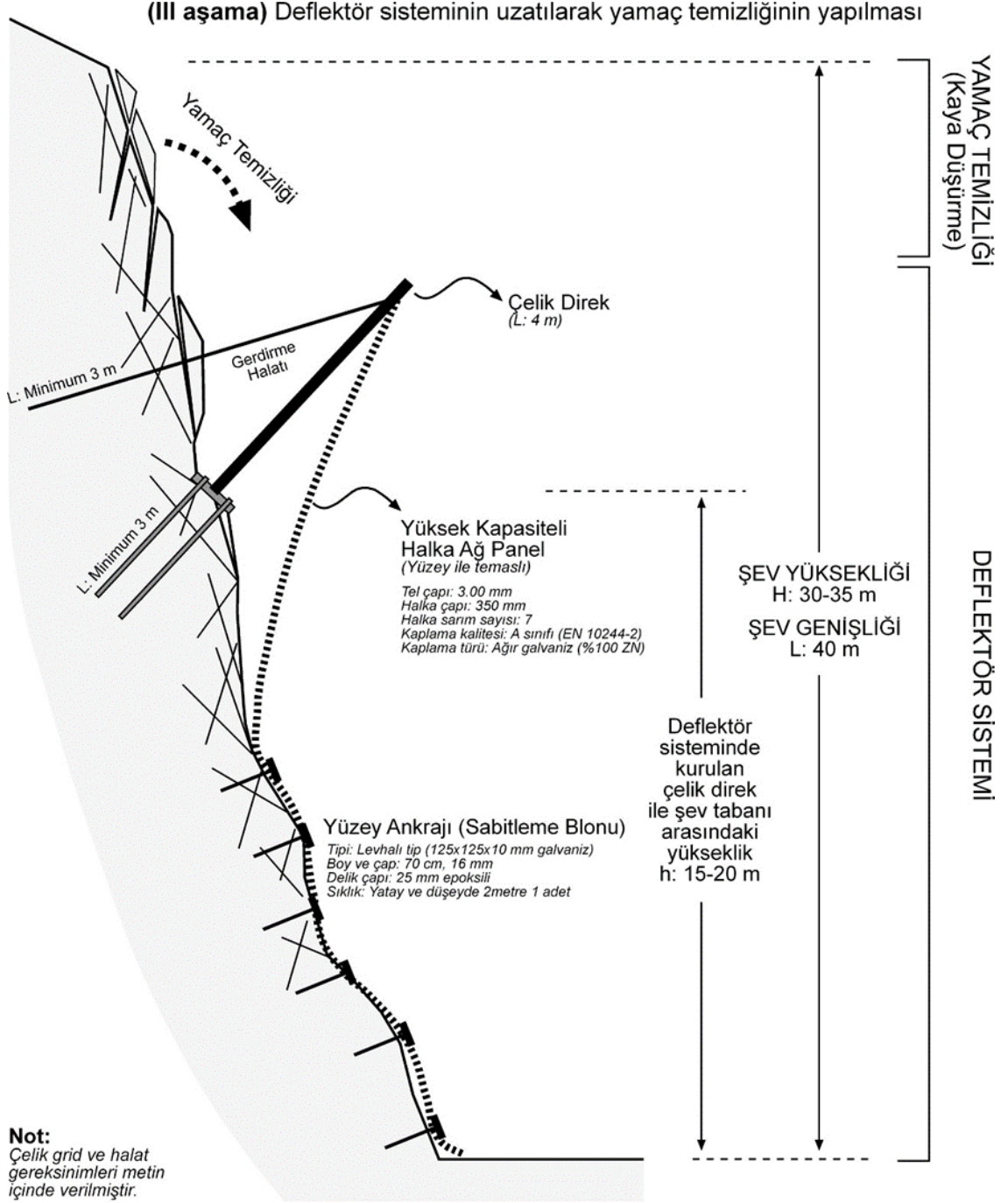
Şekil 57. Bölge-1’de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarının hesaplanması

- 2) Şev tabanında bulunan kaya bloklarının temizlenmesi: Deflektör sisteminin kurularak kaya düşe riskine karşı önlem alındığı için yamaç tabanında temizlik yapılarak kaya düşme sonrası kaya blokları ile dolan kesim temizlenmelidir (Şekil 58).



Şekil 58. Bölge-1’de deflektör sisteminin kurulması ve düşen blokların oluşturduğu molozun temizlenmesi

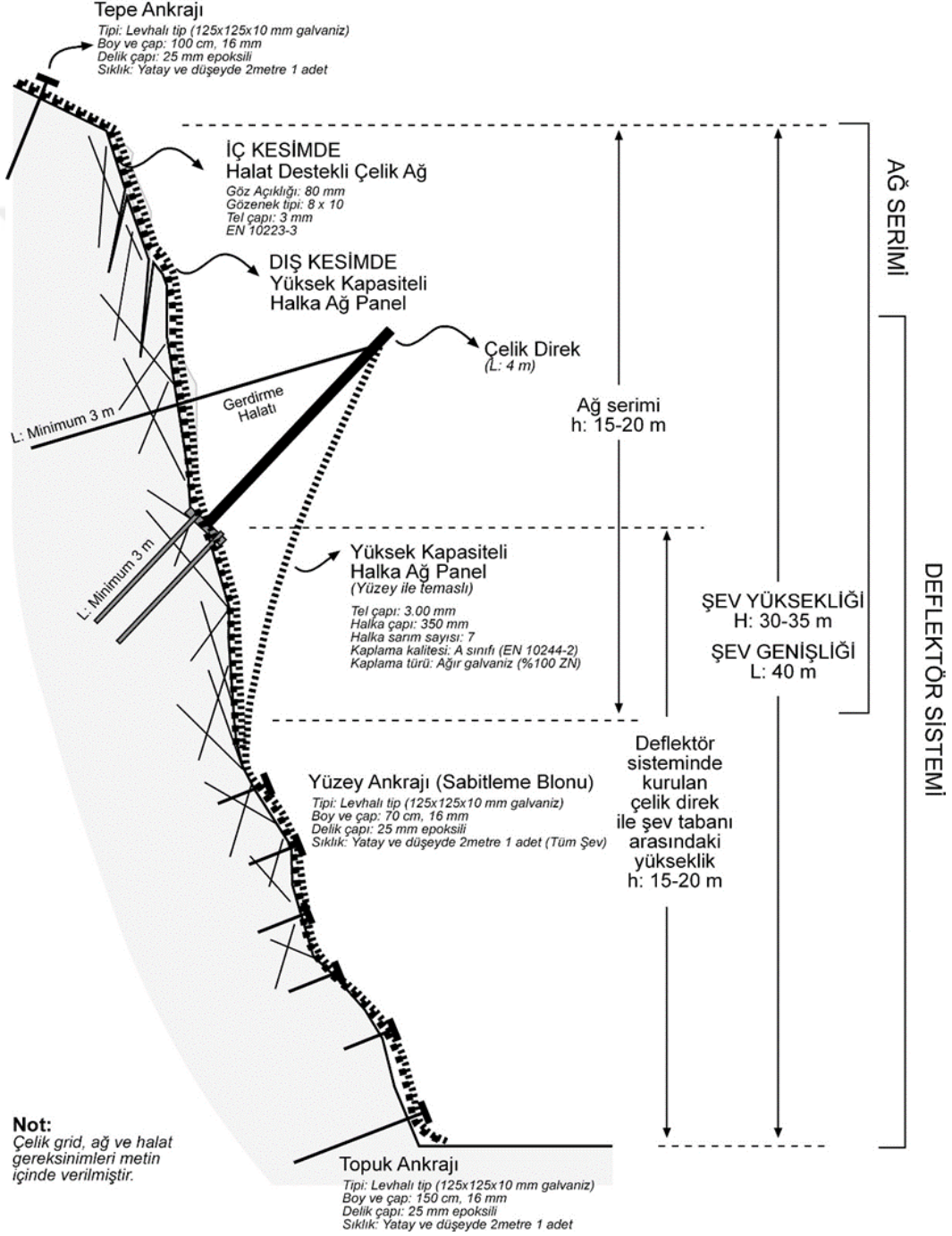
- 3) Deflektör sisteminden üst kotlarında yamaç temizliğinin yapılması (kaya düşürme):
Yamaç temizliği sırasında düşecek blokların spor tesisine ulaşmadan deflektör sisteminin içinde sönümlenmesi beklendiği için üst kotlarda bulunan blokların düşürülmesi ve şevin üst kotlarının güvenli hale getirilmesi sağlanmalıdır (Şekil 59).



Şekil 59. Bölge-1’de deflektör sisteminin kurulması ve şev tabanı temizliği sonrası deflektör sisteminin uzatılması

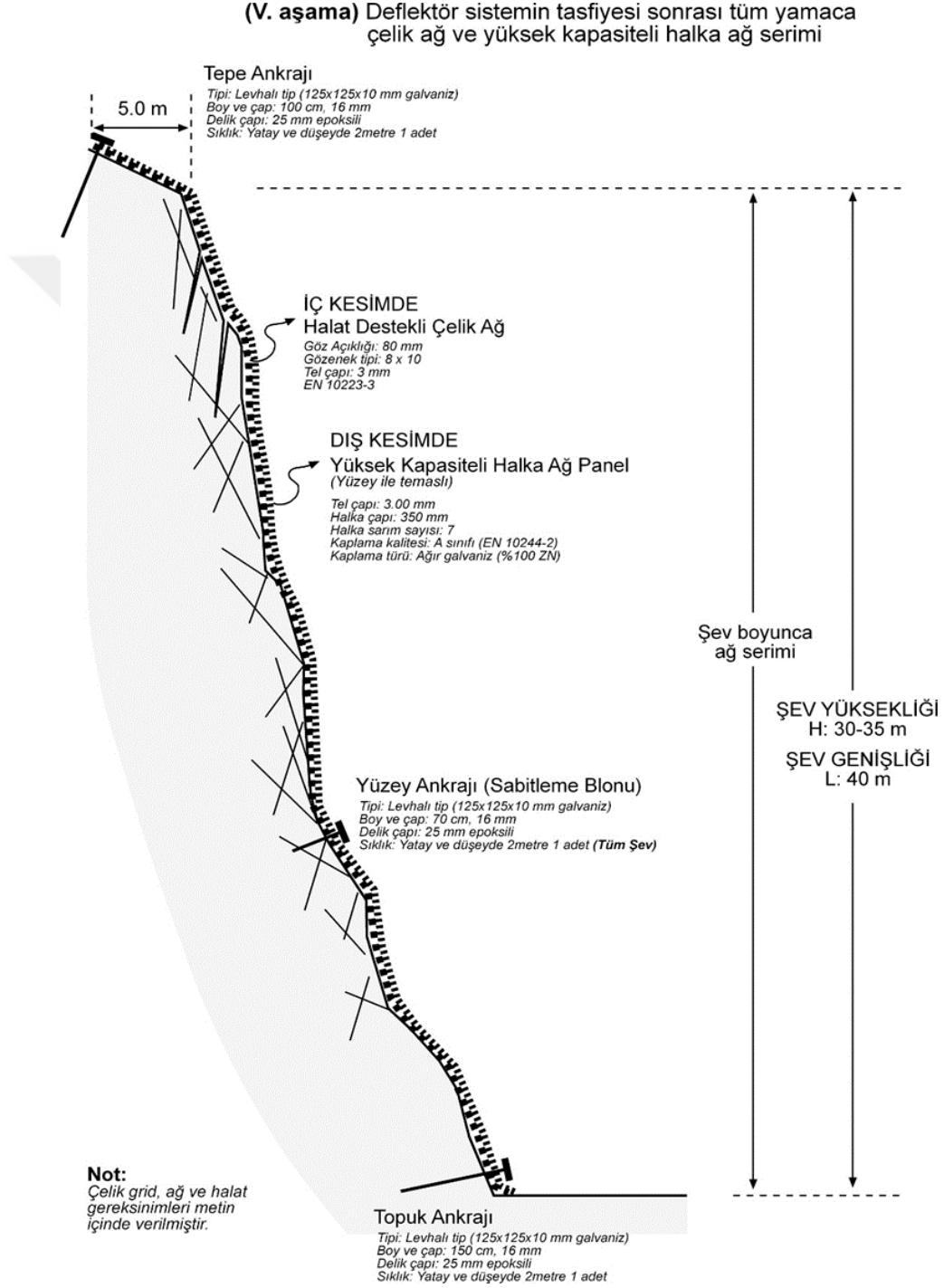
- 4) Deflektör sisteminin üst kotlarına ağ sisteminin uygulanması: Deflektör sisteminin zarar görmemesi durumunda sistemin üst kotlarında bulunan kaya yüzeyine halat destekli çelik ağ (Göz açıklığı 8-10 galvaniz Q3 mm kalınlığındaki çelik ağ) ve yüksek kapasiteli halka ağ ile şev koruma uygulaması yapılmalıdır (Şekil 60).

(IV. aşama) Yamaç temizliği yapılan alana çelik ağ ve yüksek kapasiteli halka ağ serimi



Şekil 60. Bölge-1’de deflektör sisteminin kurulması ve yamaç temizliğinin yapılması sonrası yamaç temizliği yapılan alana ağ serimi

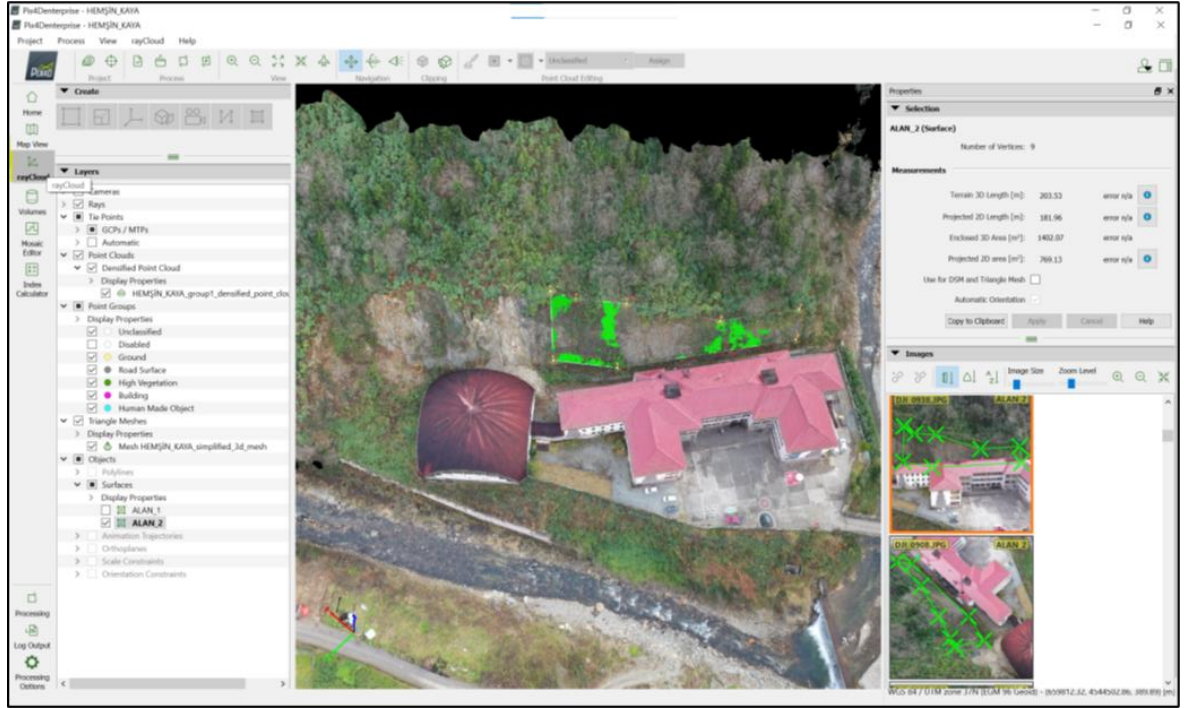
- 5) Alternatif uygulama: Deflektör sisteminin kaya temizliği sırasında zarar görmesi durumunda sistemin tamamen sökülerek tüm kaya yüzeyine halat destekli çelik ağ (Göz açıklığı 8-10 galvaniz Q3 mm kalınlığındaki çelik ağ) ve yüksek kapasiteli halka ağ ile şev koruma uygulaması yapılmalıdır (Şekil 61).



Şekil 61. Bölge-1’de deflektör sisteminin hasar görmesi durumunda tüm sistemin sökülerek tüm yamaca çelik ağ ve yüksek kapasiteli halka ağ uygulaması

3.6.2. Bölge-2 İçin Kaya Şevi İslah Çalışmalarının Projelendirilmesi

Çok programlı lisenin arka kesiminde kalan Bölge-2’de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarı dron uçuşları sırasında yapılan ölçümler sonucunda belirlenmiştir (Şekil 62). Yaklaşık 80 m genişliğinde 10-30 m arasında değişen yüksekliğe sahip olan Bölge-1’in toplam alanı 1402 m²’dir. Bu alanda, proje aşamasında sadece işlevliğini yitirmiş blonların yenilenmesi önerilmektedir.



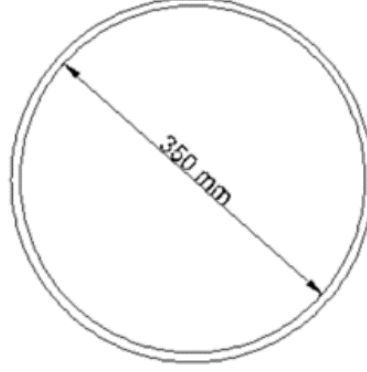
Şekil 62. Bölge-2’de yapılacak ıslah çalışmalarının uygulanacağı toplam alan miktarının hesaplanması

3.7. Uygulanması Önerilen Sistemin Özellikleri

3.7.1. Yüksek Kapasiteli Halka Ağ (Halkalı Panel Sistemi)

Halkalı Panel sistemleri yüksek dayanımlı ve esnek koruma sistemleri gerektiğinde kullanılan yüksek kapasiteli kaplama sistemleridir. Yüksek statik ve dinamik yüklere karşı, yüksek dayanımlı ve esnek halatların oluşturduğu halka tipi panel sistemlerdir. Halkalı Panel

sistemler, kinetik enerjiyi paneli oluşturan halkaların toplam deformasyonu ile absorbe eder; panel boyunca gelen yükleri, mevcut ankrajlara dağıtarak gerilmeleri azaltır.



Şekil 63. Tek Halkanın Geometrisi

Kullanılması önerilen tel çapı 3.00 mm'dir. Her bir halkanın oluşması için 3.00 (Tolerans Miktarı: $\pm 10\%$) mm'lik tel 7 kez sarılmalıdır (7 Sarım) (Şekil 63). Tellerden oluşan halkaların çapı en az 350 mm olmalıdır (Tolerans Miktarı: $\pm 10\%$). Halkalı Panel sarmal tellerin birbirine bağlanması ile elde edilirler. Her bir halka etrafındaki diğer 4 halka ile temas halinde olmalıdır (Şekil 65). 20 mm çapında galvanizle kaplı kilit kullanılmalıdır. Projede uygulanacak halka panel teknik özellikleri Tablo 14'te özetlenmiştir.



Şekil 64. Uygulamada kullanılması önerilen mapa

Tablo 14. Halka panel teknik özellikleri

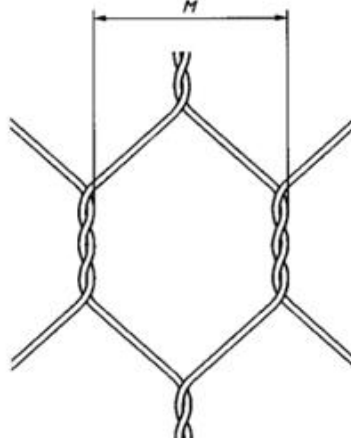
Panel Tipi	Teknik Özellikler
Tel Çapı	3.00 mm ($\pm 10\%$)
Çeliğin Minimum Çekme Gerilmesi	$\geq 1300 \text{ N/mm}^2$
Kaplama Türü	Ağır Galvaniz (%100 ZN)
Kaplama Kalitesi	A Sınıfı (EN 10244-2)
Halka Çapı	350 mm ($\pm 10\%$)
Bir halkanın oluştuğu Sarım Sayısı	7



Şekil 65. Halka panel bağlantı görünümü

3.7.2. Çelik Grid Tel Ağ

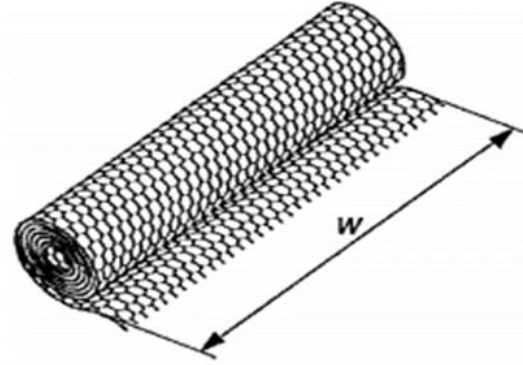
Altıgen iki çift büküm kenarın, sağ taraflarından birbirine olan mesafe EN 10223-3:2013 standartlarına uygun olmalıdır (Şekil 66).



Şekil 66. Tel Ağ Gözenek Açıklığı

Çift bükümlü altıgen çelik tel ağ, iki adet çelik telin birbiri etrafında tek bir yönde 180° den fazla bir dönüş ile iki kere burulmasıyla oluşturulmalıdır.

Kaya-taş düşmesi ve yüzeysel döküntüyü önlemek için kullanılan çift bükümlü çelik tel ağ rulodur. Kenar bağlama teli, bağlama telinden daha büyük çapta telden yapılmalıdır (Şekil 67).



Şekil 67. Çelik Tel Ağ Rulosu (W: genişlik)

Çelik tel ağlar, hegzagonal (altıgen) gözenek tipinde çelik tellerden EN 10223-3:2013 standardında belirtilen esaslara uygun şekilde çift bükümlü olarak imal edilmiş olmalıdır. 8x10 gözenek tipinde, 3 mm tel kalınlığında, ağır galvaniz kaplamalı çelik tel ağ ürününe ait özellikler Tablo 15' te verilmiştir. Ruloların boyut ve ebatları 16' da verilmiştir.

Tablo 15. Tel ağ özellikleri (EN 10223-3:2013, Tablo 2 uyarınca)

Gözenek Tipi	M=Göz Açıklığı (mm)	Tolerans Payı (mm)	Tel Çapı (mm)
8x10	80	-0/+10	3

Tablo 16. Standart Tel Ağ Ebatları

L=Rulo Uzunluğu (m)	H=Rulo Genişliği (m)
25	2, 3, 4
50	2, 3, 4
100	2, 3, 4

Çelik tel ağ imalatında kullanılan çelik teller, aşağıda belirtilen özelliklerde olmalıdır (Bahsi geçen testler, çift büküme girmemiş minimum 25 cm uzunluğundaki numune üzerinden elde edilen verilere göre değerlendirilmelidir) (Tablo 17).

Tablo 17. Çelik tel için önerilen standartlar

Çekme Gerilmesi	350 - 550 N/mm ² (EN 10223-3:2013)
Uzama	%8' den az olmamalıdır (EN 10223-3:2013)
Tel Toleransı	EN 10218-2:2012 T1 Sınıfı uyumluluğunda olmalıdır (Tablo 14).
Ağır Galvaniz (Zn) Kaplama	Minimum ağır galvaniz (Zn) kaplama miktarı EN 10223-3:2013 Tablo 13' de verilen A sınıfı kaplama olmalı ve EN 10244-2 Tablo 14'te de verilen tel çapına bağlı A sınıfı kaplama miktarlarına uygun olmalıdır. Ağır galvaniz (Zn) kaplamanın tel ile adezyonunun kontrolü için, tel çapının 4 katına sahip bir çubuk üzerine 6 kez sarılmış çelik telin üzerinde çatlak veya tırnakla kazınabilir bir aşınma olmaması durumu gözlenmelidir.
Ağır galvaniz (Zn) Kaplama Adezyonu	Ağır galvaniz (Zn) kaplama adezyonu EN 10244 standardına uygun yapılmalıdır. Hegzagonal yapılı çelik tel ağ numunesi için dayanım değerleri aşağıdaki gibi olmalıdır.
Nominal Çekme Dayanımı	50 kN/m (EN 15381-Ek D uyarınca yapılan test sonucuna göre)

Tepe, Topuk, Yüzey Çelik Halatları; standartlara uygun, galvanizle kaplanmış (EN 10264-2) min. 8.00 mm – max. 20,00mm çapında 6x19 çelik/kendir özlü (ISO 2408) olmalıdır.



Şekil 68. Çelik Halat

3.7.3. Ankraj (Blon) Özellikleri

Tepe ankrajı, projede görüldüğü üzere $\varnothing=20\text{mm}$ çapında nervürlü ve galvaniz kaplı çelikten kancalı veya baston şeklinde imal edilmiş ankrajlar, şev boyunca her 2 m’de bir imal edilmeli, 100 cm derinliğinde açılmış olan 25 mm çapındaki delik içerisine yerleştirilerek çimento enjeksiyonu ile sabitlenmelidir. Gevşek kesimler dışında sağlam ve sert kesimler tercih edilmelidir.

Yüzey ankrajı, levhalı tip olarak 70 cm boyunda, $\varnothing=16\text{mm}$ çapında, galvanizli ve nervürlü çelikten imal edilmeli, 25 mm çapındaki deliğe kimyasal epoksi ile montajlanmalı, 125x125x10 mm galvaniz kaplı levha ile birleşim ve montaj detayı standartlara uygun olmalıdır.

Topuk ankrajı, levhalı tip olarak 70 cm boyunda, $\varnothing=16\text{mm}$ çapında, galvanizli ve nervürlü çelikten imal edilmeli, 25 mm çapındaki deliğe zeminin durumuna göre çimento enjeksiyonu veya kimyasal epoksi ile montajı yapılmalıdır. 125x125x10 mm galvaniz kaplı levha ile birleşim ve montaj detayı standartlara uygun olarak yapılmalıdır. Şev boyunca her 2 m’de bir imal edilmelidir (Şekil 69).



Şekil 69. Topuk ankrajı

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Rize İli Hemşin İlçesi Çok Programlı Anadolu Lisesi güneydoğu kesiminde meydana gelen kaya düşme vakası incelenmiş, bu kapsamda; (i) kaya süreksizlik ölçümleri ile kaya malzemesi üzerinde yapılan jeomekanik deneyler kullanılarak kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri ortaya konulmuş, (ii) mevcut şevde herhangi bir duraylılık probleminin olup olmayacağı kinematik ve limit denge analizleriyle belirlenmiş, (iii) kaya düşme riski 3 boyutlu analizlerle değerlendirilerek olası bir kaya düşme vakasında, blokların hareket hızları, yüksekliği, enerjisi ve hareket yönleri belirlenmiş, (iv) saha çalışmaları ve yapılan analizler bir bütün halinde değerlendirilerek kaya şevi ıslah çalışmalarına yönelik alternatif uygulama projeleri hazırlanmış ve (v) her alternatif ıslah çalışması dikkate alınarak proje uygulama maliyetleri hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde sıralanmıştır;

1. Çalışma konusu olan ve kaya düşme vakasının yaşandığı kaya kütlesi ilçe merkezinin yaklaşık 1300 metre güneyinde bulunan Hemşin Çok Programlı Anadolu Lisesine ait spor kompleksinin doğu yamacında yer almaktadır.
2. Çalışma alanı ve çevresinde bulunan kayaçlar, litostratigrafik sınıflama ve adlama kuralları (NACS, 1983) esas alınarak tanımlanmış, proje sahasında Eosen yaşlı Kaçkar Granitoidinin yüzeylendiği belirlenmiştir. Kayaçlar açık pembe, açık gri yer yer koyu gri olup genelde granit-granodiyorit, mikro kuvarslı diyorit, mikro granit bileşimlidir.
3. Çalışma kapsamında mevcut kaya kütlelerinde yenilme riskinin devam edip etmediğinin araştırılması amacıyla şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ölçümler sonucunda proje sahasında 100/70 duruşlu şevlerin oluşturulacağı dikkate alınmıştır ve planlanan kaya şevinde yenilme riski olup olmadığı kinematik olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kütle hareketinin meydana geldiği kaya şevinde riskin hala devam ettiğini, özellikle kama tipi kayma riskinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.
4. Çalışmada ortamın özellikleri ve kinematik analiz sonuçları dikkate alınarak 270/72 ve 318/70 duruşlu süreksizliklerin ara kesiti boyunca gelişebilecek kama tipi kayma için limit denge analizleri uygulanmıştır. 2018 TB DY dikkate alındığında, aşırı yağışlara bağlı olarak güvenlik sayısı değerinin düşeceği, çatlaklarda bulunan

suyun çatlak hacminin yarısından fazlasını doldurması durumunda süreksizliklerin ara kesiti boyunca bir yenilmenin (kütle hareketi) gelişeceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle mevcut şevin ivedilikte iyileştirilmesi gerekmektedir.

5. Bu çalışma kapsamında proje konusu kaya yamaç Saroglou vd. 2021 tarafından önerilen “kaya düşme riski” potansiyeline göre sınıflandırılmıştır kaya düşme riski ağırlıklı puanı 65.10 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ise çalışma konusu kaya yamacın “yüksek riskli yamaç (Risk Sınıfı IV)” sınıfına girdiğini göstermektedir.
6. Proje konusu alanda meydana gelen kaya düşme vakasının konumu, topografik koşullar, erişim, şev önü yapı stoğu parametreleri ve yapılan analiz sonuçları dikkate alındığında gerdirilmiş tel kafes uygulamasının en etkin çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kütle hareketinin meydana geldiği şev için yapılan kaya düşme riski sınıflaması ise en etkin yöntemin duraysız kayaların alınması, ağ ve çelik halat uygulamasının tercih edilebileceğini göstermektedir.
7. Spor tesisinin arka kesiminde kalan Bölge-1’de istinat duvarı gibi alternatif projeler düşünülmüştür ancak mevcutta bulunan yapı ve uygulama yapılacak olan alan dikkate alındığında en optimum çözümün ağ ve çelik halat uygulaması olacağı sonucuna varılmıştır. Bölge 2’de ise sadece işlevini yitirmiş ankrajların yenilenmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Ağar, Ü. (1977). *Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Akgun A., Dag S. & Bulut F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54, 1127-1143.
- Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K. & Topal, T. (2021). Assessment of the effectiveness of a rockfall ditch through 3-D probabilistic rockfall simulations and automated image processing, *Engineering Geology*, 283.
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A.Ö., Akın M.K. & Topal, T. (2019). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43, 211-232.
- Alan, İ., Keskin, H., Böke, N., Altun, İ., Balcı, V., Elibol, H., Demirbağ, H., Bakırhan, B., Arman, S., Soyakıl, M., Hanılçı, N., Çelik, Ö.F. & Candan, O. (2019). Menderes Masifi'nin tektono-stratigrafik özellikleri projesi kapsamında elde edilen son bulgular, *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 28, 41-48.
- Alejano, L., Pons, B., Bastante, F., Alonso, E. & Stockhausen, H. (2007). Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, No. 6: 903-921.
- Alemdag S., Akgün A., Kaya A. & Gökçeoğlu C. (2015). A large and rapid planar failure: causes, mechanism, and consequences (Mordut, Gumushane, Turkey). *Arabian Journal Of Geosciences* , 7, 1205-1221.
- Alptekin, A. & Yakar, M. (2020). Kaya Bloklarının 3B Nokta Bulutunun Yersel Lazer Tarayıcı Kullanarak Elde Edilmesi, *Türkiye LİDAR Dergisi – 2020*; 2(1); 01-04.
- Altay, A. (2015). *Kaya Düşmelerine Karşı Kullanılan Toprak Dolgu Setlerin Nümerik İncelenmesi*, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Andrew, R. D., Bartingale, R. & Hume, H. (2011). Context sensitive rock slope design solutions - Chapter 6 - Rockfall protection, *Rock Mechanics – Rock Falls*, 11,002.
- Arslan, M., Tüysüz, N., Korkmaz, S. & Kurt, H. (1997). Geochemistry and petrogenesis of the eastern pontide volcanic rocks, Northeast Turkey, *Chemie der Erde/Geochemistry*, 57, 157-187.
- Arslantürk, F. (2022). *Yedigöl Köyü (İspir/Erzurum) ve Çevresi Kaya Düşme Tehlikesinin 2 ve 3 Boyutlu Modellerle Analizi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

- Artuç, E.F. (2014). *Susuz Köyü (Çubuk- Ankara) ve Yakın Çevresinin Kaya Düşme Potansiyelinin Araştırılması*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Barton, N. & Bandis, S.C. (1982). Effect of block size on the shear behaviour of jointed rock, 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 739-760.
- Barton, N.R. (1988). Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-System. In: Kirkaldie L (ed), Proceedings Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publication 984, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 59–88.
- Baykal, F. (1952). Kelkit-Şiran Bölgesinde Jeolojik Araştırmalar, MTA Raporu No: 2205, Ankara.
- Bektaş, D., Tutuş A. & Eroğlu H. (1999). A study of the suitability of calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) for pulp and paper manufacture. Tr. J. Of Agriculture and Forestry.
- Bektaş, O., Yılmaz, C., Taşlı, K., Akdağ, K. & Özgür, S. (1995). Cretaceous rifting of the eastern Pontide carbonate platform (NE Turkey): The formation of carbonates, breccias and turbidites as evidences of a drowned platform. *Geologia*, 57, 1-2, 233-244.
- Bieniawski, Z.T. (1989). Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg. Balkema, Rotterdam, 107–117.
- Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classification. Wiley, Chichester. p. 251.
- Binal, A. & Ercanoğlu, M. (2010). Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region, *Environmental Earth Sciences*, 61, 1361–1373.
- Boztaş, D., Jonckheere, R.C., Wagner, G.A. & Yeğingil, Z. (2002). Slow Senonian and fast Paleocene-Early Eocene uplift of the granitoids in the Central Eastern Pontides, Turkey: apatite fission-track results, *Tectonophysics*, 382, 213-228.
- Brown, E.H. (1970). Man Shapes The Earth. *Geographical Journal*, 136, 74-85. doi: 10.2307/1795683.
- Bulut, F. (2022). *Uçhisar Kalesi (Nevşehir) Çevresini Etkileyebilecek Kaya Düşmelerinin 2 ve 3-Boyutlu Analizlerle Değerlendirilmesi*. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Buz, R. (2019). *Şahinefendi (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Caymaz. P. (2023). *Karahıdırlı (Mersin) Çevresindeki Kaya Düşmelerinin Üç Boyutlu Analizi ve Koruma Yöntemlerinin Belirlenmesi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Çapar, N. (2018). *Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin DeneySEL ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi*. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Çelik, M. & Nasery, M.M. (2021). Eğimli Arazilerde Kaya Tutucu Toprakarme Duvarların Uygulanabilirliği ve Alternatif Kaya Islahı Çözümleriyle Karşılaştırılması: Kanlıpelit Örneği, *Doğal Afet Çevre Dergisi*, 7(1), 176-191.
- Dağ, S., Akgün, A., Kaya, A. & Alemdağ, S. (2020). Medium scale earthflow susceptibility modelling by remote sensing and geographical information systems based multivariate statistics approach: an example from Northeastern Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 112, 142-149.
- Dearman, W.R., Turk, N., Irfan, T.Y. & Rowshane, H. (1981). Detection of rock material variation by sonic velocity zoning. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 35, 3-8.
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P. & Crosta, G.B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey), *Natural Hazards*, 82 (2), 1075-1098.
- Dorren, L.K.A., Maier B., Putters, U.S. & Seijmonsbergen A.C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps, *Geomorphology*, 57, 151- 167.
- Edelbro, C. (2008). Strength, fallouts and numerical modelling of hard rock masses, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology.
- Ei, N. (2017). *Investigation of Rockfall Around Ankara Citadel*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Ersoy H., Karahan M., Babacan A. E. & Sünnetçi M. O. (2018). A new approach to the effect of sample dimensions and measurement techniques on ultrasonic wave velocity. *Engineering Geology* , 251, 63-70.
- Ersoy H., Kaya A., Angın Z. & Dağ S. (2020). 2D and 3D numerical simulations of a reinforced landslide: A case study in NE Turkey. *Journal Of Earth System Science*, 129, 1.
- Evans, S. (2002). Catastrophic landslides: effects, occurrence, and mechanisms, Boulder, CO, *Geological Society of America* 412-422.
- Eyüboğlu, Y., Bektaş, O. & Pul, D. (2007). MidCretaceous olistostromal ophiolitic melange developed in the back-arc basin of the eastern Pontide magmatic arc (NE Turkey, *International Geology Review*, 49, 12, 1103-1126.
- Fanos, A.M. & Pradhan, B. (2019). A Novel Rockfall Hazard Assessment Using Laser Scanning Data and 3D Modelling in GIS, *Catena*, 172, 135-150.
- Ferrara, V. & Pappalardo, G. (2005). Kinematic analysis of rock falls in an urban area: The case of Castelmola hill near Taormina (Sicily, Italy), *Geomorphology*, 66, 373–383.

- Gentilini, C., Govoni, L., de Miranda, S., Gottardi, G. & Ubertini, F. (2012). Three dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers, *Comput Geotech*, 44, 58–72.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Ferrero, A.M., Migliazza, M. & Giani, G.P. (2008). Numerical study of flow anisotropy within a single natural rock joint, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1, 47–58.
- Goodman, R. E. (1989). Introduction to Rock Mechanics. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 562.
- Gökçe, H.S., Hatungimana, D. & Ramyar, K. (2019). Effect Of Fly Ash And Silica Fume On Hardened Properties Of Foam Concrete, *Construction and Building Materials* 194, 1-11.
- Grassl H., Volkwein A. & Bartelt P. (2002) Experimental and Numerical Modeling of Highly Flexible Rockfall Protection Barriers, Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research SLF.
- Grosic, M., Arbanas, Z. & Udovic, D. (2009). Designing And Constructing Rockfall Barriers – Experiences In Republic of Croatia, ISRM Regional Symposium-EUROCK 29-31 October 2009, Croatia, 113.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. & Agliardi, F. (2002). STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock – falls, *Comp Geoscience*, 28, 1079–1093.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P.A. & Ghigi, S. (2004). Rockfall Hazard and Risk Assessment Along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy, *Environmental Management*, 34 (2), 191-208.
- Güven, İ.H. (1998). 1/100000 Ölçekli Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, No: 58, Trabzon C29 ve D29 Paftaları, MTA Jeoloji Etüdleri Dairesi, Ankara, 12 s.
- Güven, İ.H. (1993). Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250.000 Ölçekli Kompilasyonu, MTA Yayınları, Ankara.
- Hack, R., Price, D. & Rengers, N. (2003). A New Approach to Rock Slope Stability—a Probability Classification (SSPC), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, 167–184.
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1981). Rock Slope Engineering. 3rd edition. London, Institute of Mining and Metallurgy, p. 358.
- Hoek, E. (1995). Strength of rock and rock masses, *International Society of Rock Mechanics News Journal*, 2 (2), 4-16.
- Hoek, E. (1999). Putting Numbers to Geology-an Engineer’s Viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1997) Practical estimates or rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-86.

- Hoek, E. & Kaiser, P.K. (1995). Bawden WF. Support of under-ground excavations in hard rock. pp.215. Rotterdam, Balkema.
- Hoek, E. & Marinos, P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing. Tunnels and Tunneling International, Part 1(a)- November Issue: 45-51, Part 2(b)- December, 34-36.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athen Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57(2),151-160.
- Hoek, E., Wood, D. & Shah, S.A. (1992). Modified HoekBrown criterion for jointed rock masses. Proc. Rock Characterization, Symp. International Society of Rock Mechanic Eurock (Edited by Hudson JA.), London, *British Geotechnical Society*, 209-214.
- IAEG Engineering Geological Map (1976). A Guide to Their Preparation. International Association of Engineering Geology, UNESCO Press. 79 p. Paris.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1976). Engineering geological maps, The UNESCO Press, 15, 78 .
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978). Comission on Standardization of Laboratory and Field Tests: Suggested Methods for The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-68.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics) (2007). In: Ulusay R, Hudson JA (eds) The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, Kazan Offset Pres, 628 p. Ankara.
- Jaeger, J.C. (1965). Application of the theory of heat conduction to geothermal measurements terrestrial heat flow (Geophysical Monograph Series 8) ed H.K. Lee (Washington, DC: American Geophysical Union), 24–50.
- Karahan, M., Ersoy, H. & Akgün, A. (2020). A 3D numerical simulation-based methodology for assessment of landslide-generated impulse waves: a case study of the Tersun Dam reservoir (NE Turkey). *Landslides*, 17, 2777-2794.
- Kaya, A., Alemdağ, S., Dağ, S. & Gürocak, Z. (2016). Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey). *Bulletin Of Engineering Geology And The Environment* , 75, 89-99.
- Keskin, B. (2019). *Zonguldak-Kilimli Yolunda Kaya Düşme Potansiyelinin Araştırılması*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.
- Ketin, İ. (1951). Anadolu'nun Tektonik Birlikleri, MTA Yayını, Ankara, 66, 113-127.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun Tektonik Birlikleri. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 66, 20-37.

- Kıncal, C. & Koca, M.Y. (2009). A Proposed Method for Drawing the Great Circle Representing Dip Angle and Strike Changes, *Environmental and Engineering Geoscience*, 15, 145–165.
- Kırbaşı, F. (2019). *Kızılınler Mahallesi'nin (Tepebaşı, Eskişehir) Çevresindeki Kaya Düşmesi Duraysızlıklarının Araştırılması ve Çözüm Önerileri*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Kliche, C.A. (1999). Rock slope stability, SME, Littleton, CO.
- Koçyiğit, T. (2017). *Göre (Nevşehir) ve Yakın Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Kul Yahsi B., Ersoy H. (2018). Site characterization and evaluation of the stability of the Yesilyurt Landslide (Trabzon, NE Turkey) using back analysis method. *Journal Of Geophysics And Engineering*, 15, 927-937.
- Kulatilake, P.H.S.W., Wang, L., Tang, H. & Liang, Y. (2011). Evaluation of Rock Slope Stability for Yujian River Dam Site by Kinematic and Block Theory Analyses, *Computers and Geotechnics*, 38, 846–860.
- Lan, H., Martin, C.D. & Lim, C.H. (2007). RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling, *Comp Geoscience*, 33, 262–279.
- Marquinez, J., Menéndez Duarte, R., Farias, P. & Jiménez, M. (2003). Predictive GISBased Model of Rockfall Activity in Mountain Cliffs, *Natural Hazards*, 30, 341-360.
- Marshall, P. (1935). Acid rocks of Tanpo-Rotorua volcanic district. *Trans, R. Soc, N.Z.*, 64, 323-375.
- Marzorati, S., Luzi, L. & Amicis, M.D. (2002). Rock falls Induced by Earthquakes: A statistical Approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 565-577.
- Mignelli, C., Lo Russo, S. & Peila, D. (2012). Rockfall risk Management assessment: The ROMA approach”, *Natural hazards*, 62, 1109–1123.
- Mineo, S., Pappalardo, G., Mangiameli, M., Campolo, S. & Mussumeci, G. (2018). Rockfall analysis for preliminary hazard assessment of the cliff of Taormina Saracen Castle (Sicily), *Sustainability*, 10(2), 417.
- NACS (North American Commission on Stratigraphy), (1983). The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 67, 841-875.
- Norrish, N.I. & Wyllie, D.C. (1996). Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 15- Rock slope stability analysis. Transportation Research Board Special Report, 247.
- Okay, A.İ. & Tüysüz, O. (1999). Tethyan Sutures of Northern Turkey. The Mediterranean Basin: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. Geological Society, London, Special Publications, 156, 475-515.

- Okuyay, A. (2023). *Amasya Merkez İlçesinin Kaya Düşmesi Tehlikesi Açısından Değerlendirilmesi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Özata, Ş. & Arun, E.G. (2018). Damage assessment of rock-cut Ortahisar Castle in Cappadocia region, *Journal of science, G U J Sci*, 31(1), 1-11.
- Özsayar, T., Pelin, S. & Gedikoğlu, A. (1981). Doğu Pontidler’de Kretase: *KTÜ Yerbilimleri Dergisi*, 1, 2, 65-114.
- Pappalardo G, & Mineo S. (2015). Rockfall Hazard and Risk Assessment: The Promontory of the Pre-Hellenic Village Castelmola Case, North-Eastern Sicily (Italy). In *Engineering Geology for Society and Territory; Lollino G, Manconi, A, Clague J, et al. Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland*, 2, 1989–1993.
- Ritchie, A.M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. Highway research record, 17.
- Romana, M. (1993). A Geomechanics Classification for Slopes: Slope Mass Rating. (In *Comprehensive Rock Engineering*. Ed. I. Hudson). Pergamon, 3, 575-600.
- San, N.E. (2017). *Ankara Kalesi Çevresinde Kaya Düşmesinin İncelenmesi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Saroglou, H., Marinos, V., Marinos, P. & Tsiambaos, G. (2012). Rockfall Hazard and Risk Assessment: an Example from a High Promontory at the Historical Site of Monemvasia, Greece *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1823–1836.
- Schultze, W. & Hans, H. (1961). Das Geologische Profil des Aksudere bei Giresun, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 57.
- Schweigl J., Ferretti, C. & Nössing L. (2003). Geotechnical characterization and rockfall simulation of a slope: a practical case study from South Tyrol (Italy), *Engineering Geology*, 67, 281-296.
- Sengani, F. & Mulenga, F. (2021). An improved hazard assessment chart for rock falls in near vertical blocky rock environments, *Environmental Earth Sciences*, 80 (18), 647.
- Sönmez, H. & Ulusay, R. (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (6), 743-760.
- Sönmez, H. & Ulusay, R. (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-99.
- Spadari, M., Giacomini, A., Buzzi, O., Fityus, S. & Giani, G.P. (2011). In situ rock fall testing in New South Wales, Australia, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 49, 84–93.

- Şaraldı, M.H. (2015). *Tatların (Nevşehir) Yeraltı Şehrini ve Çevresini Etkileyen Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Şen, C. & Kaygusuz, A. (1998). Doğu Pontid adayayı granitoidlerin karşılaştırılmalı petrografik ve kimyasal özellikleri. KD Türkiye. Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Eğitiminin 20. Yılı Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı, 12-13.
- Şen, C. (2007). Jurassic Volcanism in the Eastern Pontides: Is it Rift Related or Subduction Related, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 523-539.
- Taşpınar, M. (2015). *Ihlara Vadisi (Aksaray) Boyunca Kaya Düşmelerinin Değerlendirilmesi*. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Topal, T., Akin, M.K. & Ozden, U.A. (2007). Assesment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey” *Enviromental Geology*. 53(1), 191-200.
- Topal, T. & Akin, M. (2012). Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey), *Natural Hazards*, 62, 255-274.
- Tuncay, E. (2009). Rock rupture phenomenon and pillar failure in tuffs in the Cappadocia region (Turkey), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46, 1253-1266.
- Tunusluoğlu, M.C. & Zorlu, K. (2009). Rockfall hazard assesment in a cultural and natural heritage (Ortahisar castle, Cappadocia, Turkey), *Environmental Geology*, 56, 963-972.
- Ujihira, M., Ogawa, K., Suzuki, S., Hosoya, S., Saeki, H. & Komazaki, M. (1997). Two dimensional source location system for rock fall detection by using cable sensor and mobile multimedia network, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34, 315.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H. & Tuncay, E. (2001). Causes, Mechanism and Environmental İmpacts of İnstabilities at Himmetoğlu Coal Mine and Possible Remedial Measures. *Environmental Geology*, 40 (6), 769–786.
- Volkwein, A., Labiouse, V. & Schellenberg, K. (2011). Summary on the NHESS Special Issue” Rockfall protection—from hazard identification to mitigation measures”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(10), 2727-2728.
- Yılmaz, I., Yildirim, M. & Keskin, I. (2008). A method for mapping the spatial distribution of RockFall computer program analyses results using ArcGIS software, *Bull Eng Environ*, 67, 547-554.

ÖZGEÇMİŞ

Mehbare Yaren MUHCU, ilk ve orta öğrenimini Trabzon Bener Cordan İlkokulu'nda, lise öğrenimini ise Trabzon Özel Net Anadolu Lisesi'nde tamamlayarak 2016 yılında mezun oldu. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini 2020 yılında başarı ile tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

