

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARAKLI-GÜMÜŞHANE KARAYOLU ÜZERİNDEKİ ŞEVLERİN KAYA DÜŞME
POTANSİYELİNİN 3 BOYUTLU ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve SÜNNETCİ

**MART 2025
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ARAKLI-GÜMÜŞHANE KARAYOLU ÜZERİNDEKİ ŞEVLERİN KAYA DÜŞME
POTANSİYELİNİN 3 BOYUTLU ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI**

Merve SÜNNETCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
" JEOLJİ YÜKSEK MÜHENDİSİ "
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 / 02 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 03 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan ERSOY

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Araklı-Gümüşhane Karayolu Üzerindeki Şevlerin Kaya Düşme Potansiyelinin 3 Boyutlu Analizlerle Araştırılması” başlıklı bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca bilgi birikimi, yardımseverliği ve ilgisiyle bu tez çalışmasının tamamlanmasında bana en büyük desteği veren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Hakan ERSOY’a sonsuz şükranlarımı sunarım. Arazi ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Oğuz SÜNNETCİ’ye teşekkürlerimi borç bilirim. 3 boyutlu kaya düşme analizlerinin yapılmasında çok büyük yardımları olan değerli arkadaşım Öğr. Gör. Dr. Murat KARAHAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca yanımda olan ve bu günlere gelmemde en büyük emekleri olan anneme ve babama sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı, hayattaki en değerli varlığım olan oğlum Kağan’a adıyorum.

Merve SÜNNETCİ

Trabzon, 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Araklı-Gümüşhane Karayolu Üzerindeki Şevlerin Kaya Düşme Potansiyelinin 3 Boyutlu Analizlerle Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan ERSOY’un 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. 17/03/2025

Merve SÜNNETCİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	4
2.1. Saha Çalışmaları.....	4
2.1.1. Çalışma Alanının Jeoteknik Birimlere Ayrılması.....	4
2.1.2. Hat Etüdü Çalışmaları	4
2.1.3. İnsansız Hava Aracı ile Fotogrametrik Verilerin Alınması	5
2.2. Laboratuvar Çalışmaları	5
2.2.1. Karot Örneklerinin Hazırlanması.....	5
2.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Tayini	6
2.2.1. Tek eksenli sıkışma Dayanımı Deneyi	8
2.3. Büro Çalışmaları.....	9
2.3.1. Nokta Bulutu ve 3 Boyutlu Katı Modelin Hazırlanması.....	9
2.3.2. 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinin Yapılması	9
3. BULGULAR.....	10
3.1. Çalışma Alanının Konumu	10
3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi.....	11
3.3. Çalışma Alanının Jeoteknik Birimlere Ayrılması	13
3.3.1. Şev-1'in Jeoteknik Birimlere Ayrılması	13

3.3.1.	Şev -2'nin Jeoteknik Birimlere Ayrılması	14
3.3.2.	Şev -3'ün Jeoteknik Birimlere Ayrılması	16
3.4.	Jeoteknik Birimlerin Süreksizlik Özelliklerinin Belirlenmesi	18
3.4.1.	Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Setleri	18
3.4.1.	Süreksizlik Ara Uzaklığı (Aralığı)	18
3.4.2.	Süreksizlik Açıklığı ve Dolgu	21
3.4.3.	Süreksizliklerin Devamlılığı	21
3.4.4.	Süreksizliklerin Pürüzlülüğü	22
3.4.5.	Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi.....	22
3.5.	Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	23
3.5.1.	Kuru Birim Hacim Ağırlık	23
3.5.2.	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	23
3.6.	Yamaç Kaya Düşme Riski Sınıflama Sistemi	24
3.6.1.	Şev-1 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması.....	24
3.6.2.	Şev-2 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması.....	28
3.6.3.	Şev-3 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması.....	32
3.7.	Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi	36
3.7.1.	Şev-1 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi.....	37
3.7.2.	Şev-2 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi.....	39
3.7.3.	Şev-3 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi.....	42
3.8.	Şev Stabilite Analizleri.....	45
3.8.1.	Kinematik Analizler	45
3.8.2.	3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri	54
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	69
5.	KAYNAKLAR	71
	ÖZGEÇMİŞ.....	75

ÖZET

ARAKLI-GÜMÜŞHANE KARAYOLU ÜZERİNDEKİ ŞEVLERİN KAYA DÜŞME POTANSİYELİNİN 3 BOYUTLU ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI

Merve SÜNNETCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2025, 75 Sayfa

Bu çalışmada Trabzon ili Araklı ilçesi Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan 3 farklı kaya şevinin kaya düşme potansiyeli değerlendirilmiş ve RocPro3D yazılımı kullanılarak 3 boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışılan şevlerde yüzeylenme veren kaya kütlelerine ait süreksizlik ve dayanım özellikleri saha çalışmaları ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş, İHA ile yapılan fotogrametrik ölçümlerle şevlerin 3 boyutlu katı modelleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılmış ve farklı boyut ve şekillerdeki blokların şev üzerinde izleyeceği yollar ve düşme enerjileri hesaplanmıştır. Şev-1’de 100 ve 1000 kg’lık blokların düşmesi neticesinde sırasıyla 150 kJ ve 300 kJ’lük enerjilerin ortaya çıkacağı ve blokların çoğunun karayolunu kat edeceği belirlenmiştir. Şev-2 için yapılan analizler sonucunda 100 ve 1000 kg’lık blokların düşmesi durumunda blok enerjilerinin sırasıyla 50 kJ ve 560 kJ’e ulaşacağı, blokların çoğunluğunun karayolunu aşacağı tespit edilmiştir. Şev-3 için yapılan 3 boyutlu kaya düşmesi analizleri neticesinde ise yine 100 ve 1000 kg’lık blokların düşmesi durumunda blok enerjilerinin sırasıyla 45 kJ ve 450 kJ olacağı ve düşen blokların çoğunluğunun karayolunu tamamen kat edeceği belirlenmiştir. Elde edilen veriler çalışılan karayolu şevlerinde olası bir kaya düşmesi olayında düşecek blokların karayolunu aşacağını göstermektedir. İlgili şevlerde yüzey temizliği yapılması ve çelik ağ/ yüksek kapasiteli halka ağ gibi yöntemlerinin uygulanarak şevlerin güvenli hale getirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: 3 boyutlu analiz, Kaya düşmesi, Afet, Karayolu şevi, Süreksizlik

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF ROCKFALL POTENTIAL OF THE SLOPES ON ARAKLI-GÜMÜŞHANE HIGHWAY WITH 3D ANALYSES

Merve SÜNNETCİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geological Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Hakan ERSOY
2025, 75 Pages

In this study, the rockfall potential of 3 different rock slopes located along the Trabzon-Gümüşhane highway in the Araklı district of Trabzon province was evaluated, and 3-dimensional rockfall analyses were conducted using RocPro3D software. The discontinuity and strength properties of the rock masses exposed on the studied slopes were determined through field studies and laboratory tests, while photogrammetric measurements conducted with a UAV were used to generate 3-dimensional solid models of the slopes. The data was utilized in the three-dimensional rockfall analyses to determine the trajectories and impact energies of blocks of varying sizes and shapes. For Slope-1, it was determined that the fall of 100 kg and 1000 kg blocks would result in impact energies of approximately 150 kJ and 300 kJ, respectively, with most blocks crossing the highway. Analyses for Slope-2 indicated that the impact energies of 100 kg and 1000 kg blocks would reach 50 kJ and 560 kJ, respectively, and that most blocks would exceed the highway. The 3-dimensional rockfall analyses for Slope-3 revealed that the impact energies of 100 kg and 1000 kg blocks would be 45 kJ and 450 kJ, respectively, with most falling blocks completely crossing the highway. The data indicates that in the event of a rockfall, the detached blocks are likely to reach and surpass the highway in the studied slopes. Therefore, it is recommended that surface cleaning be carried out in the relevant slopes and that measures such as steel mesh or high-capacity ring nets be implemented to ensure slope safety.

Key Words: 3D analysis, Rockfall, Disaster, Highway slope, Discontinuity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Afetlerin sınıflandırılması	1
Şekil 2. Afet yönetiminin bileşenleri ve döngüsel yapısı	2
Şekil 3. Tez çalışması kapsamında alınan karot örnekleri	5
Şekil 4. Karot örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi	7
Şekil 5. Karot örneklerinin boyutlarının dijital kumpas ile ölçülmesi	7
Şekil 6. Karot örneklerinin kuru kütlelerinin belirlenmesi.....	8
Şekil 7. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılışı.....	9
Şekil 8. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.	10
Şekil 9. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası.....	12
Şekil 10. Şev-1'in genel görünümü	14
Şekil 11. JB-1'in arazideki görünümü	15
Şekil 12. JB-1 ve JB-2'nin arazideki görünümü	15
Şekil 13. Şev-2 ve JB-3'ün genel görünümü.....	16
Şekil 14. Çok kırıklı ayrıışmış volkaniklerin (JB-4) genel görünümü	17
Şekil 15. Bloklı yamaç molozunun (JB-5) genel görünümü	17
Şekil 16. Şev-1'de yüzeylenen JB-1 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda).....	19
Şekil 17. Şev-2'de yüzeylenen JB-3 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda).....	20
Şekil 18. Şev-3'te yüzeylenen JB-4 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda).....	20
Şekil 19. Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiğı ve kaya kütleline ait GSI değeri	38
Şekil 20. Kaya kütleline ait Hoek-Brown parametreleri	39
Şekil 21. Kaya kütleline ait GSI değeri.....	41
Şekil 22. Kaya kütleline ait Hoek-Brown parametreleri	42
Şekil 23. Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiğı ve kaya kütleline ait GSI değeri	44
Şekil 24. Kaya kütleline ait Hoek-Brown parametreleri	45

Şekil 25. 280/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	46
Şekil 26. 280/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	47
Şekil 27. 280/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları.....	47
Şekil 28. 110/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	48
Şekil 29. 110/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	48
Şekil 30. 110/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları.....	49
Şekil 31. 25/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	50
Şekil 32. 25/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	51
Şekil 33. 25/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları.....	51
Şekil 34. 55/80 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	52
Şekil 35. 55/80 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları	53
Şekil 36. 55/80 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları.....	53
Şekil 37. RocPro3D yazılımında Şev-1 için oluşturulan nokta bulutu (üstte) ve TIN (altta)	55
Şekil 38. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (sol üst), eğim derecesi (sağ üst), eğim yönü (sol alt) ve yükseklik (sağ alt) modelleri	56
Şekil 39. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri.....	57
Şekil 40. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi ...	58
Şekil 41. Şev-1’de farklı jeoteknik birimler için 1 tonluk kaya düşmesi sonrası oluşacak enerjiler (JB-1 için maksimum 300 kJ, JB-2 için maksimum 150 kJ).....	58
Şekil 42. RocPro3D yazılımında oluşturulan nokta bulutu (üst şekil) ve düzensiz üçgen ağı (alt şekil)	59

Şekil 43. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (üstte), eğim derecesi (altta) modelleri.....	60
Şekil 44. RocPro3D yazılımında oluşturulan eğim yönü (üst) ve yükseklik (alt) modelleri	61
Şekil 45. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri.....	62
Şekil 46. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi ...	63
Şekil 47. Karayolu şevi üzerinden 5 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri	63
Şekil 48. RocPro3D yazılımında oluşturulan nokta bulutu (üst şekil) ve düzensiz üçgen ağı (alt şekil)	64
Şekil 49. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (üstte), eğim derecesi (altta) modelleri.....	65
Şekil 50. RocPro3D yazılımında oluşturulan eğim yönü (sol alt) ve yükseklik (sağ alt) modelleri	66
Şekil 51. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri.....	67
Şekil 52. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi ...	68
Şekil 53. Karayolu şevi üzerinden 5 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri	68

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Tez çalışması kapsamında incelenen karayolu şevlerine ait koordinatlar	10
Tablo 2. Jeoteknik birimlere ait süreksizliklerin ara uzaklık değerleri.....	21
Tablo 3. Çalışma alanındaki süreksizlik takımları için belirlenen açıklık değerleri (ISRM 2007)	21
Tablo 4. Çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik devamlılığı değerleri (ISRM 2007)	21
Tablo 5. Jeoteknik birimlere ait JRC değerleri	22
Tablo 6. Süreksizliklerin bozunma derecesi ile ilgili sınıflama.....	22
Tablo 7. Örneklerin kuru birim hacim ağırlık değerleri	23
Tablo 8. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımları	23
Tablo 9. Şev-1 için kaya düşme riski sınıflandırması (Saroglou vd. 2012).....	25
Tablo 10. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve Şev-1'in bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu	28
Tablo 11. Kaya yamacın kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012)..	29
Tablo 12. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu.....	32
Tablo 13. Kaya yamacın kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012)..	33
Tablo 14. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu.....	36
Tablo 15. Granitlerden oluşan kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması .	37
Tablo 16. Çalışılan kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri.....	39
Tablo 17. Granitlerden oluşan kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması .	40
Tablo 18. Çalışılan kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri.....	42
Tablo 19. Volkaniklerden oluşan kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması	43
Tablo 20. Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak hesaplanan ve proje konusu kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri.....	45
Tablo 21. 280/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütleleri için uygulanan kinematik analiz sonuçları	49

Tablo 22. 110/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları	49
Tablo 23. 280/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları	52
Tablo 24. 55/80 duruşlu kaya şevinde volkanik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları	54



SEMBOLLER DİZİNİ

°C	: Santigrat derece
A	: Alan
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
c	: Kohezyon
cm	: Santimetre
D	: Çap
D	: Kaya kütlesi örselenme faktörü
DPTB	: Doğu Pontid Tektonik Birliği
EM-DAT	: Acil Durum Veri Tabanı
g	: Yer çekimi ivmesi
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
IAEG	: Uluslararası Mühendislik Jeolojisi ve Çevre Derneği
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
İHA	: İnsansız hava aracı
JB	: Jeoteknik Birim
JCond ₈₉	: RMR ₈₉ 'un süreksizlik özellikleri bölümü
JRC	: Süreksizlik pürüzlülüğü katsayısı
Jv	: Hacimsel eklem sayısı
K	: Sürtünme katsayısı
kJ	: Kilojoule
km	: Kilometre
KN	: Kilonewton
L	: Boy/uzunluk
m	: Metre
m_i, m_b, s, a	: Hoek-Brown sabitleri
m_k	: Kuru kütle
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
P	: Yük
Q	: Q kaya kütle sınıflama sistemi

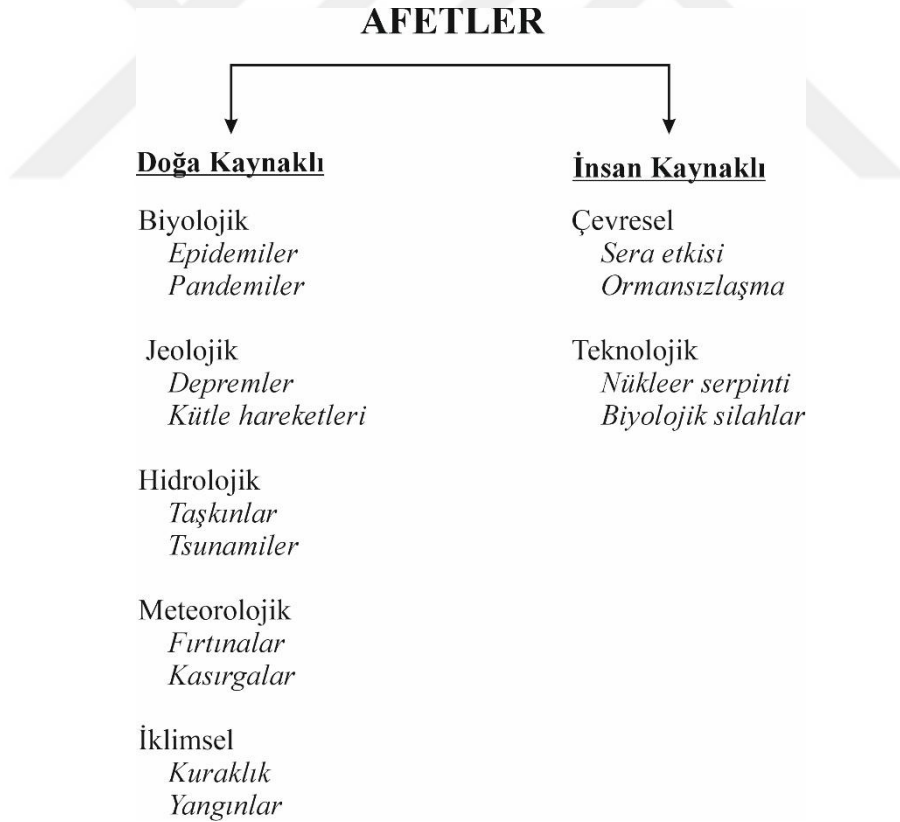
RMR	: Rock Mass Rating
R_n	: Normal geri verme katsayısı
RQD	: Kaya Kalite Göstergesi
R_t	: Teğetsel geri verme katsayısı
RTK	: Gerçek zamanlı kinematik
TIN	: Düzensiz üçgen ağı
UCS, σ_c	: Tek eksenli sıkışma dayanımı
UNDRR GAR	: BM Afet Risk Azaltma Küresel Değerlendirme Raporu
V_T	: Toplam hacim
ϕ	: İçsel sürtünme açısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Afetler; topluma ekonomik, sosyal ve fiziksel zararlar veren, günlük yaşamın rutin işleyişini durduran veya sekteye uğratan, toplumun baş etme kapasitesini aşan olaylar olarak tanımlanmaktadır. Bu olaylar doğa kaynaklı olabileceği gibi insan ve teknoloji kaynaklı da olabilmektedir (Şekil 1). Özellikle doğa kaynaklı afetler hem etkilediği insan sayısı hem de neden olduğu ekonomik kayıp bakımından en önde gelmektedir. Acil Durum Veri Tabanı (EM-DAT) verilerine göre 2023 yılında doğa kaynaklı afetler nedeniyle dünya genelinde 86.473 kişi hayatını kaybetmiş, bununla birlikte 202,7 milyar USD’lik ekonomik kayıp oluşmuştur (EM-DAT, 2024).

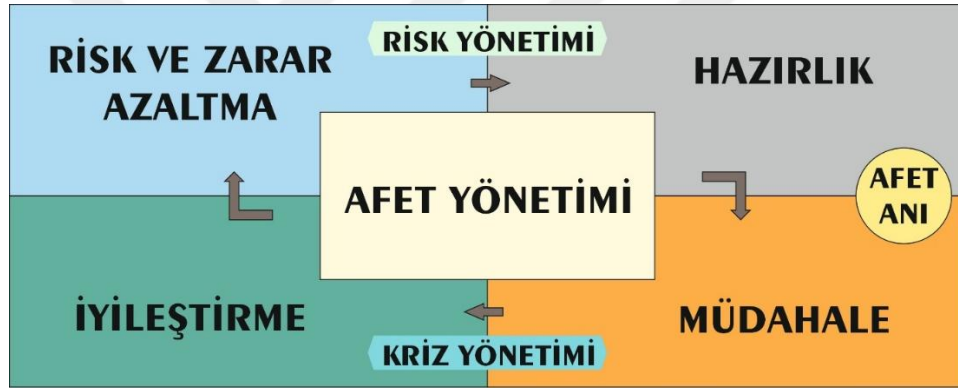


Şekil 1. Afetlerin sınıflandırılması

Afetler insan hayatını tehdit etmenin yanı sıra ülkelerin altyapı ve gelişme süreçlerini de yakından ilgilendirmektedir. Ülkeler gayrisafi yurt içi hasıllarının (GSYH) önemli bir

bölümünü afet yönetimi süreçlerine harcamakta; bu sebeple sanayi, enerji ve stratejik altyapı gibi kritik kalemlerden feragat etmektedir. Özellikle az gelişmiş ülkelerde afetlerin meydana getirdiği zararların GSYH'ye oranı gelişmiş ülkelere göre 10 kat kadar fazla olabilmektedir (UNDRR GAR, 2022). Bu nedenle afet yönetimi ülkelerin gelişme stratejilerinin bir parçası haline gelmeli ve afet yönetimi ile stratejik planlar uyum içerisinde, bütüncül bir yaklaşımla yürütülmelidir.

Afet yönetimi, afet öncesi ve sonrası tüm çalışma ve çabaları kapsayan döngüsel bir süreçtir (Şekil 2). Bununla birlikte afet öncesi çalışma ve çabaların tümünü içeren sürece risk yönetimi, afet anı ve sonrasındaki tüm çalışma ve çabaları içeren sürece ise kriz yönetimi denilmektedir. Dünyada ve ülkemizde 1950'li yıllardan itibaren kriz yönetimini önceleyen bir afet yönetimi anlayışı benimsenmişken, özellikle 2000'li yıllardan itibaren risk yönetimi süreçlerini önceleyen bir afet yönetimi anlayışı kabul görmeye başlamıştır.



Şekil 2. Afet yönetiminin bileşenleri ve döngüsel yapısı

Ülkemiz doğa kaynaklı afetler konusunda riskli bir konuma sahiptir. AFAD tarafından yayınlanan 2023 Yılı Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri Raporu'na göre 2023 yılında ülkemizde 5233 adet doğa kaynaklı olay meydana gelmiştir (AFAD, 2024). Bu olaylarda 50 binden fazla vatandaşımız hayatını kaybederken, yaklaşık 34 milyar dolarlık maddi hasar oluşmuştur (EM-DAT, 2024). Bununla birlikte bu tez çalışmasının gerçekleştirildiği Trabzon ili, özellikle kütle hareketi bakımından oldukça riskli bir bölgedir. AFAD tarafından 2018 yılında yayınlanan "Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri" (AFAD, 2018) raporuna göre Trabzon, 1950-2018 yılları arasında meydana gelen 1517 adet heyelan ve kaya düşmesi olayı ile kütle hareketi olay sayısı bakımından 1. sıradadır. Bu açıdan Trabzon genelinde heyelan ve kaya düşmesi çalışmalarının artarak devam etmesi ve güncel

teknolojik gelişmeler takip edilerek Trabzon'un "Afete Dirençli Kent" olması yolunda gerekli veri altyapısının oluşturulması çok büyük önem arz etmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bilindiği gibi Trabzon, ülkemizin en uzun kırsal yol ağına sahip şehridir (URL-1). Bölgenin engebeli yapısından dolayı bu yolların büyük bir bölümü doğal yamaçların çeşitli yöntemlerle kazılmasıyla açılmaktadır. Açılan karayolu şevlerinin eğiminin doğal yamaca kıyasla daha fazla olması ve şevlerin uzun yıllar atmosferik şartlara maruz kalması uzun vadede farklı kütle hareketlerinin meydana gelmesine sebebiyet verebilmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında Trabzon ili Araklı ilçesi sınırları içerisinde, Araklı-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan 3 farklı karayolu şevinin kaya düşme potansiyeli 3 boyutlu kaya düşme analizleri ile incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında incelenen karayolu şevlerinde yüzeyleme veren jeolojik birimler ayrışma durumları ve süreksizlik özellikleri dikkate alınarak farklı jeoteknik birimlere ayrılmıştır. Kaya düşme potansiyeline sahip olan birimler üzerinde hat etüdü çalışmaları yapılarak bu birimlerin süreksizlik takımı sayısı, hâkim süreksizlik yönelimleri, ara uzaklık, devamlılık, açıklık, vb. özellikleri ve şev duruşları belirlenmiştir. Söz konusu jeoteknik birimlerden alınan blok örneklerden karot örnekleri hazırlanmış ve bu örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karayolu şevinin 3 boyutlu katı modeli, gerçekleştirilen İHA uçuşlarından alınan fotogrametrik veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın son aşamasında 3 boyutlu kaya düşmesi analizleri gerçekleştirilerek muhtemel bir kaya düşmesi olayında blokların izleyeceği yollar, nihai varış noktaları ve hareket enerjileri her bir karayolu şevi için belirlenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Saha Çalışmaları

2.1.1. Çalışma Alanının Jeoteknik Birimlere Ayrılması

Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri ve bunlarda gerçekleşen kütle hareketleri, litolojik özelliklerden ziyade süreksizlikler ve ayrışma durumu ile kontrol edilmektedir. Jeoteknik birimler litolojik birimlerden bağımsızdır ve tek bir litolojik birim farklı jeoteknik birimlere ayrılabilceği gibi farklı litolojiye sahip birimler tek bir jeoteknik birim altında toplanabilir. Bu bağlamda tez çalışması kapsamında çalışma alanında yüzeylenme veren jeolojik birimler, saha gözlemleriyle belirlenen ayrışma durumları ve süreksizlik özellikleri dikkate alınarak jeoteknik birimlere ayrılmıştır.

2.1.2. Hat Etüdü Çalışmaları

Çalışma alanındaki kaya kütlelerinin hâkim süreksizlik takımlarını belirlemek ve kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini ortaya koymak amacıyla hat etüdü çalışmaları yapılmıştır.

Hat etüdü, kaya kütlelerinin doğal mostralarda, tünel-galeri açıklıklarında veya yol yarması gibi kazı sonucu ortaya çıktığı lokasyonlarda, belirlenen çizgisel hatlar üzerindeki süreksizliklere ait devamlılık, açıklık, ayrışma, uzaysal duruş vb. gibi birçok özelliğin hat boyunca kantitatif olarak belirlenmesi ve kaydedilmesi esasına dayanır. Hat etüdü çalışmalarının sağlıklı sonuçlar verebilmesi için çalışma alanında tanımlanan her bir jeoteknik birimde, mümkünse çalışma alanının tamamını temsil edecek şekilde, etütler gerçekleştirilmeli ve her bir birim için 300 ila 500 adet süreksizlik incelenmelidir.

Çalışma kapsamında belirlenen jeoteknik birimler için farklı lokasyonlarda hat etüdü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hat etüdü çalışmaları, 3 boyutlu kaya düşme analizlerinin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi amacıyla çalışma konusu karayolu şevlerinde ve yakın çevredeki diğer mostralarda yapılmıştır. Etütlerde Rock Mass Rating (RMR) ve Q gibi kaya kütle sınıflama sistemlerinde kullanılan girdi parametrelerine ait veriler ile 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde birer girdi parametresi olan blok boyutu ve şekli gibi parametreler kaydedilmiştir.

2.1.3. İnsansız Hava Aracı ile Fotogrametrik Verilerin Alınması

İncelenen karayolu şevlerinin 3 boyutlu katı modellerinin oluşturulması amacıyla insansız hava aracı (İHA) ile yapılan uçuşlarla fotogrametrik veriler alınmıştır. Uçuşlarda DJI Matrice 300 RTK İHA üzerine entegre edilen DJI Zenmuse P1 fotogrametrik kamera kullanılmıştır. Uçuşlar 7 m/sn hızla ve yerden 50 metre yükseklikten, yüzey topoğrafyasını takip etme (terrain follow) özelliği kullanılarak yapılmıştır. Görüntülerin bindirme oranları düşeyde %80, yatayda %70 olacak şekilde ayarlanmıştır.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

2.2.1. Karot Örneklerinin Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen saha çalışmaları sırasında JB-1, JB-3 ve JB-4 jeoteknik birimlerinden blok örnekler temin edilmiştir. Daha sonra blok örneklerden NX çaplı (54.7 mm) elmas uçlu karotiyere sahip laboratuvar tip elektrikli karot alma makinesi ile ISRM (2007)'nin önerdiği şekilde uzunluk/çap (L/D) oranı 2,5-3 arasında olan karot örnekleri alınmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Tez çalışması kapsamında alınan karot örnekleri

Alınan karot örneklerinin alt ve üst yüzeyleri tungsten-karbit törpüleme bıçağına sahip yarı otomatik karot düzeltme makinesi kullanılarak 1000'de 2 oranında paralel hale getirilmiştir (Şekil 4). Hazırlanan karot örneklerinin çap ve uzunluk ölçüleri 0.1 mm

hassasiyetindeki dijital kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 5). Uzunluk ölçümlerinde 3 farklı eksen boyunca ölçülen uzunlukların ortalaması alınırken, örneklerin çapları üst, orta ve alt kısımlarından yapılan 3 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Son olarak, boyutları belirlenen örnekler 105°C'deki etüvde 24 saat kurutulduktan sonra 0.01g çözünürlükteki hassas terazi ile tartularak örneklerin kuru kütleleri belirlenmiştir (Şekil 6).

2.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık Tayini

Kayaç örneklerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri, hazırlanan karot numunelerinin hacim ve kuru kütle değerlerinin Eşitlik 1'de kullanılmasıyla hesaplanmıştır.

$$\gamma_k = (m_k \times g) / V_T \quad (1)$$

Burada;

γ_k : Örneğin kuru birim hacim ağırlığı (KN/m³),

m_k : Örneğin kuru kütlesi (kg),

g : Yer çekimi ivmesi (9,81 m/sn²),

V_T : Örneğin toplam hacmidir (m³).



Şekil 4. Karot örneklerinin alt ve üst yüzeylerinin düzeltilmesi



Şekil 5. Karot örneklerinin boyutlarının dijital kumpas ile ölçülmesi



Şekil 6. Karot örneklerinin kuru kütlelerinin belirlenmesi

2.2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri servo motorlu tam otomatik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Deneylerde yükleme hızı 0.2 KN/saniye olarak uygulanmış ve örneklerin 5-10 dakika içerisinde kırılması sağlanmıştır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri her bir jeoteknik birim için 5'er adet örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında örneğe uygulanan düşey yük sürekli olarak arttırılmış ve örneğin kırıldığı andaki maksimum yük not edilmiştir. Daha sonra Eşitlik 2 kullanılarak örneğe ait tek eksenli sıkışma dayanımı değeri belirlenmiştir.

$$\sigma_c = P/A \quad (2)$$

Burada;

σ_c : Örneğin tek eksenli sıkışma dayanımı (KN/m²),

P : Örneğin kırıldığı anda uygulanan maksimum yük (KN),

A : Karot örneğinin dairesel yüzeyinin alanıdır (m²).



Şekil 7. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneylerinin yapılışı

2.3. Büro Çalışmaları

2.3.1. Nokta Bulutu ve 3 Boyutlu Katı Modelin Hazırlanması

İHA uçuşlarından elde edilen fotogrametrik veriler DJI Terra® yazılımına aktarılarak çalışılan şevlerin nokta bulutu verileri hazırlanmıştır. Bu nokta bulutu verileri kullanılarak çalışma alanlarının 3 boyutlu sayısal yükseklik modelleri oluşturulmuştur. Son aşamada ise 3 boyutlu sayısal yükseklik modelleri kullanılarak her bir şevin 3 boyutlu katı modeli oluşturulmuştur.

2.3.2. 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinin Yapılması

Çalışmanın son aşamasında saha çalışmaları, laboratuvar deneyleri ve 3 boyutlu katı model kullanılarak çalışma kapsamında incelenen kaya şevlerinde 3 boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde RocPro3D® yazılımı kullanılmıştır. Analizlerle ilgili detaylar Bölüm 3.8.2’de detaylı olarak verilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Çalışma Alanının Konumu

Çalışma alanı Trabzon ili Araklı ilçesinin yaklaşık 35 km güneyinde, Araklı-Gümüşhane karayolu üzerinde; G43-c2, G43-c3 ve G44-d4 paftaları içerisinde yer almaktadır. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında karayolunun 25 kilometrelik bir kesiminde bulunan 3 farklı kaya şev i incelenmiş, bu şevler güneyden kuzeye doğru Şev-1, Şev-2 ve Şev-3 olarak adlandırılmıştır. Şevlere ait koordinat bilgileri Tablo 1’de, çalışma alanının yer bulduru haritası ise Şekil 8’de verilmiştir.

Tablo 1. Tez çalışması kapsamında incelenen karayolu şevlerine ait koordinatlar

Şev Numarası	Enlem	Boylam
Şev-1	40.568006°	40.027193°
Şev-2	40.584833°	40.005544°
Şev-3	40.637406°	39.918052°



Şekil 8. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

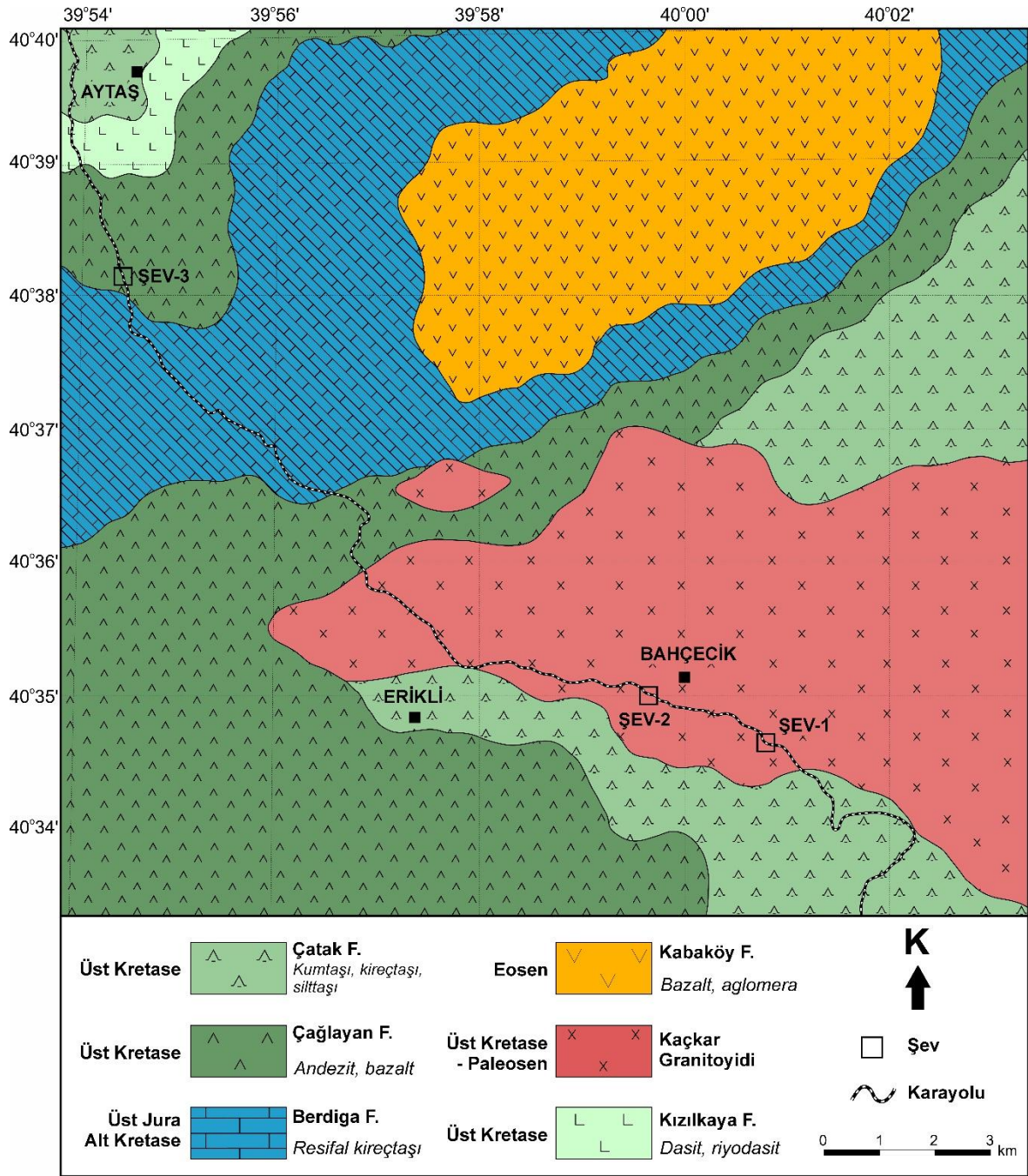
Çalışma alanını içine alan Doğu Pontid Tektonik Birliği (DPTB), Alp-Himalaya Orojenik Kuşağı'nın ülkemizdeki uzantısı olan magmatik bir yay olarak tanımlanmaktadır (Eyüboğlu, 2011). DPTB doğuda Gürcistan sınırı, batıda Orta Pontidler, güneyde ise Anatolid-Torid Bloku ile sınırlandırılmaktadır (Okay, 2008). DPTB, kendi içerisinde gösterdiği litolojik, tektonik ve fasiyes farklılıklarından dolayı Kuzey, Güney ve Eksen Zonu olarak 3 bölüme ayrılmıştır (Bektaş vd, 1999; Eyüboğlu vd., 2007). Kuzey Zon'da Üst Kretase ve Tersiyer yaşlı volkanizma faaliyetlerine bağlı volkanitler ve granit sokulumları ile karakteristiktir, Güney Zon'da Paleozoik yaşlı metamorfik ve magmatik temel üzerine gelen Liyas, Kretase ve Eosen yaşlı tortul ve volkanotortul kayalar yer almaktadır. Daha güneyde bulunan Eksen Zonunda ise Üst Kretase yaşlı şoşonitler ile manto peridotitleri ve Orta Kretase yaşlı olistostromal ofiyolitik melanj bulunmaktadır (Eyüboğlu, 2011). Bu tez kapsamında çalışılan bölge DPTB'nin Kuzey Zonunda yer almaktadır.

Çalışma alanında yaşlıdan gence doğru Berdiga Formasyonu, Çatak Formasyonu, Çağlayan Formasyonu, Kaçkar Granitoidi ve Kabaköy Formasyonu yüzeylenmektedir (Şekil 9).

Çalışma alanındaki en yaşlı birim olan Berdiga Formasyonu, ilk olarak Pelin (1977) tarafından Giresun'un Alucra ilçesindeki Berdiga Dağları'nda tanımlanmıştır. Birim platform karbonatları ve dolomitlerden oluşmakla birlikte DPTB'nin güney kesimlerde derin deniz ortamını karakterize eden fasiyesler içermektedir (Özyurt, 2019). Birim alt seviyelerde dolomit ve dolomitleşmiş kireçtaşı, orta ve üst seviyelerde ise alg ve foraminifer içeren kireçtaşlarından ibarettir (Taslı, 1984). Birimin yaşı içerdiği fosil faunasına bağlı olarak Geç Jura-Erken Kretase olarak belirlenmiştir.

Bazalt-andezit ve bunların piroklastitleri ile ardalanmalı kumtaşı, kilitaşı, silttaşı ve marn tabakalarından oluşan birim, Güven (1993) tarafından Trabzon'un Maçka ilçesi Çatak yöresine atfen Çatak Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Kara (1998) aynı birimi Sukenarı, Yukarıköy ve Çeşmeler üyeleri altında incelerken, Türk (2009) bu birimi volkanik ve volkanotortul kayaların hâkim olduğu Sukenarı Üyesi ile tortul kayaların hâkim olduğu Çeşmeler Üyesi altında incelemiştir. Türk (2009), yüksek lisans tez çalışması kapsamında Çatak Formasyonunun volkanik kayaların değil tortul kayaların egemen olduğu bir birim olduğunu ortaya koymuş ve fosil faunasını incelemiştir. Birimin yaşı Uğuz vd. (2011)

tarafından fosil içeriğine bağlı olarak Turoniyen (Geç Kretase) olarak belirlenmiştir. Birim çalışma alanının en güney kesimlerinde yüzeylenmektedir.



Şekil 9. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası (Güven, 1993'ten değiştirilerek)

Doğu Karadeniz'de geniş yüzeylenmeler veren ve grimsi yeşil renkli andezit-bazalt, piroklastik kayalar ve kırmızı-bordo renkli kiltası, gri marn ve kireçtaşı ara tabakalarından oluşan birim, ilk olarak Güven (1993) tarafından Çağlayan Formasyonu olarak

tanımlanmıştır. Birimin yaşı alt ve üst sınırlar ile fosil içeriği dikkate alınarak Kampaniyen (Geç Kretase) olarak belirlenmiştir. Birim çalışma alanının kuzey-batı kesiminde yüzeylenmeler vermektedir.

Doğu Karadeniz’de özellikle Kaçkar Dağları ve civarında geniş yüzeylenmeler veren sokulum kayaçları Güven (1993) tarafından Kaçkar Granitoyidi olarak adlandırılmıştır. Eosen yaşlı birimleri kesen bu birim Geç Kretase-Paleosen boyunca yerleşim sürecini tamamlamış ve Eosen döneminde tekrar sokulum yapmıştır (Ersoy, 2007). Birim çalışma alanının kuzey-kuzey doğu kesimlerinde geniş yüzeylenmeler vermektedir.

Çalışma alanının en genç birimlerini oluşturan ve piroklastik kayaçlar ile yastık debili bazalt ve aglomeralar ile temsil edilen birim Güven (1993) tarafından Kabaköy Formasyonu olarak tanımlanmıştır. İçerisinde yer yer kireçtaşı ve marn merceklerine rastlanılan birim Kaçkar Granitoyidi tarafından kesilmektedir (Arslan ve Aslan, 2006). Birimin yaşı Ar-Ar yaşlandırması ile 42-45 milyon yıl (Orta Eosen) olarak belirlenmiştir (Yücel, 2013). Birim çalışma alanının güney-güney batı kesimlerinde yüzeylenme vermektedir.

3.3. Çalışma Alanının Jeoteknik Birimlere Ayrılması

3.3.1. Şev-1’in Jeoteknik Birimlere Ayrılması

Şev-1’in bulunduğu lokasyonda Kaçkar Granitoyidi’ne ait granitik kayaçlar bulunmaktadır (Şekil 10). Birim kendi içerisinde çok kırıklı ayrılmış granit (JB-1) ve ileri derecede ayrılmış granit (JB-2) olarak 2 jeoteknik birime ayrılmıştır.

Çok Kırıklı Ayrılmış Granitler (JB-1)

Şev-1’in batı kesiminde yüzeylenmekte olup K-G doğrultulu karayolu şevinin tamamında gözlenmiştir. Genel olarak ayrılmış çok kırıklı granitik kaya kütlelerinden oluşan birim orta-ileri derece ayrılmıştır (Şekil 11). Karayolu şevinin üst kotlarında eğimin düştüğü ve yatay konuma geldiği alanda kubbe şeklinde yüzeylenme vermiştir. Bu kesim alt kotlara göre daha kırıklı ve çatlaklı bir yapıya sahiptir.

İleri Derecede Ayrışmış Granitler (JB-2)

Şev-1'in doğu kesiminde yüzeylenmekte olup doğuya eğimli karayolu şevinin tamamında gözlenmiştir. Genel olarak ayrılmış çok kırıklı granitik kaya kütlelerinin ayrışması ve arenalaşması sonucunda oluşmuş birim yüzeyde zemin özelliği kazanmıştır (Şekil 12). Kalınlığı birkaç metre ile sınırlı birimin altında çok kırıklı ayrılmış granitik kaya kütlelerinden oluşan JB-1 bulunmaktadır.



Şekil 10. Şev-1'in genel görünümü

3.3.1. Şev -2'nin Jeoteknik Birimlere Ayrılması

Şev-2'nin bulunduğu bölgede Kaçkar Granitoyidi'ne ait granitler yüzeylenmektedir (Şekil 13). Şekil 13'ten de görülebileceği üzere söz konusu kayaçlar ayrışma, süreksizlik durumları vb. özellikler açısından şev boyunca homojen bir yapı sunmaktadır. Bu nedenle şev “kırıklı ayrılmış granit (JB-3)” adı altında tek bir jeoteknik birime ayrılarak incelenmiştir.



Şekil 11. JB-1'in arazideki görünümü



Şekil 12. JB-1 ve JB-2'nin arazideki görünümü



Şekil 13. Şev-2 ve JB-3'ün genel görünümü

3.3.2. Şev -3'ün Jeoteknik Birimlere Ayrılması

Şev-3'ün bulunduğu alanda Kabaköy Formasyonuna ait volkanik kayalar ile yamaç molozu yüzeylenmektedir. Volkanik kayalar kırıklı-çatlaklı bir yapıya sahip olup şev boyunca homojen bir yapı göstermektedir. Bu nedenle şev çok kırıklı ayrılmış volkanitler (JB-4) ve yamaç molozu (JB-5) olmak üzere 2 farklı jeoteknik birime ayrılmıştır.

Çok Kırıklı Ayrılmış Volkanikler (JB-4)

Proje sahasının güneydoğu kesiminde dar bir alanda yüzeylenmektedir. Genel olarak ayrılmış çok kırıklı bazalt ve andezitlerden oluşan birim az-orta derece ayrılmıştır (Şekil 14).

Bloklu Yamaç Molozu (JB-5)

Proje sahasının tamamına yakın kesiminde gözlenmiştir. Şevin kuzey batısında şev tepesinden tabana kadar, güneydoğu kesiminde ise volkanikler üzerinde yüzeylenmektedir. Birim içinde birkaç ton kütleyle sahip askıda birçok blok bulunmaktadır (Şekil 15).



Şekil 14. Çok kırıklı ayrıışmış volkaniklerin (JB-4) genel görünümü



Şekil 15. Bloklı yamaç molozunun (JB-5) genel görünümü

3.4. Jeoteknik Birimlerin Süreksizlik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1. Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Setleri

Bir süreksizliğin duruşu, yatay düzlem ile ölçülen maksimum eğim açısı ve bu eğimin gerçek kuzey doğrultusuyla saat yönünde yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır. Mühendislik yapıları açısından süreksizliklerin duruşu, stabilite koşullarını ve meydana gelebilecek aşırı deformasyon süreçlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Benzer yönelimlere sahip süreksizliklerin oluşturduğu kümeler, süreksizlik seti veya süreksizlik takımı olarak adlandırılmaktadır.

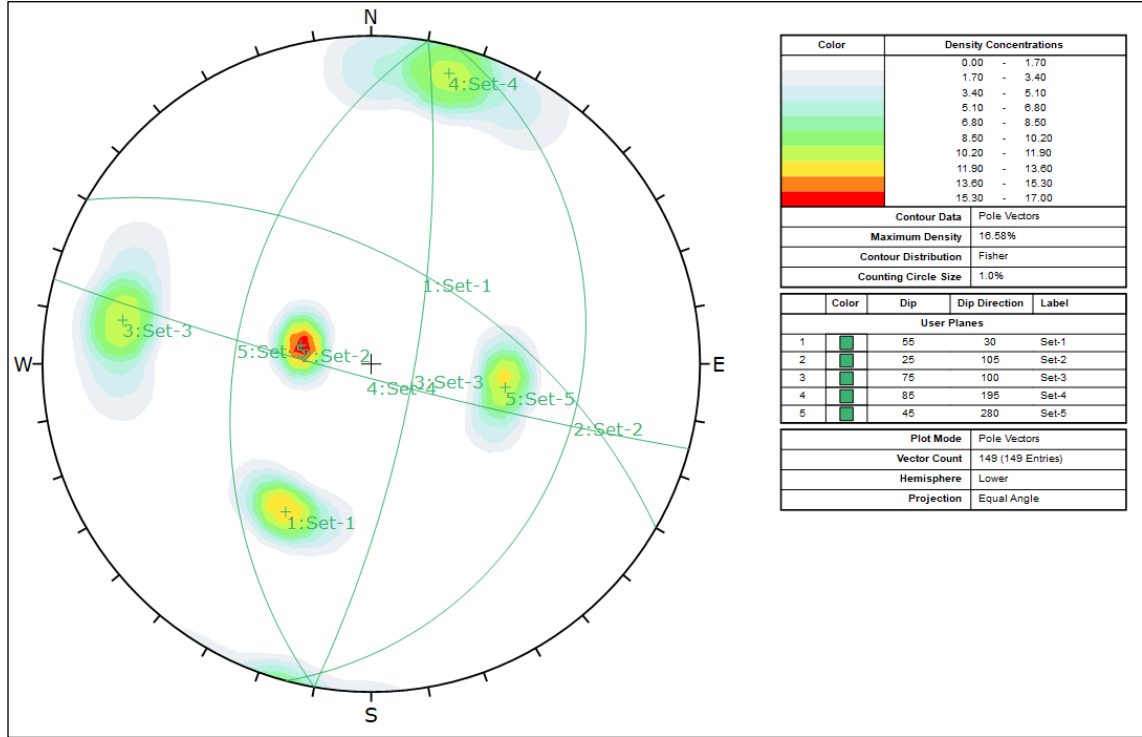
Mühendislik uygulamalarında süreksizlik takımlarının sayısının ve bu takımların baskın yönelimlerinin belirlenmesi amacıyla, ekvatorial eş-alan stereoneti üzerinde kutup noktalarının dağılımı incelenerek kontur diyagramları oluşturulmaktadır. Bu diyagramlar, benzer karakteristiklere sahip süreksizliklerin mekânsal dağılımını ve kutup noktalarının yoğunlaştığı bölgeleri analiz etmeye olanak tanımakta; böylece süreksizlik takımı sayılarının ve egemen yönelimlerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Kontur diyagramlarına dayalı analizlerde, süreksizlik takımlarının egemen yönelimleri, kutupların en yoğun şekilde kümелendiği konturların merkez noktaları esas alınarak belirlenmektedir. Bununla birlikte, en sık gözlenen yönelimlerden belirli sapmalar gösteren ikincil yönelimlerin de analiz sürecinde dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, araştırma sahasındaki şev yüzeylerinde yer alan kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen pusula ölçümleri aracılığıyla temel süreksizlik takımları ve bu takımların yönelimleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler, Dips v5.0 yazılımı kullanılarak kontur diyagramları ile görselleştirilmiş ve değerlendirilmiştir (Şekil 16-18).

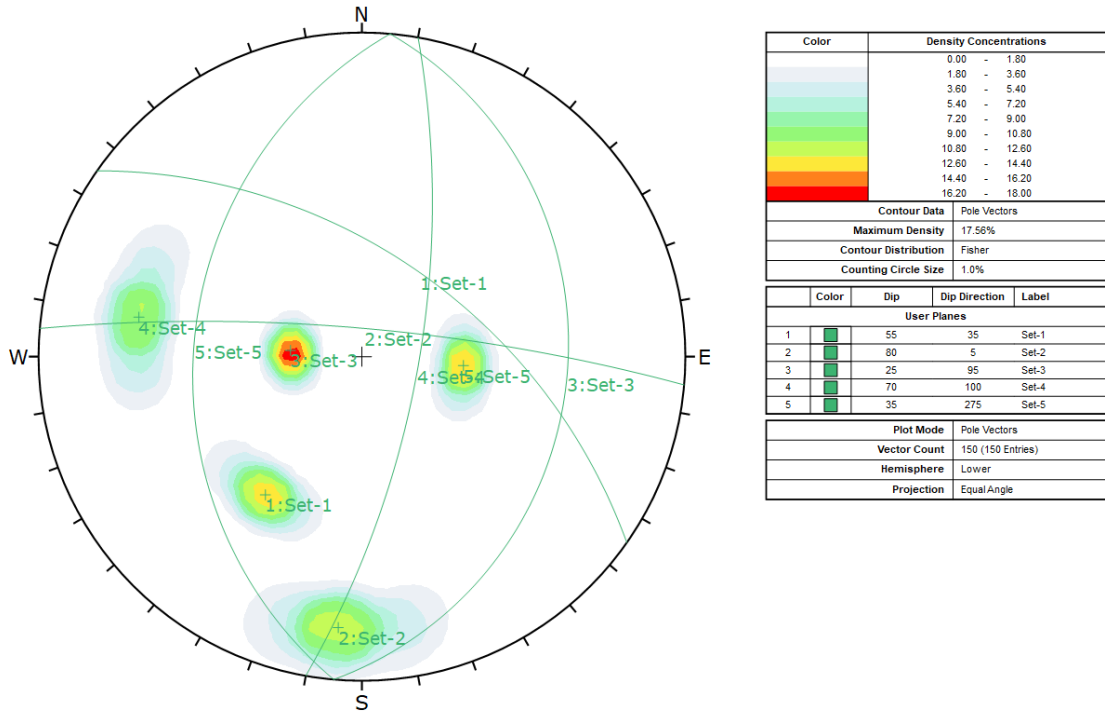
3.4.1. Süreksizlik Ara Uzaklığı (Aralığı)

Süreksizlik ara uzaklığı, belirli bir süreksizlik takımına ait süreksizlikler arasındaki dik mesafe olarak tanımlanmaktadır (ISRM, 2007). Bu mesafe, süreksizlik doğrultusuna dik yönde uzanan bir şerit metre boyunca gözlenen süreksizliklerin sayılması yoluyla belirlenmektedir. Ölçüm hattı ya da sondaj ekseni boyunca iki süreksizlik arasında ölçülen

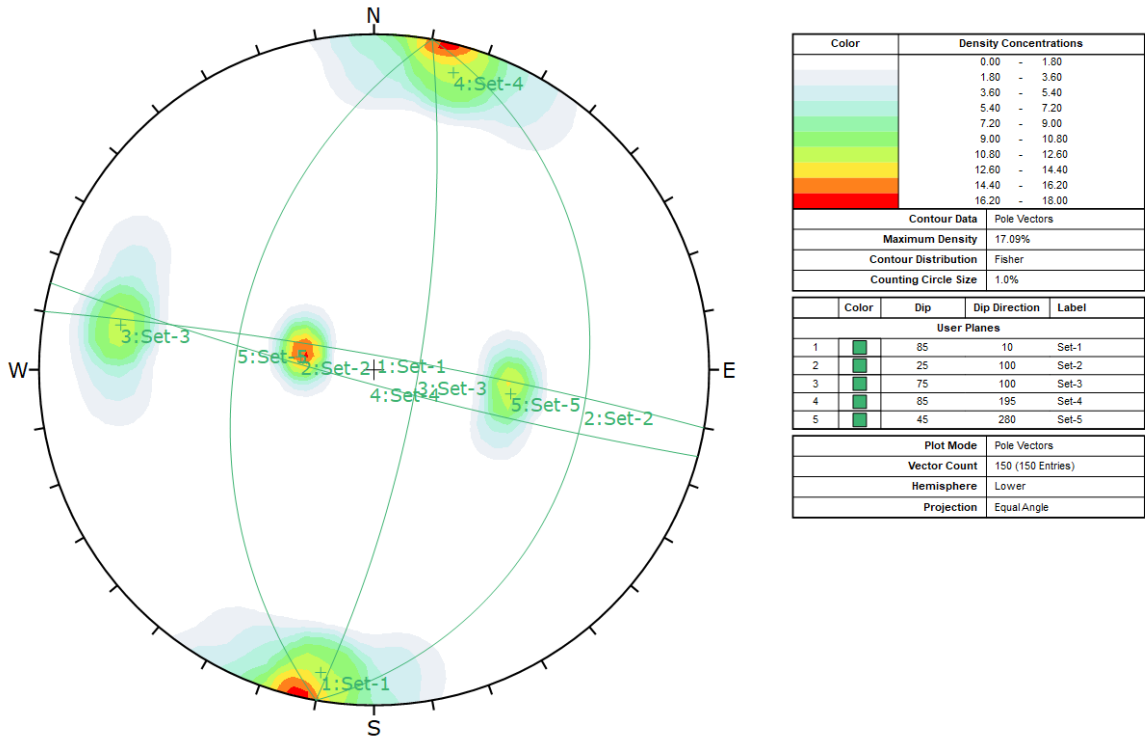
mesafe ise “görünür ara uzaklık” olarak adlandırılmaktadır. Çalışma kapsamında süreksizlik ara uzaklığı değerleri ve ISRM (2007) tarafından önerilen kriterlere göre belirlenmiştir (Tablo 2).



Şekil 16. Şev-1’de yüzeylenen JB-1 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda)



Şekil 17. Şev-2’de yüzeylenen JB-3 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda)



Şekil 18. Şev-3’te yüzeylenen JB-4 birimine ait kontur diyagramı (solda) ve hâkim süreksizlik setleri (sağda)

Tablo 2. Jeoteknik birimlere ait süreksizliklerin ara uzaklık değerleri

Aralık (mm)	Tanımlama	JB-1	JB-3	JB-4
< 20	Çok dar ara uzaklıklı			
20-60	Dar ara uzaklıklı			
60-200	Yakın ara uzaklıklı			
200-600	Orta derecede ara uzaklıklı	300-500	200-400	200-400
600-2000	Geniş ara uzaklıklı			
2000-6000	Çok geniş ara uzaklıklı			
> 6000	İleri derecede geniş ara uzaklıklı			

3.4.2. Süreksizlik Açıklığı

Açıklık, süreksizliğin yüzeyleri arasındaki gerçek mesafedir (ISRM, 2007). Çalışma kapsamında dijital kumpas ile ölçülen açıklık değerleri ve süreksizliklere ait dolgu durumu Tablo 3'te verilmiştir.

3.4.3. Süreksizliklerin Devamlılığı

Çalışma kapsamında incelenen karayolu şevlerindeki süreksizliklerin devamlılık değerleri ISRM (2007) yönergeleri esas alınarak ölçülmüştür (Tablo 4).

Tablo 3. Çalışma alanındaki süreksizlik takımları için belirlenen açıklık değerleri (ISRM 2007)

Açıklık (mm)	Tanımlama	JB-1	JB-3	JB-4
< 0.1	Çok sıkı			
0.1-0.25	Sıkı			
0.25-0.5	Kısmen açık			
0.5-2.5	Açık	1-3		
2.5-10	Orta derecede geniş		3-7	4-7
> 10	Geniş			
10-100	Çok geniş			
100-1000	Aşırı geniş			
> 1000	Boşluklu			

Tablo 4. Çalışma alanında belirlenen süreksizlik takımları için süreksizlik devamlılığı değerleri (ISRM 2007)

Açıklık (m)	Tanımlama	JB-1	JB-3	JB-4
< 1	Çok düşük devamlılık			
1-3	Düşük derecede			
3-10	Orta derecede devamlılık			
10-20	Yüksek devamlılık			10-20
> 20	Çok yüksek devamlılık	>20	>20	

3.4.4. Süreksizliklerin Pürüzlülüğü

Standart profillere dayalı olarak belirlenen pürüzlülük katsayısı (JRC) değerleri, 0 ile 20 arasında değişmektedir. Barton ve Bandis (1982, 1990) farklı ölçüm uzunluklarında JRC değerlerini belirlemek amacıyla süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük genliği ve ölçüm uzunluğu arasındaki ilişkiden yararlanmışlardır.

Bu çalışmada, pürüzlülük tarağı kullanılarak elde edilen profiller üzerinden hesaplanan JRC değerleri belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Jeoteknik birimlere ait JRC değerleri

Jeoteknik Birim	JRC
JB-1	8-10
JB-3	6-8
JB-4	6-8

3.4.5. Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi

Süreksizlik yüzeylerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, öncelikle kaya kütlelerinin ayrışma derecesinin belirlenmesi şarttır. Bu çalışmada, ISRM (2007) tarafından önerilen ve arazi çalışmalarında kullanılabilen bozunma sınıflama ölçütleri esas alınarak, incelenen jeoteknik birimlerin ayrışma dereceleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Süreksizliklerin bozunma derecesi ile ilgili sınıflama

Tanım	Tanımlama Ölçütü	Jeoteknik Birim
Bozunmamış (taze)	W1: Kayacın bozunduğuna ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla birlikte, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözükmemektedir.	
Az bozunmuş	W2: Kayaç malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiştir. Kayaç taze halinden zayıf olabilir.	JB-4
Orta derecede bozunmuş	W3: Kayacın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Taze veya rengi değişmiş kaya sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	JB-1, JB-3, JB-4
Tamamen bozunmuş	W4: Kayacın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	

3.5. Örneklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Kaya malzemesinin dayanım ve fiziksel özellikleri, Rock Mass Rating (RMR) gibi kaya kütle sınıflama sistemlerinde, Hoek-Brown yenilme kriteri gibi kaya kütlelerinin yenilme koşullarının belirlenmesine yarayan kriterlerde ve kaya düşme riski sınıflamalarında birer girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda bu tez çalışması kapsamında jeoteknik birimlerden alınan örneklerin kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiş örnekler üzerinde tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Karot örneklerine ait kuru birim hacim ağırlık (γ_k) değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Örneklerin kuru birim hacim ağırlık değerleri

Örnek No	γ_k (KN/m ³)		
	JB-1	JB-3	JB-4
1	25.3	25.7	24.6
2	26.1	24.9	25.3
3	25.6	25.3	25.4
4	24.8	25.7	24.9
5	26.3	26.1	25.5
Ort.	25.6	25.5	25.1

3.5.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Karot örneklerinin tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Örneklerin IAEĞ (1979) sınıflamasına göre “sağlam”, ISRM (2007) sınıflamasına göre ise “yüksek dayanımlı” sınıflarında oldukları belirlenmiştir.

Tablo 8. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri

Örnek No	σ_c (MPa)		
	JB-1	JB-3	JB-4
1	93	95	106
2	82	80	94
3	77	88	90
4	87	91	86
5	80	85	87
Ort.	84	88	93

3.6. Yamaç Kaya Düşme Riski Sınıflama Sistemi

Kaya şevlerinin duraylılığının incelenmesi, açık ocak madenleri, karayolları ve doğal yamaçlar gibi çeşitli mühendislik projelerinin tasarımında büyük önem taşımaktadır. Uygun ve doğru yöntemlerle gerçekleştirilen şev tasarımları, yalnızca şev duraylılığını artırmakla kalmaz, aynı zamanda kazaların önlenmesine katkı sağlayarak güvenli bir çalışma ortamı sunar. Kaya şevlerindeki kaymalar genellikle kütle içindeki süreksizliklere dayanmaktadır.

Bu bağlamda çalışma kapsamında incelenen şevler “kaya düşme riski” potansiyeline göre sınıflandırılmıştır.

3.6.1. Şev-1 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması

Şev-1 için kaya düşme riski ağırlıklı puanı Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen yöntemle göre 57,25 olarak belirlenmiştir (Tablo 9). Bu değer ise çalışma konusu kaya şevinin “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğu anlamına gelmektedir (Tablo 10).

Tablo 9. Şev-1 için kaya düşme riski sınıflandırması (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	2.4
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	4

6. Süreksizlik pürüzlülüğü/ dolgu malzemesi/ Süreksizlik açıklığı	B/%6	Pürüzlü, kademeli	Kaygan, kademeli	Dalgalı ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın açılı parçalar içeren dolgu malzemesi	Az pürüzlü düzlemsel ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın >5mm sert kil dolgulu	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
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	0.3
10. Kaya malzemesinin dayanımı (MPa, düşüğe düşen kayaların parçalanmasını sağlar, yüksekse sıçramayı artırır)	B/%1	<10	10-30	30-60		>60 MPa	
Puan		10	30	60		100	1.0
11. Kaya kütesinin blok verme oranı / Blok hacmi (m³)	B/%4	<1	1-2.5	2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0	
Puan		10	15	30	60	100	0.6
12. Yaklaşık blok sayısı (incelenen şevin genişliği için)	B/%2	Hiç	1-5	5-10		>10	
Puan		10	30	60		100	2

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 sık, yılın her dönemi	
Puan		10	15	30	60	100	1.8
15. Geçirgenlik/ Şev drenaj durumu	C/%3	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük	
Puan		10	15	30	60	100	3.0
16. Sismik tehlike (ivme katsayısı α)	C/%4	$\alpha < 0.16$	$0.16 < \alpha < 0.24$	$0.24 < \alpha < 0.36$		$\alpha > 0.36$	
Puan		10	30	60		100	1.2
17. Tutma alanının genişliği (m)	D/%10	>20	10-20	5-10		2-5	Yok
Puan		10	15	30		60	100
18. Kaya düşmesi geçmişi	D/%5	Hiç-Az	Ara sıra	Çok sayıda		Sıklıkla	Sürekli
Puan		10	15	30		60	100
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
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

Tablo 10. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve Şev-1'in bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu

Risk Sınıfı	Toplam skor	Risk	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.

3.6.2. Şev-2 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması

Şev-2 için kaya düşme riski ağırlıklı puanı Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen yöntemle göre 55,45 olarak belirlenmiştir (Tablo 11). Bu sonuç, çalışılan karayolu şevinin “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğu anlamına gelmektedir (Tablo 12).

Tablo 11. 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 (o)	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	2.4
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	0.9
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	4

6. Süreksizlik pürüzlülüğü/ dolgu malzemesi/ Süreksizlik açıklığı	B/%6	Pürüzlü, kademeli	Kaygan, kademeli	Dalgalı ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın açılı parçalar içeren dolgu malzemesi	Az pürüzlü düzlemsel ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın >5mm sert kil dolgulu	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
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, düşükse düşen kayaların parçalanmasını sağlar, yüksekse sıçramayı artırır)	B/%1	<10	10-30		30-60	>60 MPa	
Puan		10	30		60	100	1.0
11. Kaya kütlelerinin blok verme oranı / Blok hacmi (m3)	B/%4	<1	1-2.5		2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0
Puan		10	15		30	60	100
12. Yaklaşık blok sayısı (incelenen şevin genişliği için)	B/%2	Hiç	1-5		5-10	>10	
Puan		10	30		60	100	2

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 sık, yılın her dönemi		
Puan		10	15	30	60	100		1.8
15. Geçirgenlik/Şev drenaj durumu	C/%3	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük		
Puan		10	15	30	60	100		1,8
16. Sismik tehlike (ivme katsayısı α)	C/%4	$\alpha < 0.16$	$0.16 < \alpha < 0.24$	$0.24 < \alpha < 0.36$		$\alpha > 0.36$		
Puan		10	30	60		100		1.2
17. Tutma alanının genişliği (m)	D/%10	>20	10-20	5-10		2-5	Yok	
Puan		10	15	30		60	100	0.1
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	1.5
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	12

55,45

Tablo 12. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu

Risk Sınıfı	Toplam skor	Risk	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.

3.6.3. Şev-3 İçin Kaya Düşme Riski Sınıflaması

Şev-3 için kaya düşme riski ağırlıklı puanı Saroglou vd. (2012) tarafından önerilen yöntemle göre 54,85 olarak belirlenmiştir (Tablo 13). Bu sonuç, çalışılan karayolu şevinin “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğu anlamına gelmektedir (Tablo 14).

Tablo 13. 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	2.4
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	4

6. Süreksizlik pürüzlülüğü/ dolgu malzemesi/ Süreksizlik açıklığı	B/%6	Pürüzlü, kademeli	Kaygan, kademeli	Dalgalı ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın açılı parçalar içeren dolgu malzemesi	Az pürüzlü düzlemsel ya da pürüzlülüğe bakılmaksızın >5mm sert kil dolgulu	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
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	0.3
10. Kaya malzemesinin dayanımı (MPa, düşükse düşen kayaların parçalanmasını sağlar, yüksekse sıçramayı artırır)	B/%1	<10	10-30		30-60	>60 MPa	
Puan		10	30		60	100	1.0
11. Kaya kütesinin blok verme oranı / Blok hacmi (m³)	B/%4	<1	1-2.5		2.5-4.0	4.0-8.0	>8.0
Puan		10	15		30	60	100
12. Yaklaşık blok sayısı (incelenen şevin genişliği için)	B/%2	Hiç	1-5		5-10	>10	
Puan		10	30		60	100	2

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 sık, yılın her dönemi		
Puan		10	15	30	60	100		1.8
15. Geçirgenlik/ Şev drenaj durumu	C/%3	Çok yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Çok düşük		
Puan		10	15	30	60	100		3.0
16. Sismik tehlike (ivme katsayısı α)	C/%4	$\alpha < 0.16$	$0.16 < \alpha < 0.24$	$0.24 < \alpha < 0.36$		$\alpha > 0.36$		
Puan		10	30	60		100		1.2
17. Tutma alanının genişliği (m)	D/%10	>20	10-20	5-10		2-5	Yok	
Puan		10	15	30		60	100	0.1
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	1.5
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	12

54.85

Tablo 14. Yamaçların kaya düşme riskine göre sınıflandırılması (Saroglou vd. 2012) ve proje konusu kaya yamacın bu sınıflama sistemi içerisindeki durumu

Risk Sınıfı	Toplam skor	Risk	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, yenileştirilmiş ve/veya güçlü aktif ve pasif tedbirlerin birleşimi. Geriye kalan risk kabullenilmelidir.

3.7. Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi

Kayaçlar küçük ölçeklerde değerlendirildiğinde, kayaç malzemesinin önemi iken, ölçeğin büyümesiyle birlikte sağlam kayaç malzemesinden eklemlili kayaç kütlelerine geçiş söz konusu olmaktadır.

Çok fazla süreksizlik içeren kaya kütlelerinin davranışı, kaya malzemesi ve süreksizlikler tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle Hoek ve Brown (1980a, b) kaya kütlelerinin dayanımını saptamak amacıyla Bieniawski (1989) tarafından geliştirilen Kaya Kütle Puanlama Sistemi (RMR) ile kaya malzemesine ait parametreleri birleştirmişlerdir.

Önerilen kriter kısa sürede kaya mekaniği çalışmalarında kabul görmüş ve zamanla kritere yeni elemanlar eklenmiştir (Hoek vd., 2002). Kriterdeki bu değişikliklerin yanı sıra, yenilme kriterinin arazideki jeolojik gözlemlerle ilişkilendirilmesinde, özellikle çok zayıf kayalarla ilgili olarak, Bieniawski'nin önerdiği Kaya Kütle Puanlama Sistemi (RMR) yönteminin artık yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu eksiklik, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kavramının geliştirilmesine yol açmıştır (Hoek vd., 1992; Hoek, 1994; Hoek vd., 1995). Bu indeks, daha sonra gerçekleştirilen bir dizi çalışmada (Hoek vd., 1998; Sönmez ve Ulusay, 1999, 2002; Hoek, 2000 ve 2001) zayıf kaya kütlelerine uygulanmak üzere uyarlanmıştır.

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

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (3)$$

Burada m_b ;

$$m_b = m_i \exp \left[\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right] \quad (4)$$

Kaya kütlesi sabitleri olan s ve a aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$s = \exp \left[\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right] \quad (5)$$

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

Burada örselenme katsayısı olan D terimi, kaya kütlesinin delme veya patlatma gibi işlemlerle örselenmesi durumuna göre 0 ile 1 arasında değişmektedir.

3.7.1. Şev-1 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi

Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiğinde yer alan girdi parametrelerinden biri olan süreksizlik durumu (JCond89) puanı, Bieniawski (1989) tarafından önerilen tablodan faydalanılarak ve yukarıda belirtilen standartlar göz önünde bulundurularak, JB-1 birimi için hesaplanmıştır (Tablo 15).

Tablo 15. Granitlerden oluşan kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması

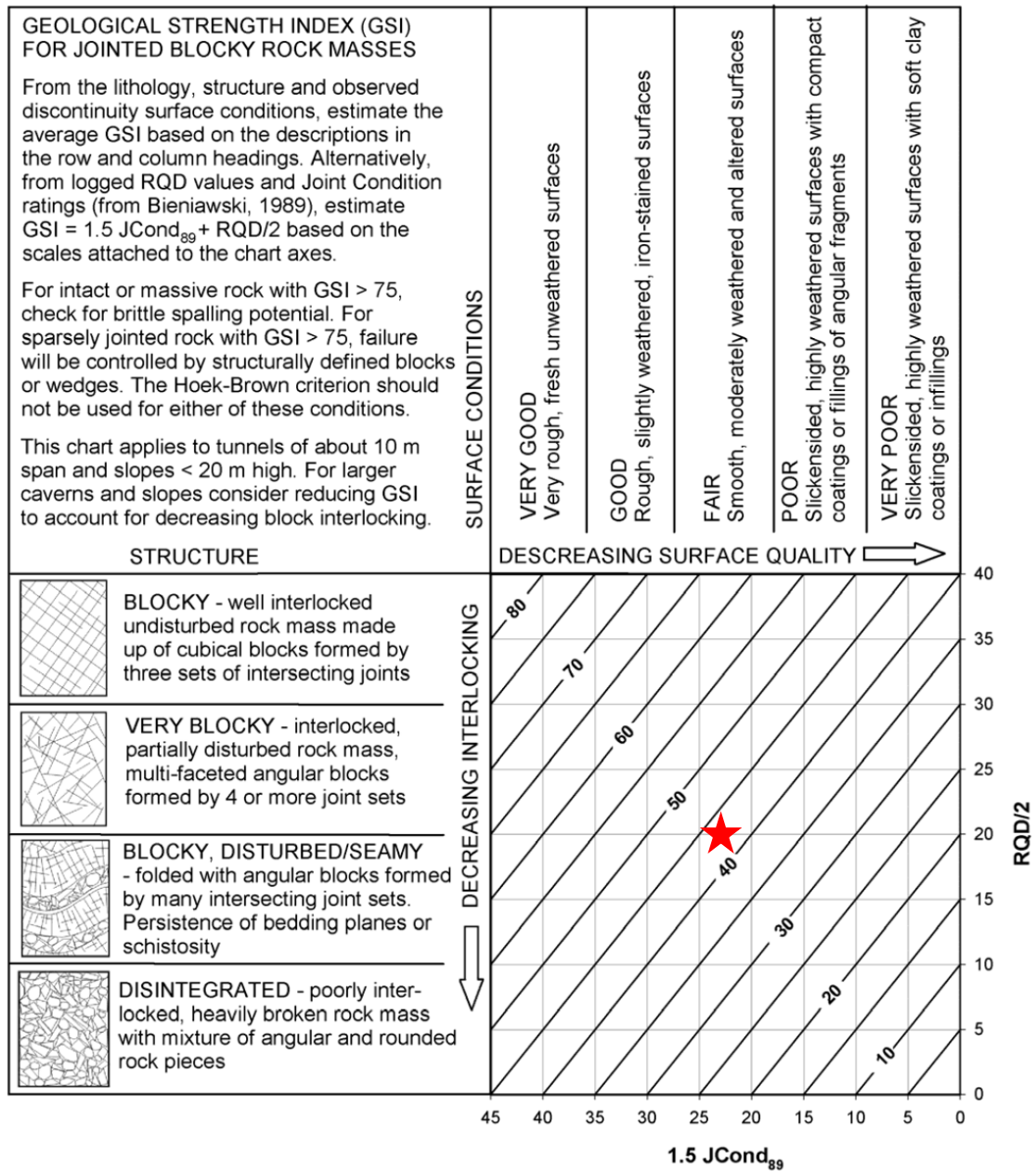
Devamlılık (m)	< 1	1-3	3-10	10-20	> 20
Puan	6	4	2	1	0
Açıklık (mm)	Yok	< 0.1	0.1-1	1-5	> 5
Puan	6	5	4	1	0
Pürüzlülük	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Az pürüzlü	Düz	Kaygan
Puan	6	5	3	1	0
Dolgu	Yok	< 5 mm (sert)	> 5 mm (sert)	< 5 mm (yumuşak)	> 5 mm (yumuşak)
Puan	6	4	2	2	0
Bozunma	Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş
Puan	6	5	3	1	0
PUAN					15

RMR₈₉ değeri Tablo 15 kullanılarak 15 olarak hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan RQD değerleri Palmström (2005) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$RQD (\%) = 110 - 2.5 J_V \quad (7)$$

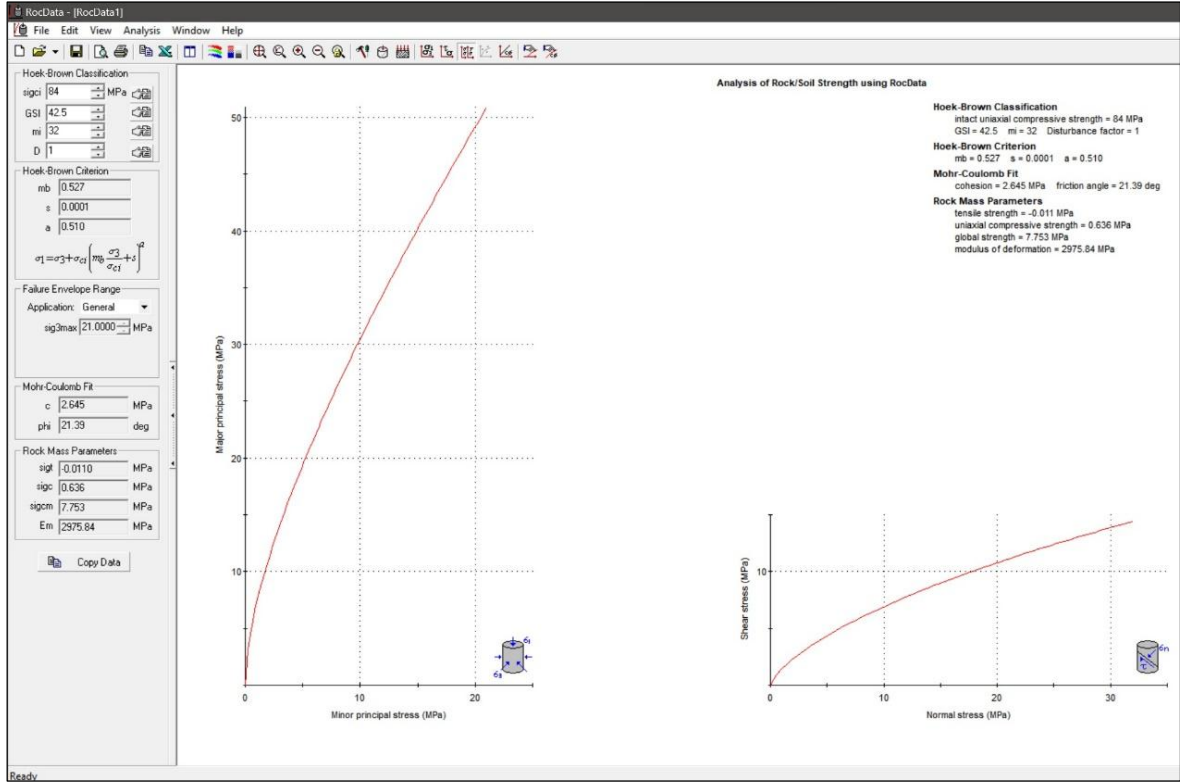
Burada J_V : hacimsel süreksizlik sayısıdır (adet/m³).

Kaya kütleline ait GSI değeri Hoek vd. (2013) tarafından önerilen abak kullanılarak 42,5 olarak hesaplanmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiği ve kaya kütleline ait GSI değerleri

Son olarak kaya kütlesinin mühendislik özellikleri Hoek-Brown yenilme kriterine göre belirlenmiştir (Şekil 20). Tablo 16'da jeoteknik birimlerin mühendislik özellikleri verilmiştir.



Şekil 20. Kaya kütlesine ait Hoek-Brown parametreleri

Tablo 16. Çalışılan kaya kütlesinin mühendislik özellikleri

Girdi parametreleri						
GSI	m_i	D	UCS (kaya malzeme)	RMR ₈₉	Litoloji	RQD
42,5	32	1	84	15	Granit	%40
Hesaplanan Kaya Kütle Özellikleri						
c (MPa)	Sürtünme açısı	Deformasyon modülü	UCS (kaya kütle)	m_b	s	a
2.65	21	2976 MPa	0.636 MPa	0.527	0.0001	0.510

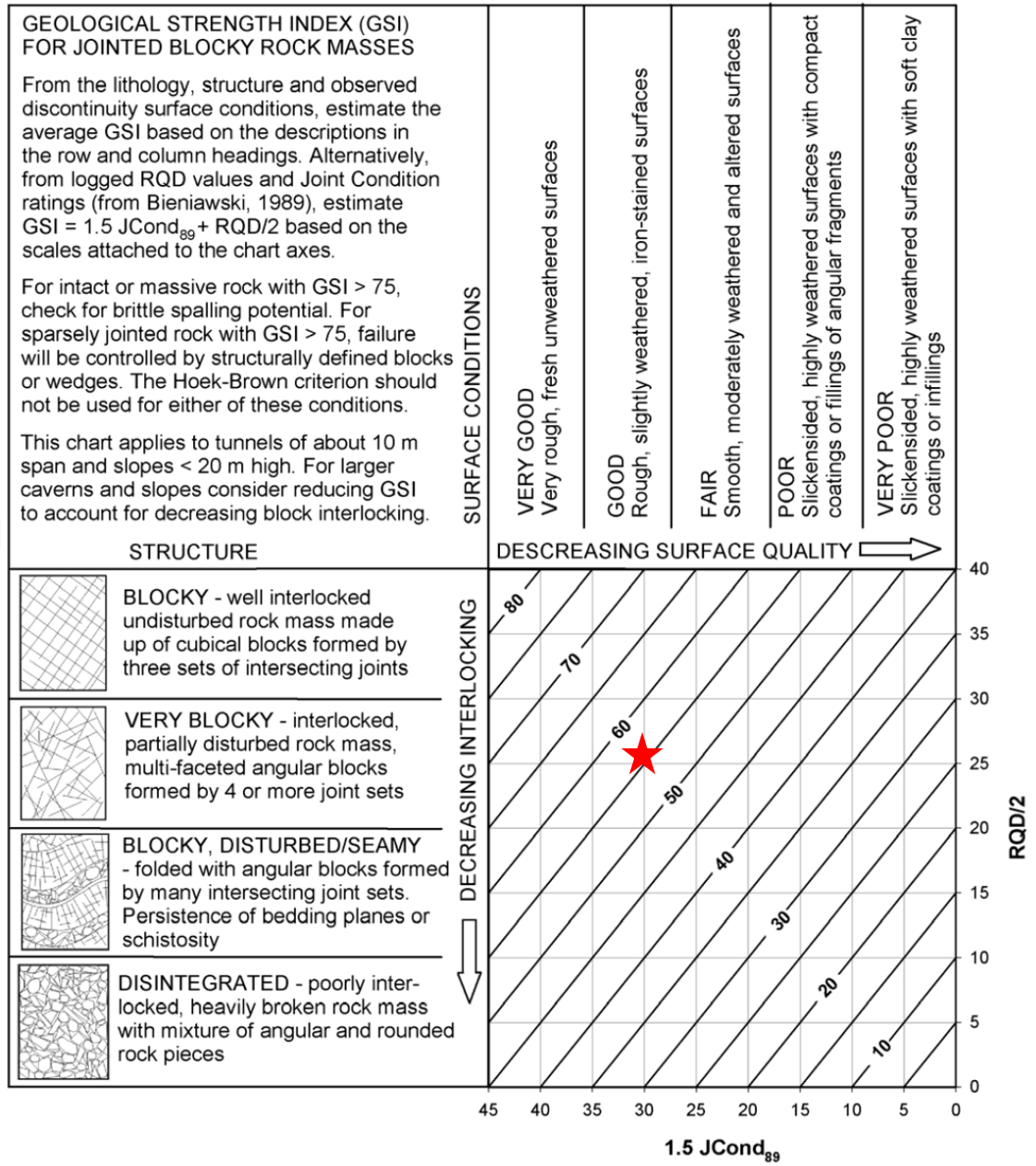
3.7.2. Şev-2 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi

JB-3 birimi için JCond₈₉ puanı 17 olarak hesaplanmıştır (Tablo 17).

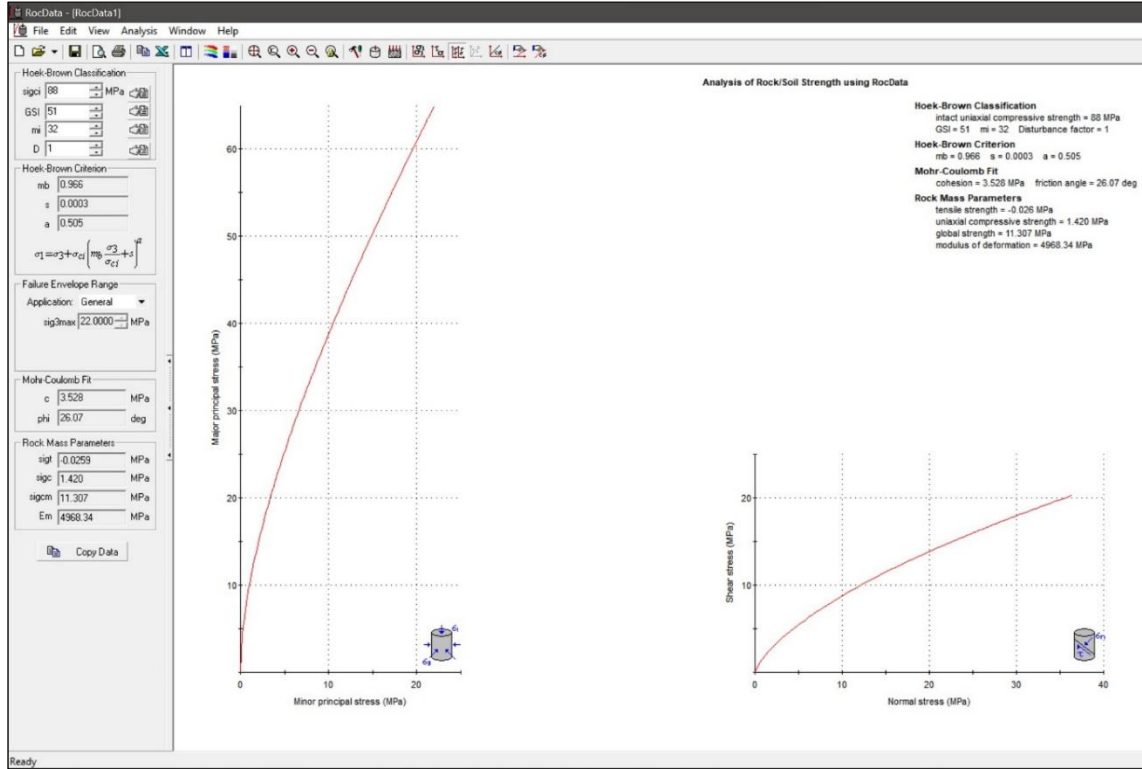
Tablo 17. Granitlerden oluşan kaya şevi için süreksizlik durumu puanının hesaplanması

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	Çok
Puan	6	5	3	1	0
PUAN					17

JB-3 için RMR_{89} değeri Tablo 17 kullanılarak 17, GSI değeri ise Şekil 21 kullanılarak 51 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında JB-3'ün mühendislik özellikleri Hoek-Brown yenilme kriterine göre hesaplanmıştır (Şekil 22). Tablo 18'de ise jeoteknik birimlerin mühendislik özellikleri özetlenmiştir.



Şekil 21. Kaya kütlelerine ait GSI değeri



Şekil 22. Kaya kütesine ait Hoek-Brown parametreleri

Tablo 18. Çalışılan kaya kütesinin mühendislik özellikleri

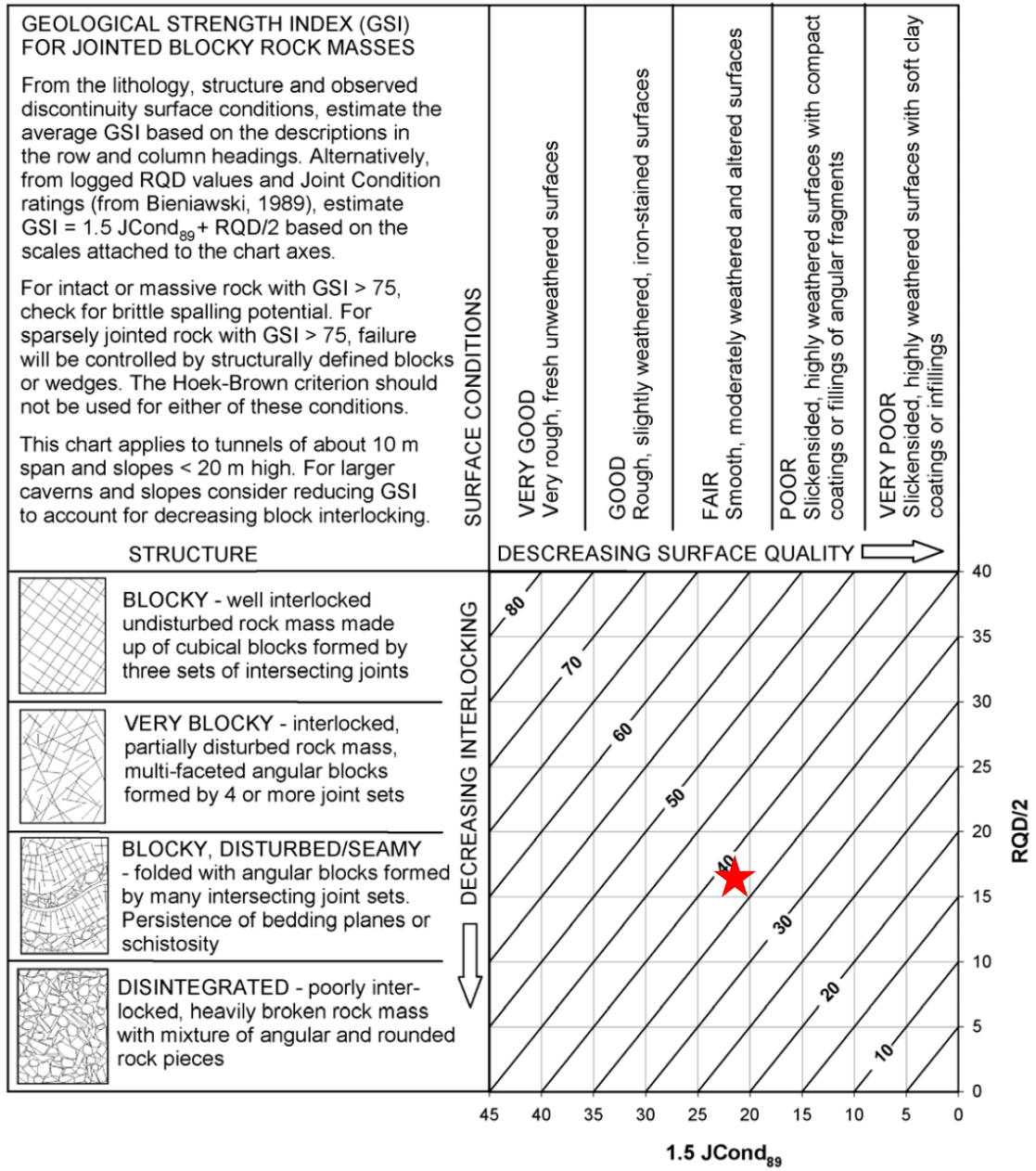
Girdi parametreleri						
GSI	m_i	D	UCS (kaya malzeme)	RMR ₈₉	Litoloji	RQD
51	32	1	88	17	Granit	%53
Hesaplanan Kaya Kütle Özellikleri						
c (MPa)	Sürtünme açısı	Deformasyon modülü	UCS (kaya kütle)	m_b	s	a
3.53	26	4968 MPa	1.42 MPa	0.966	0.0003	0.505

3.7.3. Şev-3 İçin Kaya Kütle Dayanımının Belirlenmesi

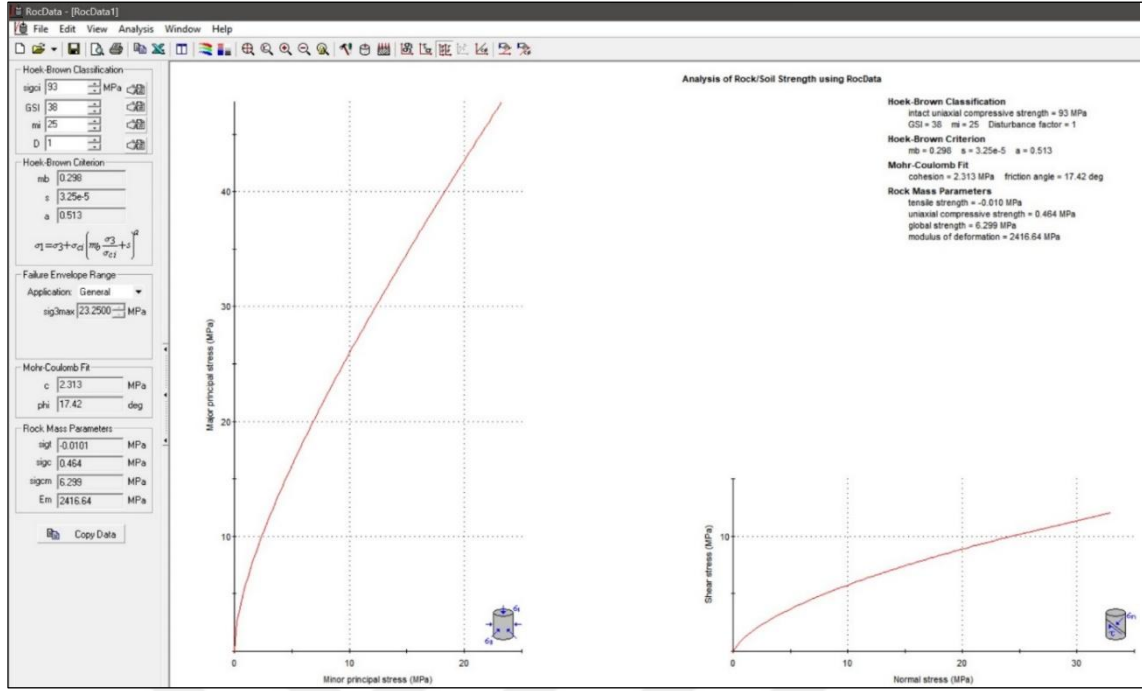
JB-4 için RMR₈₉ değeri Tablo 19 kullanılarak 14, GSI değeri ise Şekil 23 kullanılarak 38 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında JB-3'ün mühendislik özellikleri Hoek-Brown yenilme kriterine göre hesaplanmıştır (Şekil 24). Tablo 20'de JB-4'ün mühendislik özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 19. Volkaniklerden oluşan 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	Çok
Puan	6	5	3	1	0
PUAN					14



Şekil 23. Hoek vd. (2013) tarafından önerilen GSI grafiği ve kaya kütlelerine ait GSI değerleri



Şekil 24. Kaya kütesine ait Hoek-Brown parametreleri

Tablo 20. Hoek-Brown yenilme kriteri uygulanarak hesaplanan ve proje konusu kaya kütesinin mühendislik özellikleri

Girdi parametreleri						
GSI	m_i	D	UCS (kaya malzeme)	RMR ₈₉	Litoloji	RQD
38	32	1	93	14	Andezit-bazalt	%35
Hesaplanan Kaya Kütle Özellikleri						
c (MPa)	Sürtünme açısı	Deformasyon modülü	UCS (kaya kütle)	m_b	s	a
2.31	17	2417 MPa	0.464 MPa	0.298	0.00003	0.513

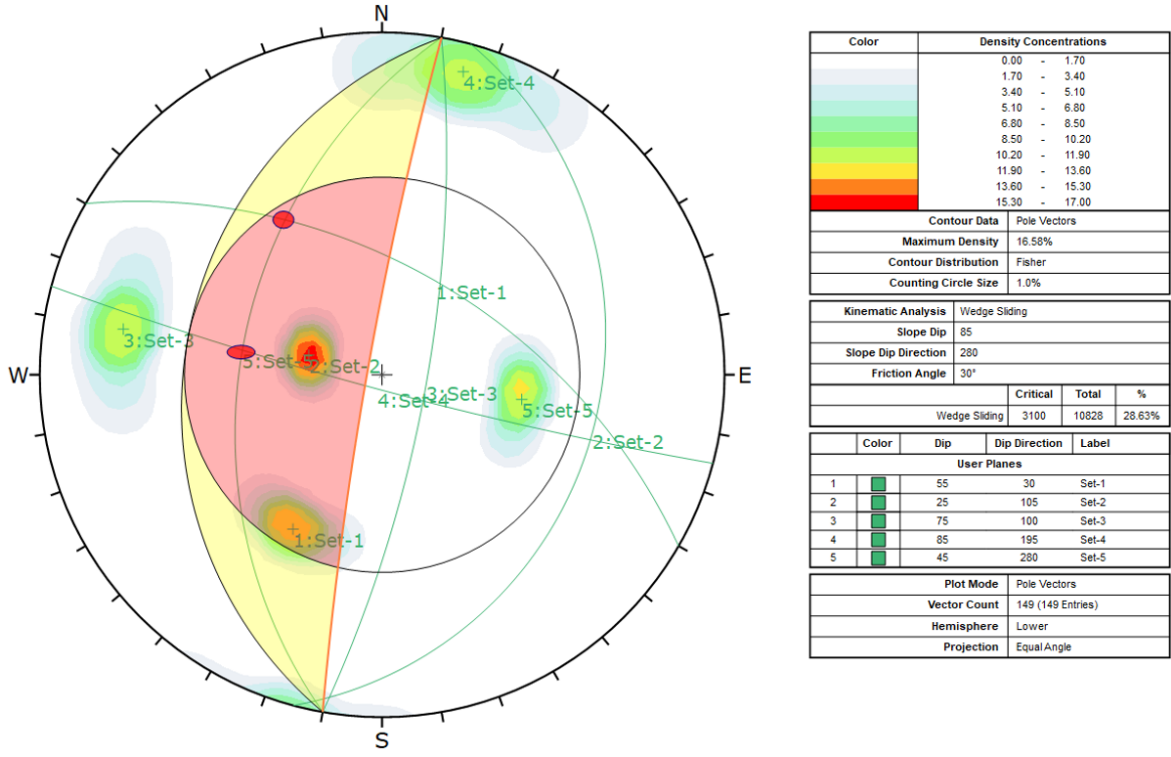
3.8. Şev Stabilité Analizleri

Şev stabilite analizleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışılan karayolu şevlerinde süreksizlik takımlarına bağlı herhangi bir yenilme riskinin olup olmadığı kinematik analizlerle araştırılmıştır. Analizlerin ikinci aşamasında ise 3 boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir.

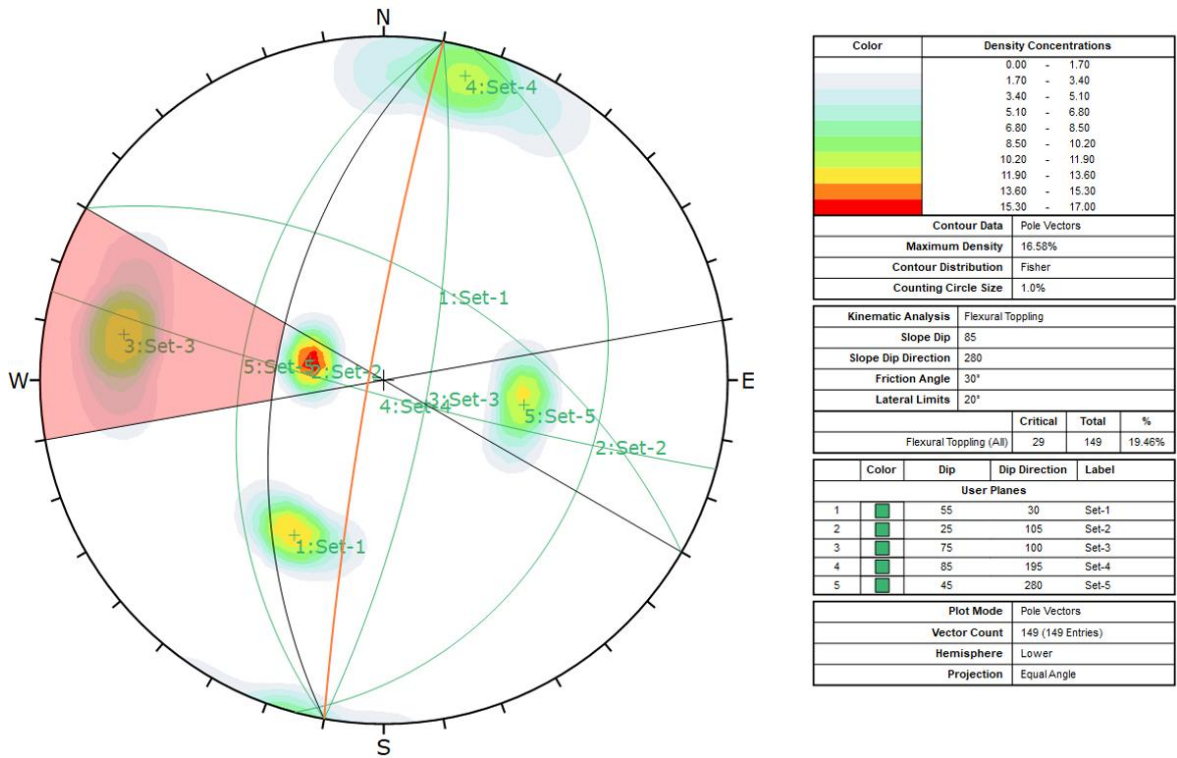
3.8.1. Kinematik Analizler

Kinematik analiz, şev ve süreksizliklerin uzaysal duruşlarını ve süreksizliklerin sürtünme açısını dikkate alarak incelenen şevde süreksizlik kontrollü bir yenilme olup

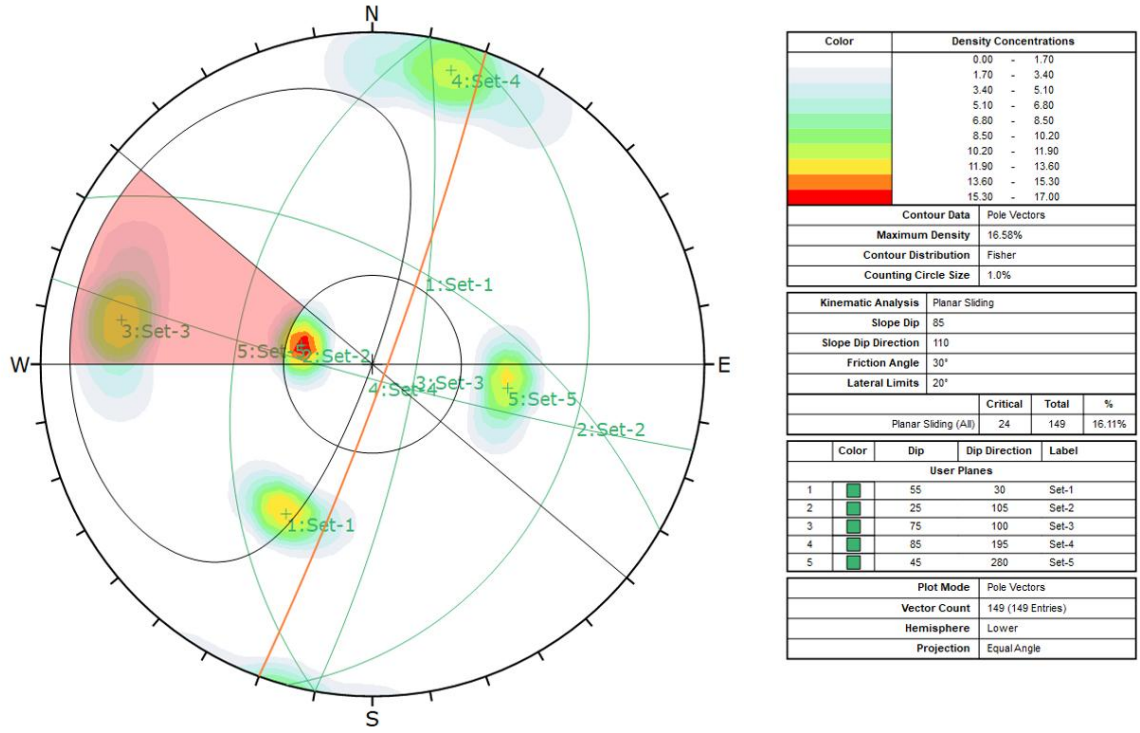
Şekil 25. 280/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



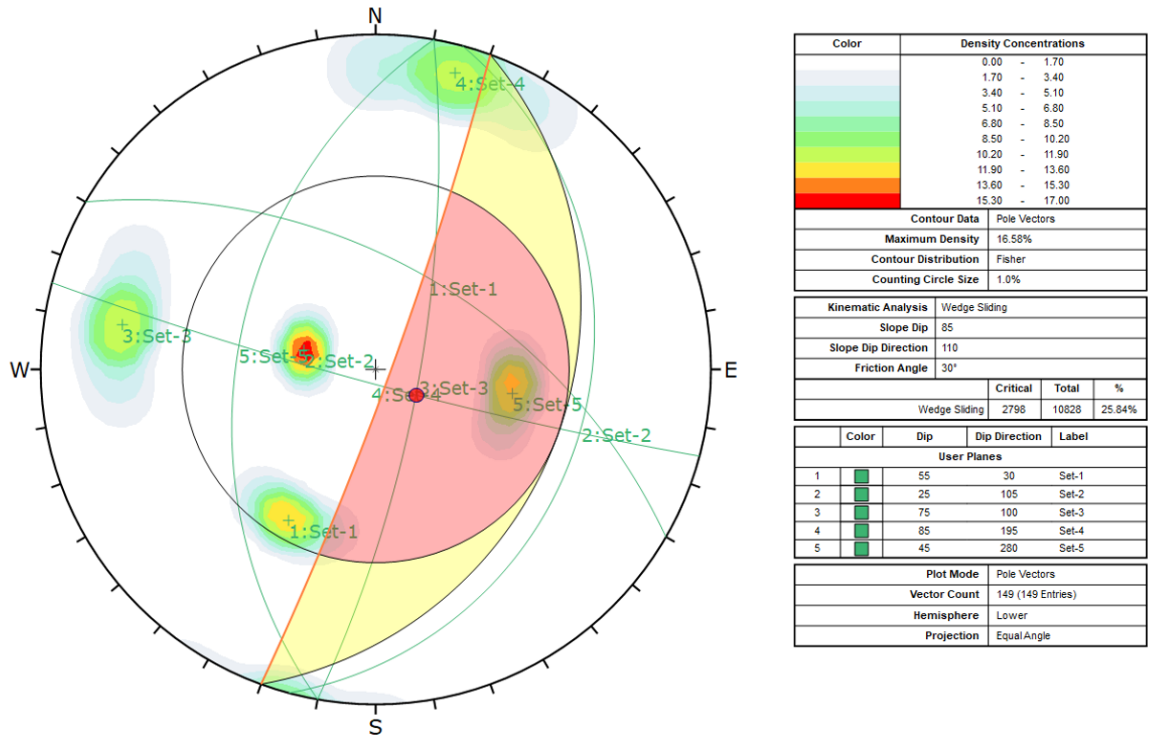
Şekil 26. 280/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



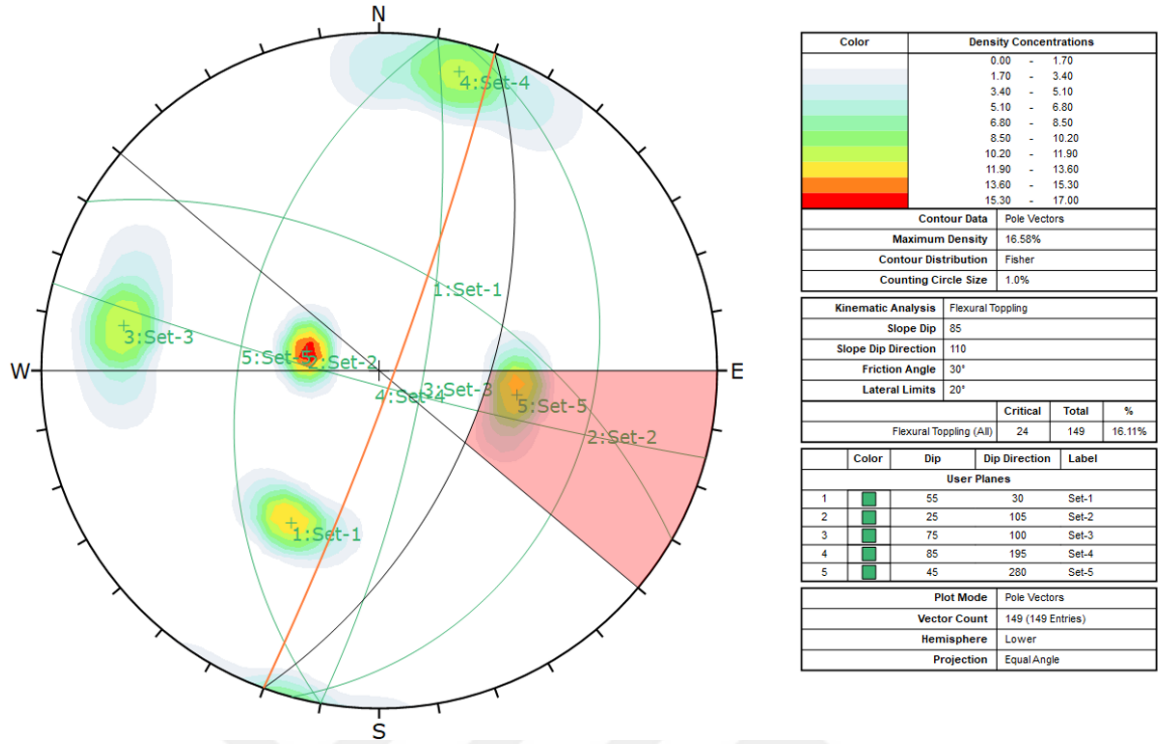
Şekil 27. 280/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 28. 110/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 29. 110/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 30. 110/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları

Tablo 21. 280/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları

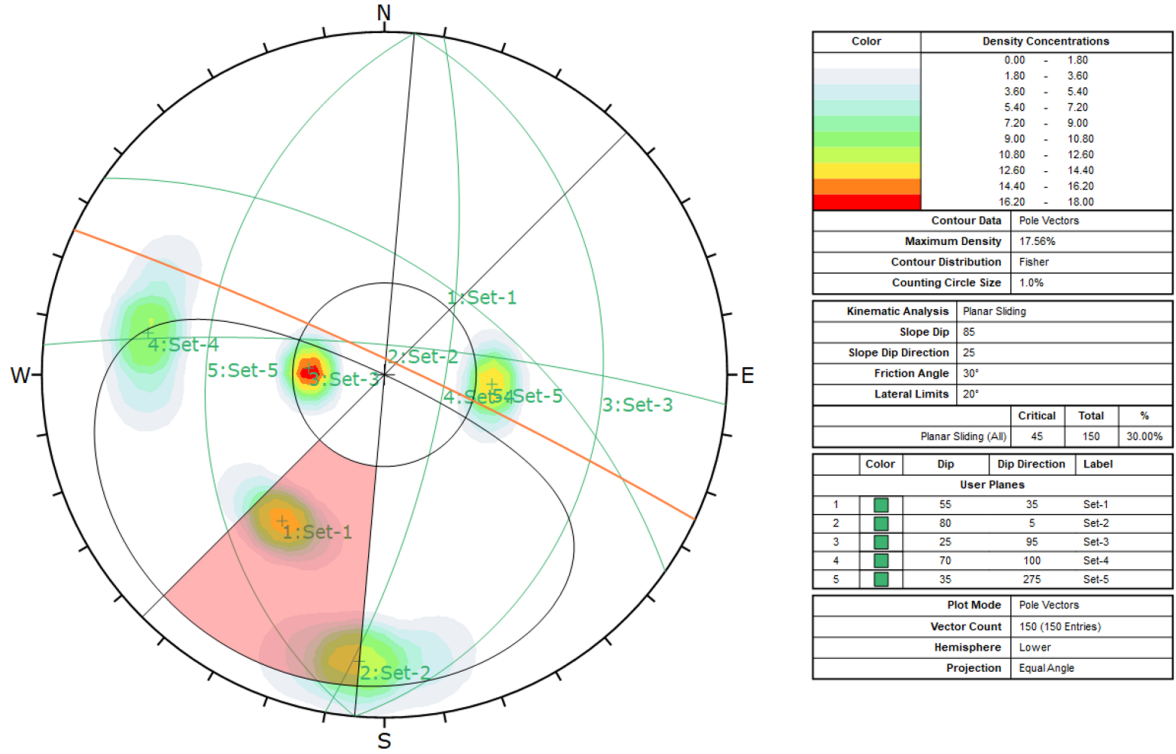
Set No	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kaya Tipi Kayma	Devrilme
1	30/55	-	Riskli	-
2	100/75	-	-	-
3	105/25	-	-	Riskli
4	195/85	-	Riskli	-
5	280/45	Riskli	Riskli	-

Tablo 22. 110/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları

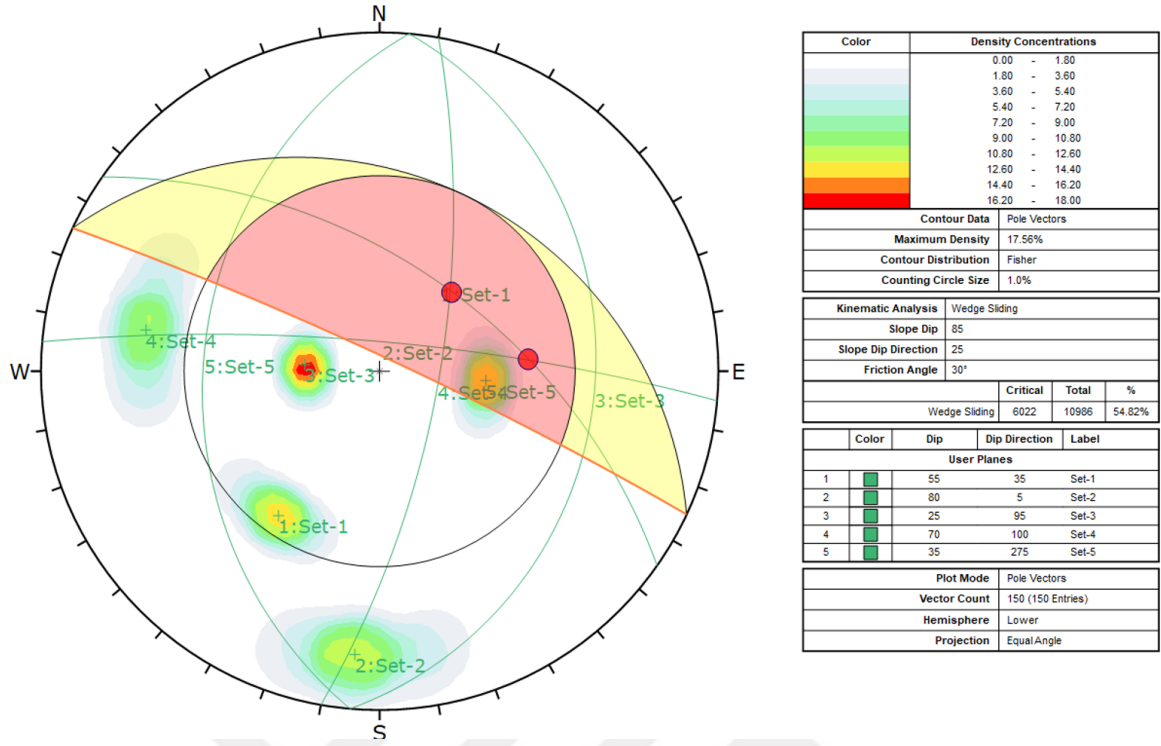
Set No	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kaya Tipi Kayma	Devrilme
1	30/55	-	-	-
2	100/75	-	-	-
3	105/25	Riskli	Riskli	-
4	195/85	-	Riskli	-
5	280/45	-	-	Riskli

Şev-2 İçin Yapılan Kinematik Analizler

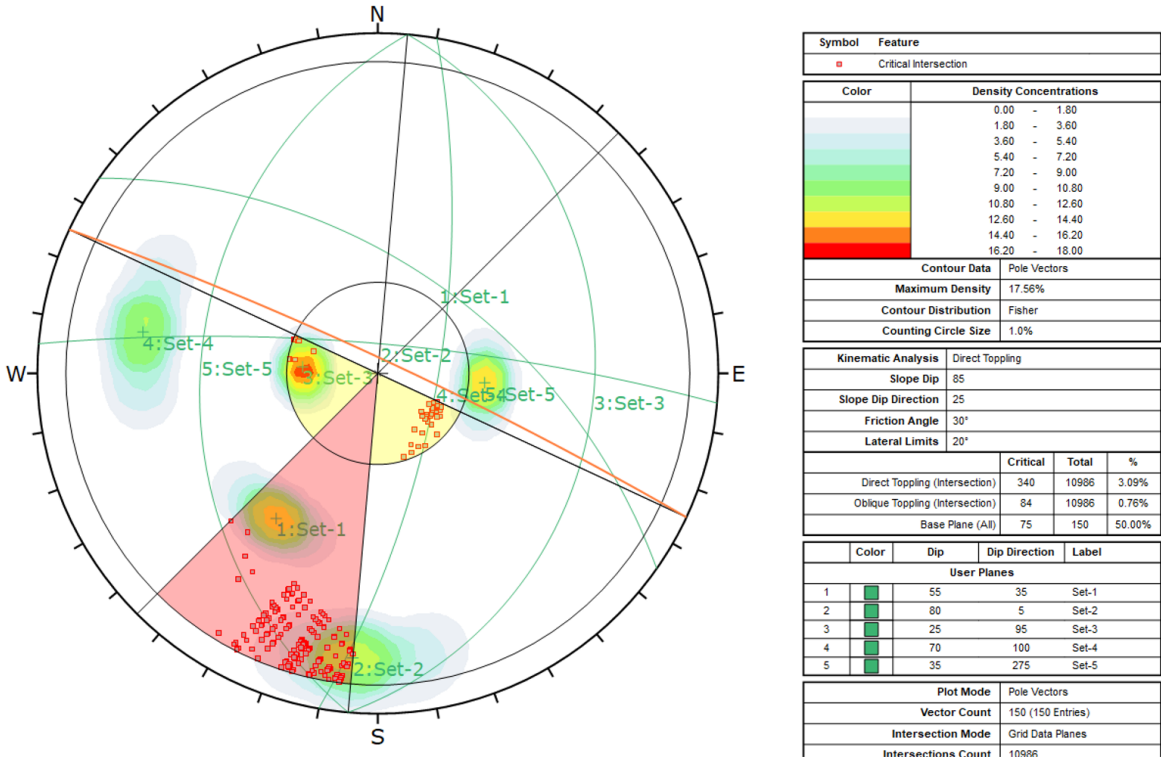
25/85 duruşlu kaya şevinde yenilme riski, kinematik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir (Şekil 31-33). Süreksizlik yüzeylerinin sürtünme açısı Barton ve Bandis (1990) tarafından yöntem kullanılarak 30 derece olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerde kaya şevlerinde beklenen yenilme türleri Tablo 23'te özetlenmiştir.



Şekil 31. 25/85 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 32. 25/85 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



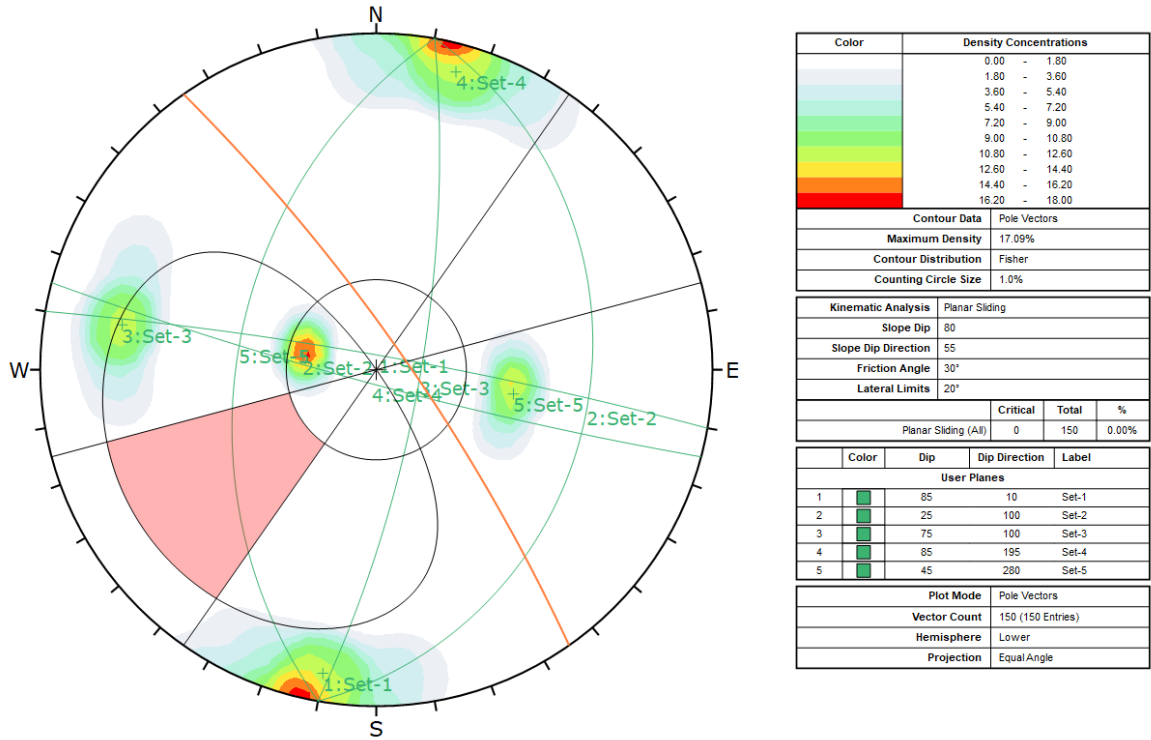
Şekil 33. 25/85 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları

Tablo 23. 280/85 duruşlu kaya şevinde granitik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları

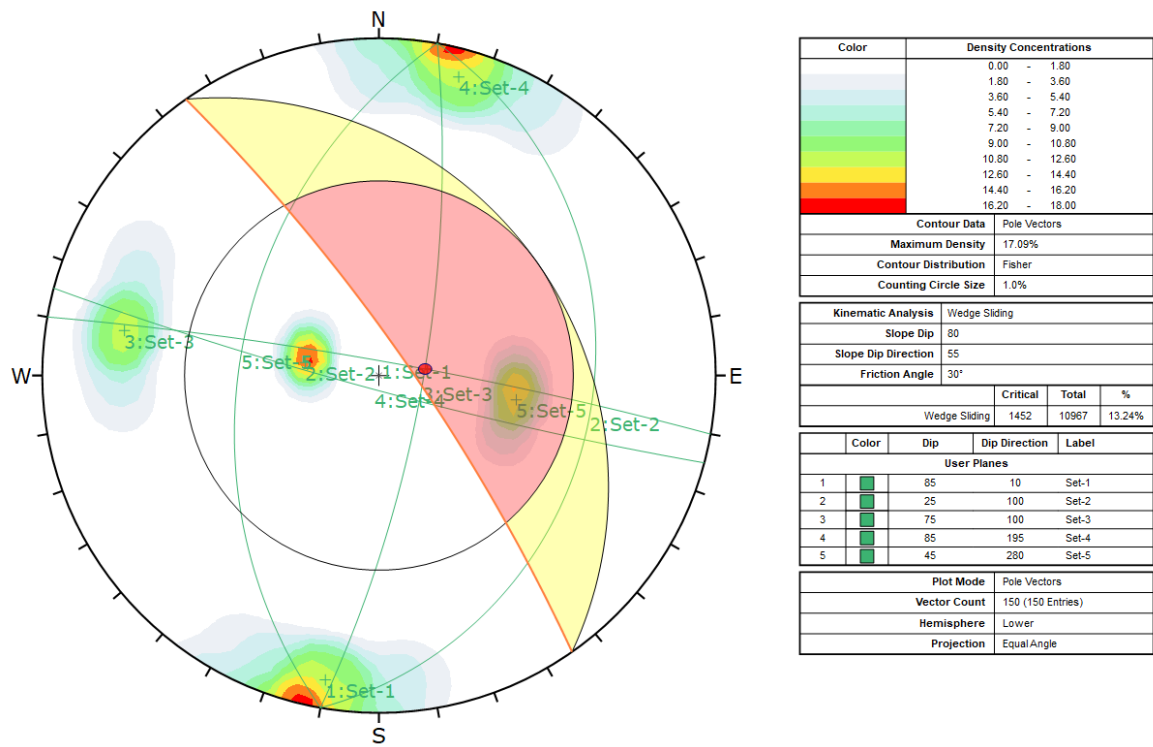
Set No	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kaya Tipi Kayma	Düşme
1	5/80	Riskli	Riskli	Riskli
2	35/55	-	Riskli	-
3	95/25	-	-	-
4	100/70	-	Riskli	-
5	275/35	-	-	-

Şev-3 İçin Yapılan Kinematik Analizler

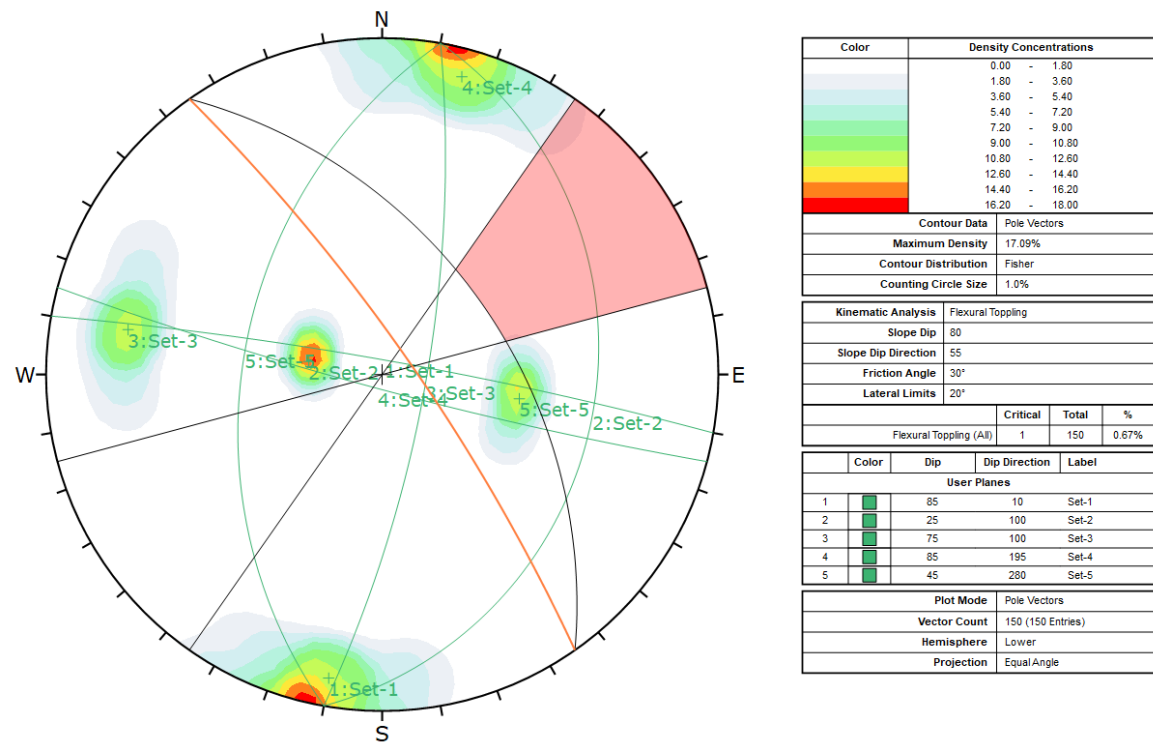
55/80 duruşlu kaya şevlerinde yenilme riski, kinematik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir (Şekil 34-36). Süreksizlik yüzeylerinin sürtünme açısı Barton ve Bandis (1990) tarafından yöntem kullanılarak 30 derece olarak kabul edilmiştir. Yapılan analizlerde 55/80 duruşlu kaya şevlerinde beklenen yenilme türleri Tablo 24'e özetlenmiştir.



Şekil 34. 55/80 duruşlu şevde düzlemsel kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 35. 55/80 duruşlu şevde düzlemsel kama tipi kayma riskini gösteren kinematik analiz sonuçları



Şekil 36. 55/80 duruşlu şevde devrilme riskini gösteren kinematik analiz sonuçları

Tablo 24. 55/80 duruşlu kaya şevinde volkanik kaya kütlesi için uygulanan kinematik analiz sonuçları

Set No	Süreksizlik Duruşu	Düzlemsel Kayma	Kama Tipi Kayma	Devrilme
1	30/55	-	Riskli	-
2	100/75	-	-	-
3	105/25	-	Riskli	-
4	195/85	-	-	-
5	280/45	-	-	-

3.8.2. 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri

Çalışma kapsamında incelenen karayolu şevleri üzerinde RockPro3D® yazılımı kullanılarak 3 boyutlu kaya düşmesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler genel olarak 3 aşamadan oluşmaktadır:

1. Şevlere ait 3 boyutlu modellerin kurulması,
2. Farklı boyutlardaki bloklar için düşme senaryolarının gerçekleştirilmesi,
3. Kaya düşme etkisinin değerlendirilmesi.

Üç boyutlu kaya düşme analizleri, RocPro3D yazılımı ile yapılmıştır. Hazırlanan nokta bulutu ve üçgen ağı (TIN) Şekil 37’de, buna bağlı olarak oluşturulan katı model ve 3 boyutlu eğim, bakı ve yükseklik haritaları ise Şekil 38’de sunulmuştur.

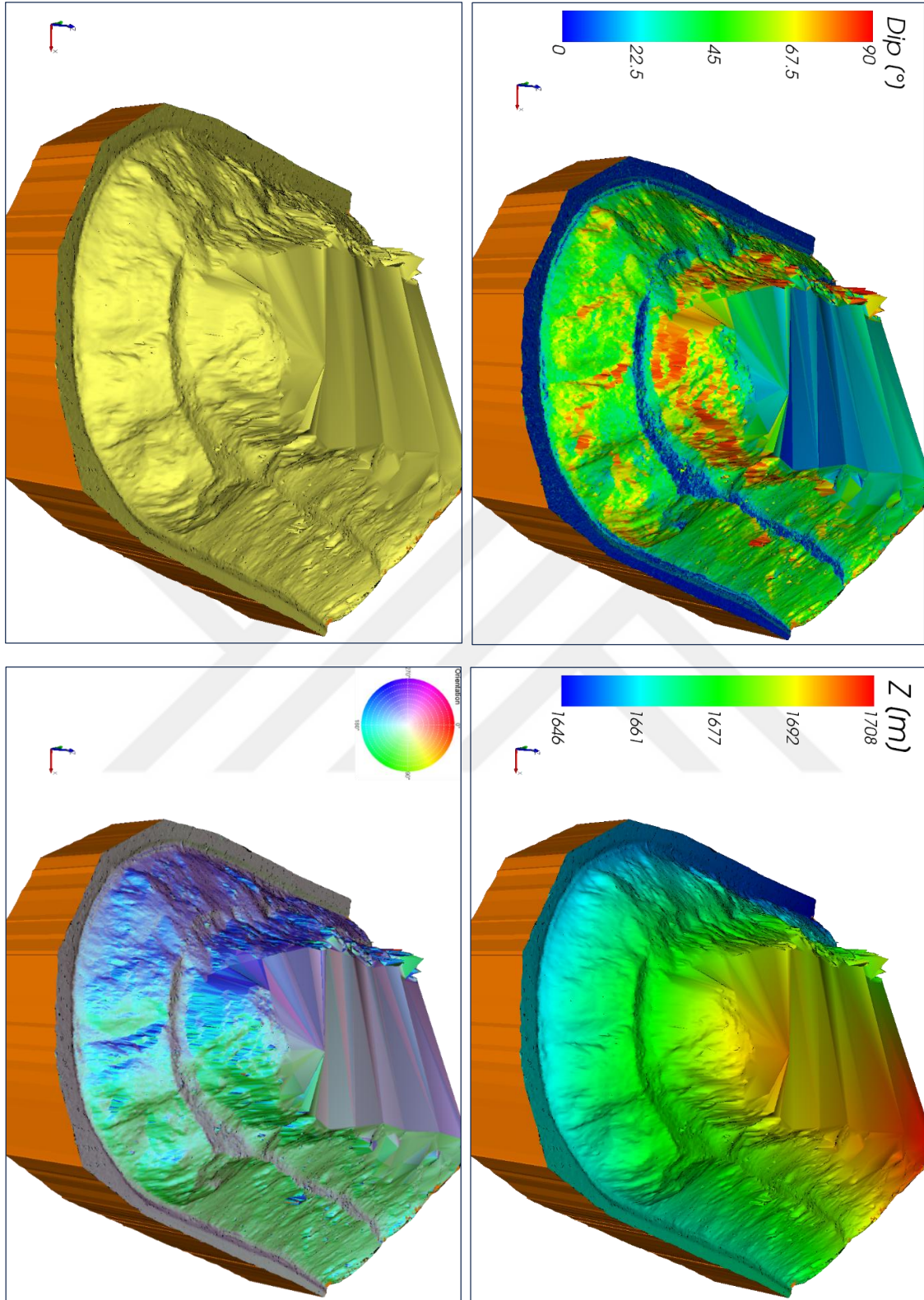
Şev-1 için 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizi

Şev-1 için yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde 1000’er ayrı noktadan ayrı ayrı 1 tonluk ve 100 kg’lık bloklar düşürülmüş ve toplam 2000 blok hareketi simüle edilmiştir. Blok boyutları arazi çalışmaları ve ortofotolardan elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma alanında 2 farklı jeoteknik birim ayırtlanmıştır. Literatür verileri dikkate alınarak JB-1 için normal ve teğetsel geri verme katsayıları sırasıyla $R_n=0,75$ ve $R_t=0,75$, sürtünme katsayısı ise $(k)=0,4$ olarak; JB-2 içinse $R_n=0,5$, $R_t=0,5$ ve $k=0,4$ olarak kabul edilmiştir.

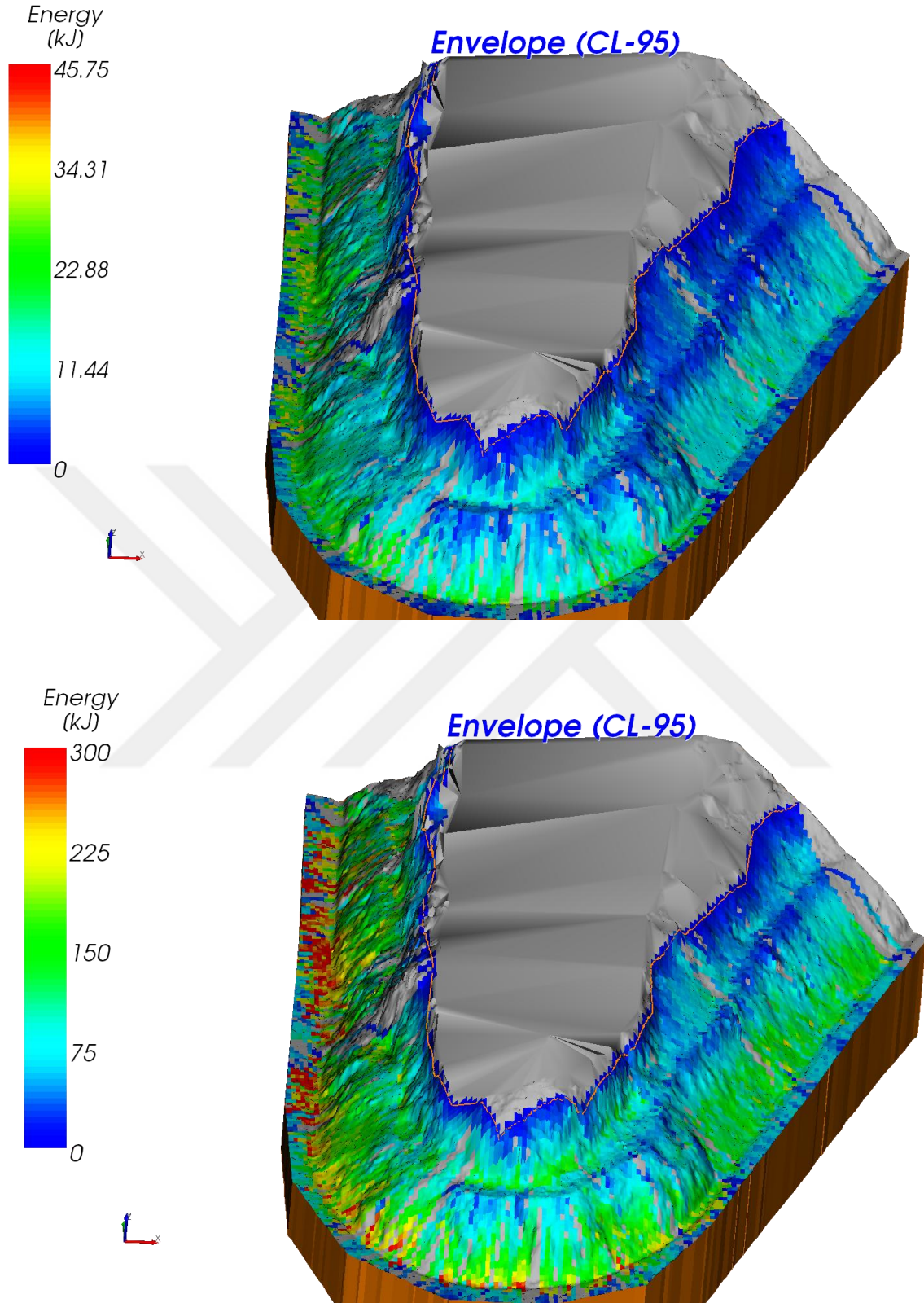
Çalışmada 1000 kg ve 100 kg’lık bloklar için yapılan analizlerle enerji değerleri hesaplanmış, dağılım izi haritaları çalışılan Şev-1 için hazırlanmıştır (Şekil 39-41).



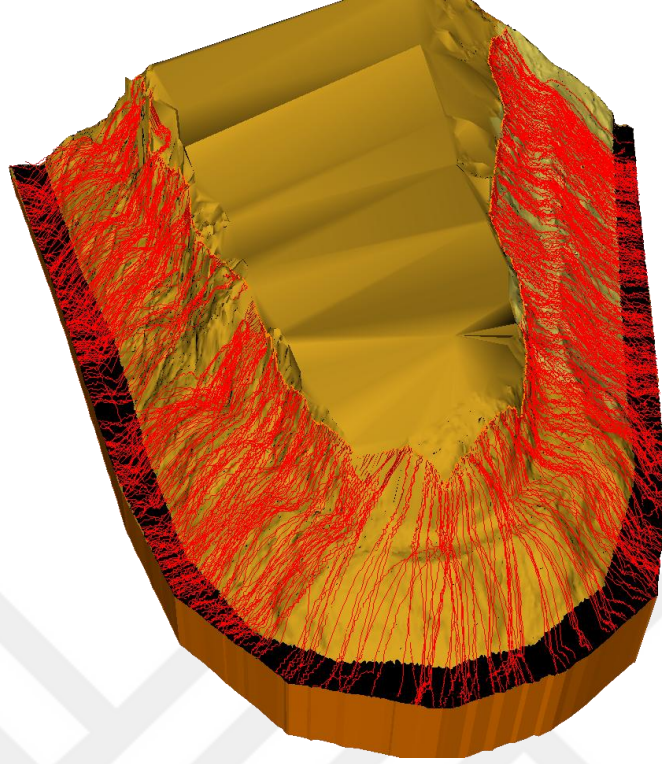
Şekil 37. RocPro3D yazılımında Şev-1 için oluşturulan nokta bulutu (üstte) ve TIN (altta)



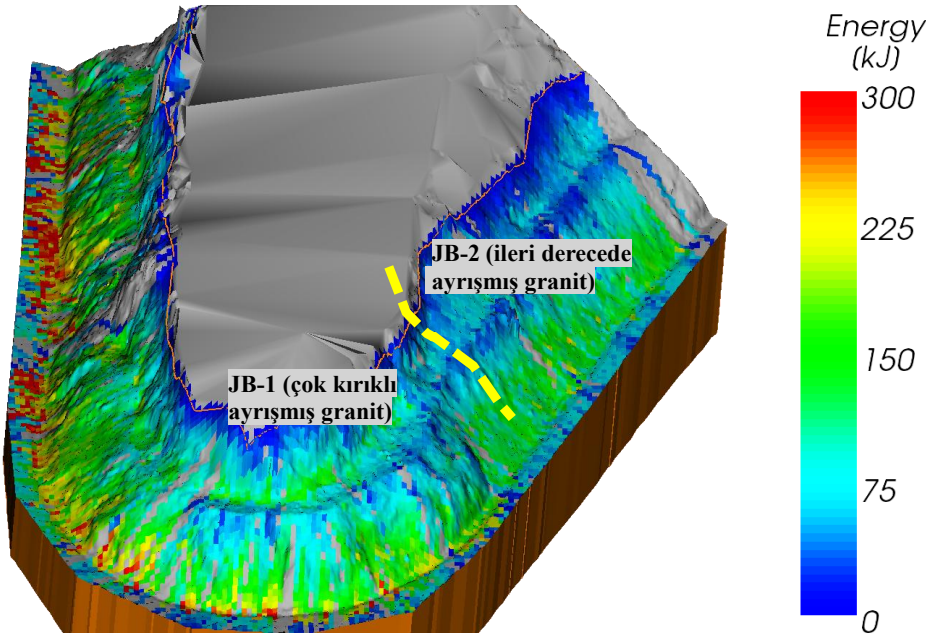
Şekil 38. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (sol üst), eğim derecesi (sağ üst), eğim yönü (sol alt) ve yükseklik (sağ alt) modelleri



Şekil 39. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri



Şekil 40. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleyle sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi

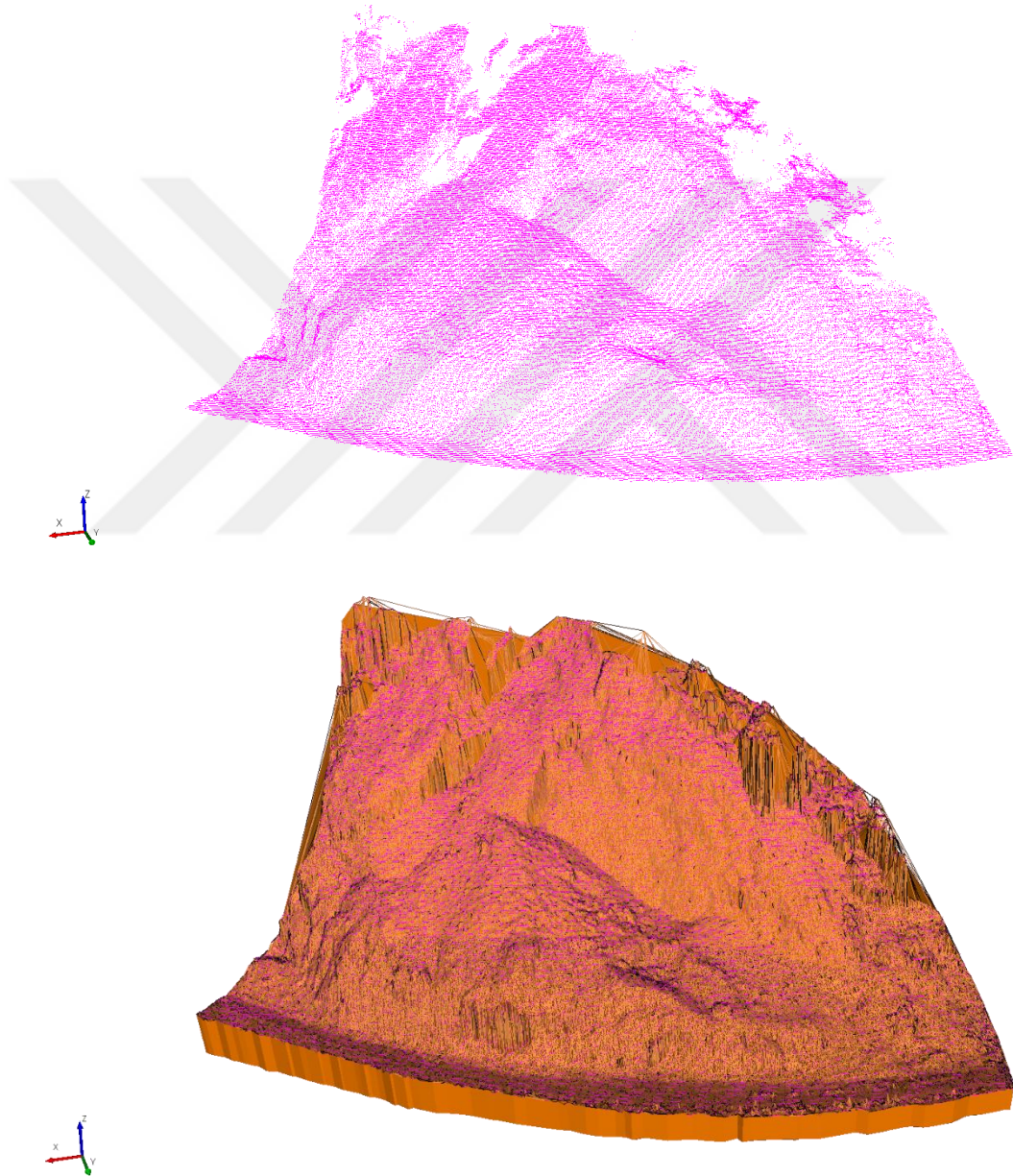


Şekil 41. Şev-1’de farklı jeoteknik birimler için 1 tonluk kaya düşmesi sonrası oluşacak enerjiler (JB-1 için maksimum 300 kJ, JB-2 için maksimum 150 kJ)

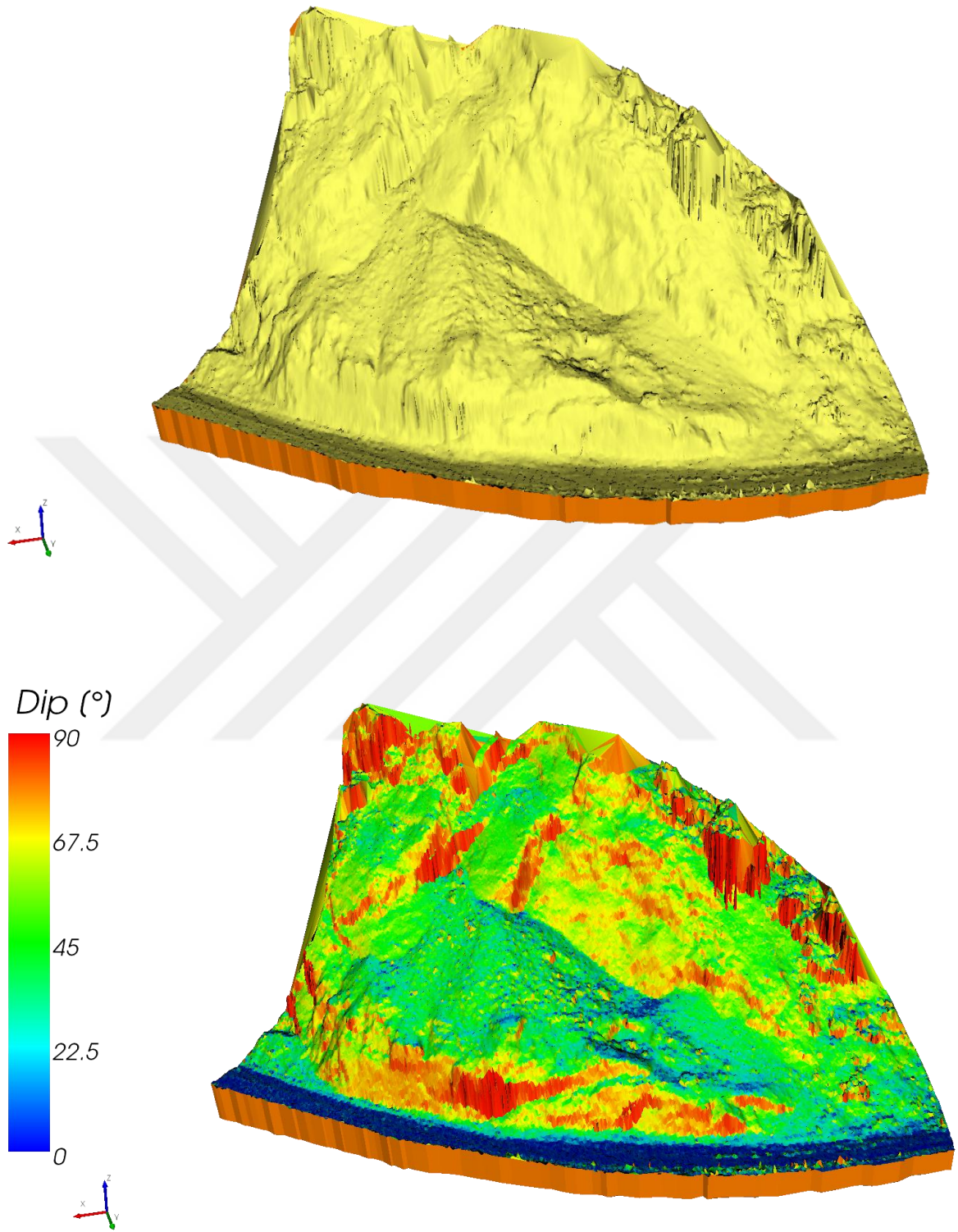
Şev-2 için 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri

Şev-2'nin olduğu alanda kaya düşmelerinin gerçekleştiği bölgede arazi gözlemlerine bağlı olarak tek bir jeolojik birim ayırtlanmıştır. Çalışma alanındaki jeoteknik birim için literatür verileri dikkate alınarak $R_n=0,75$, $R_t=0,75$, $k=0,4$ olarak kabul edilmiştir.

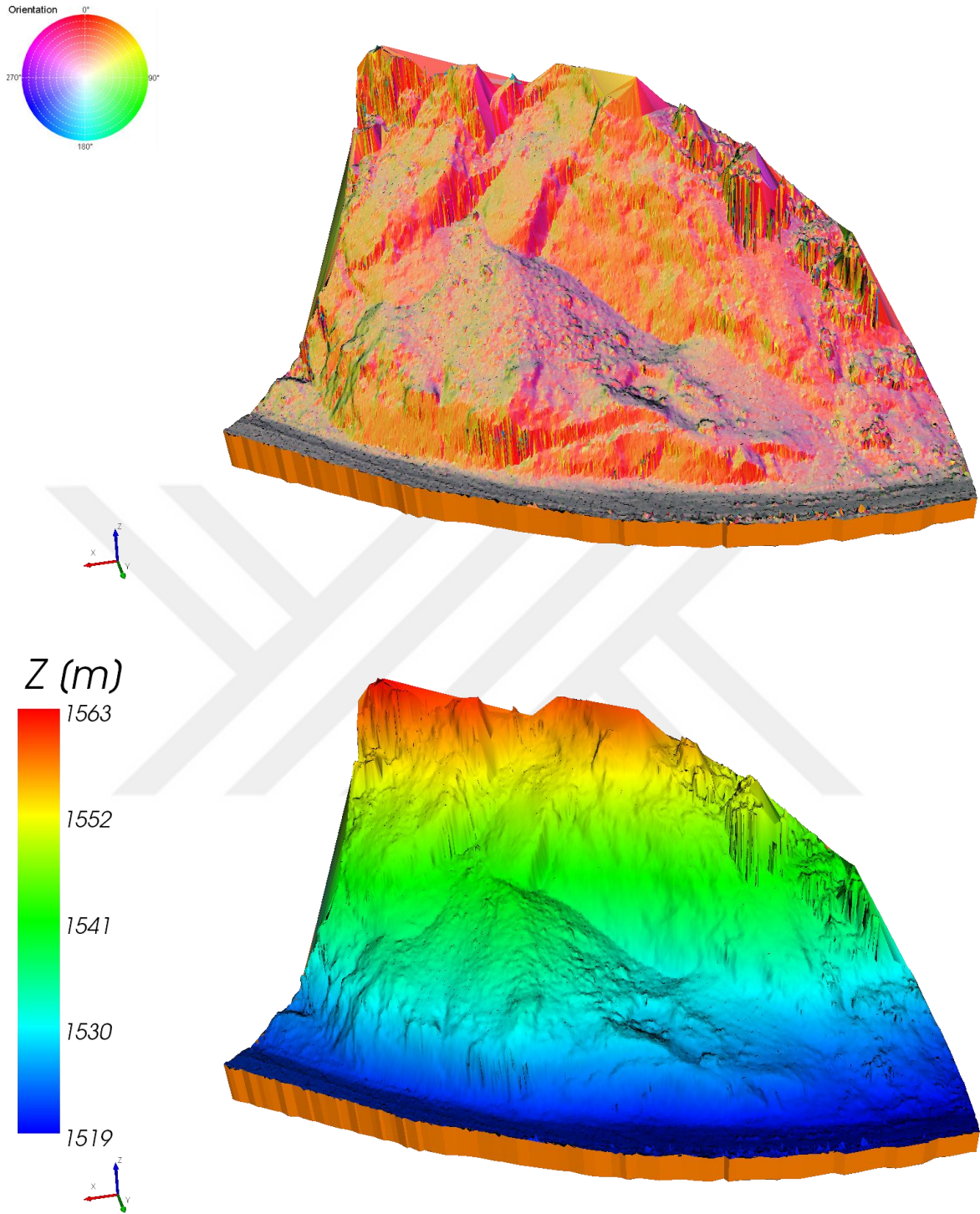
Çalışmada 1000 kg ve 100 kg kütleli bloklar için yapılan analizlerle enerji değerleri hesaplanmış, dağılım izi haritaları hazırlanmıştır (Şekil 42-47).



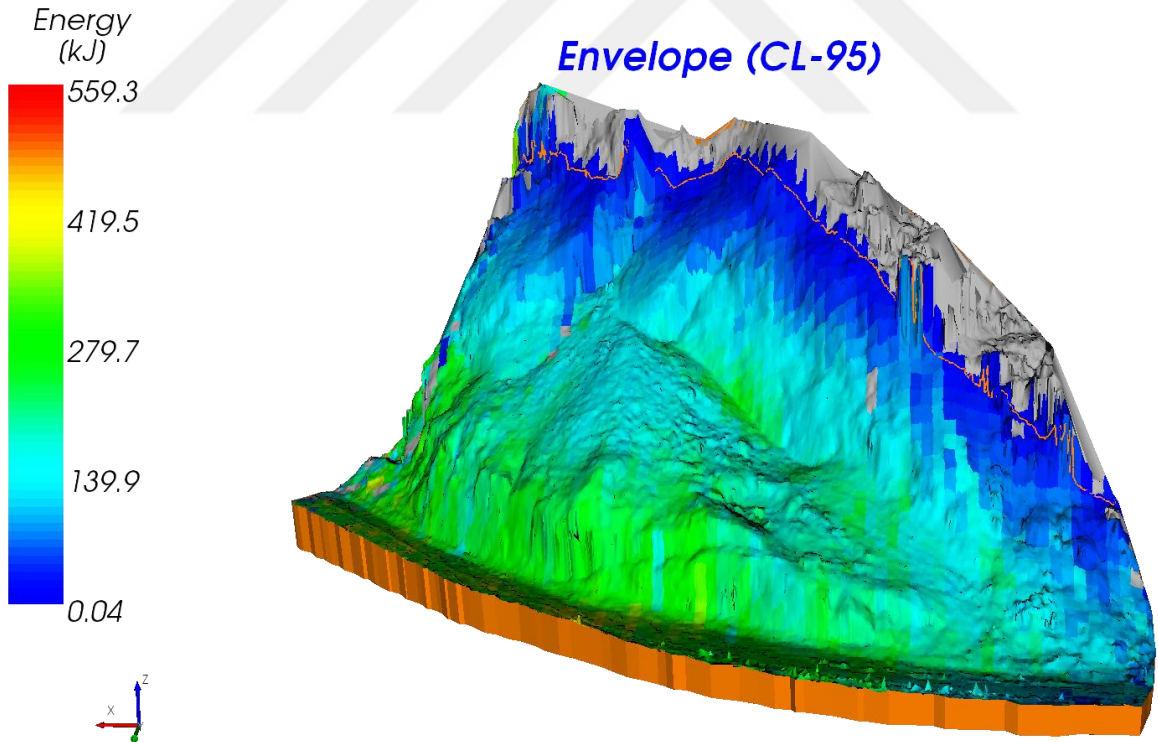
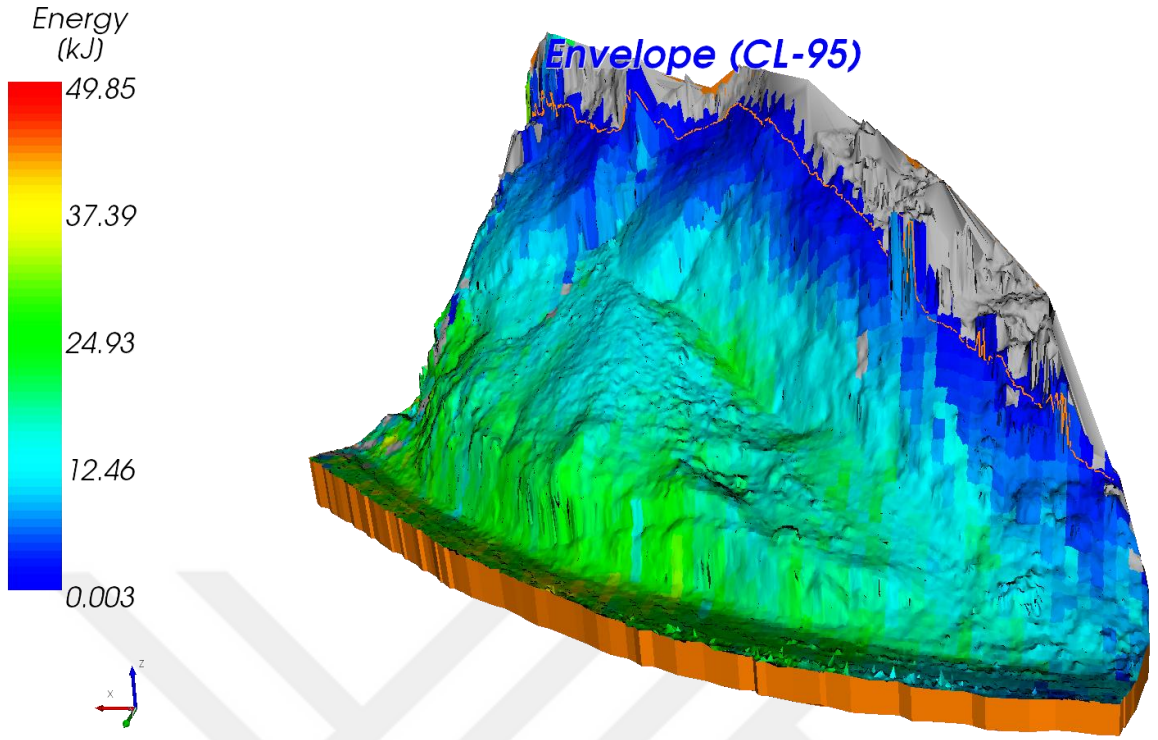
Şekil 42. RocPro3D yazılımında oluşturulan nokta bulutu (üst şekil) ve düzensiz üçgen ağı (alt şekil)



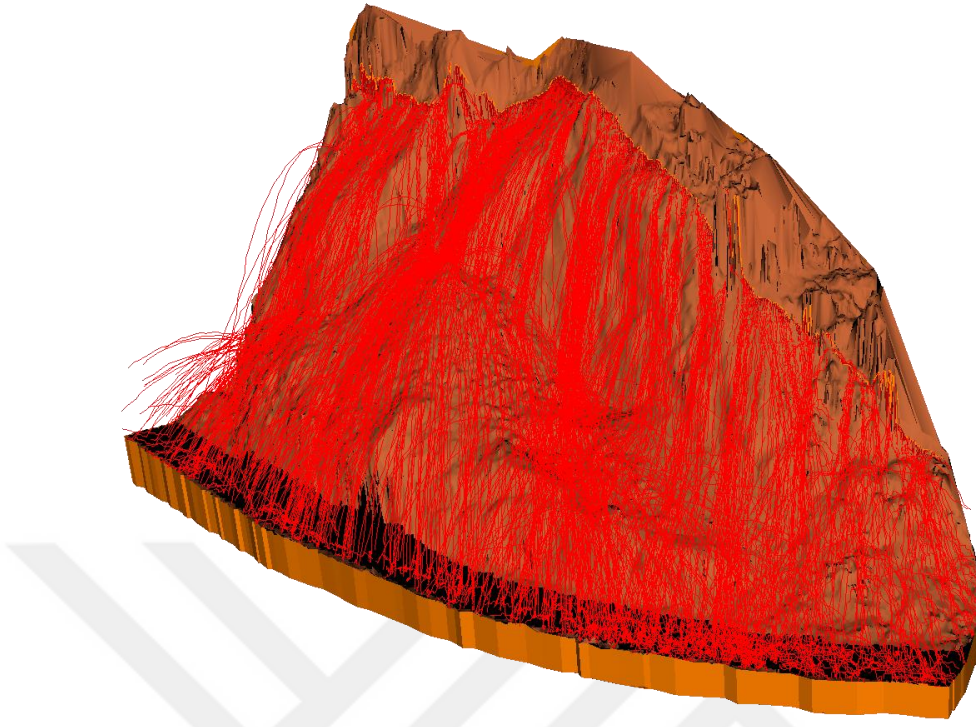
Şekil 43. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (üstte), eğim derecesi (altta) modelleri



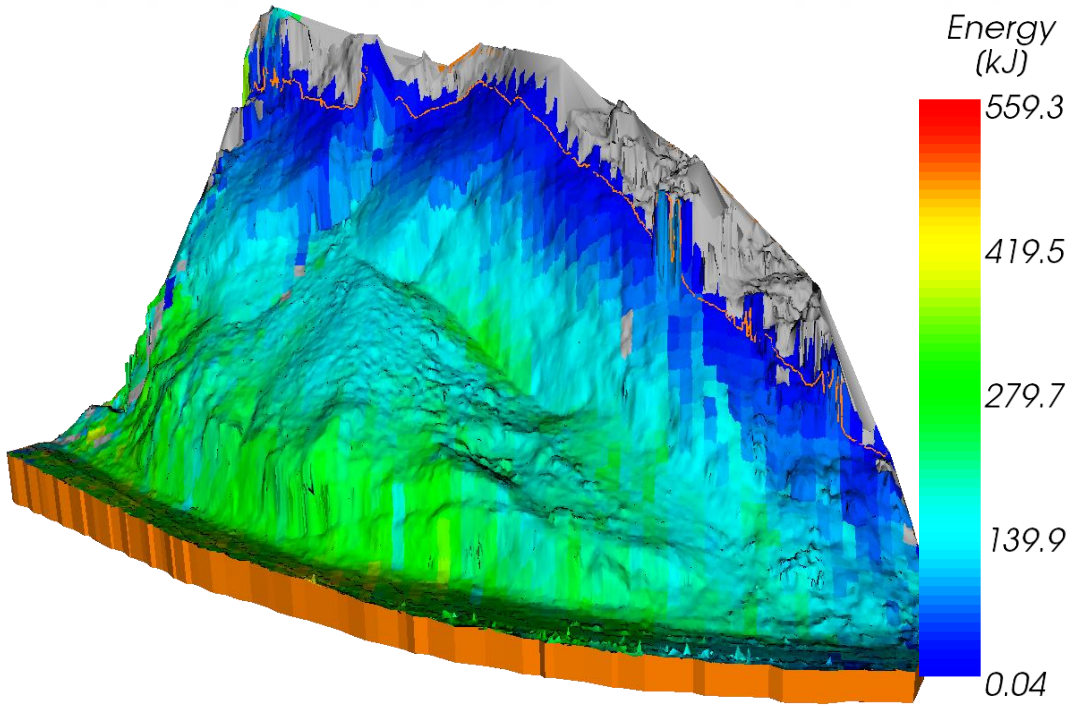
Şekil 44. RocPro3D yazılımında oluşturulan eğim yönü (üst) ve yükseklik (alt) modelleri



Şekil 45. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri



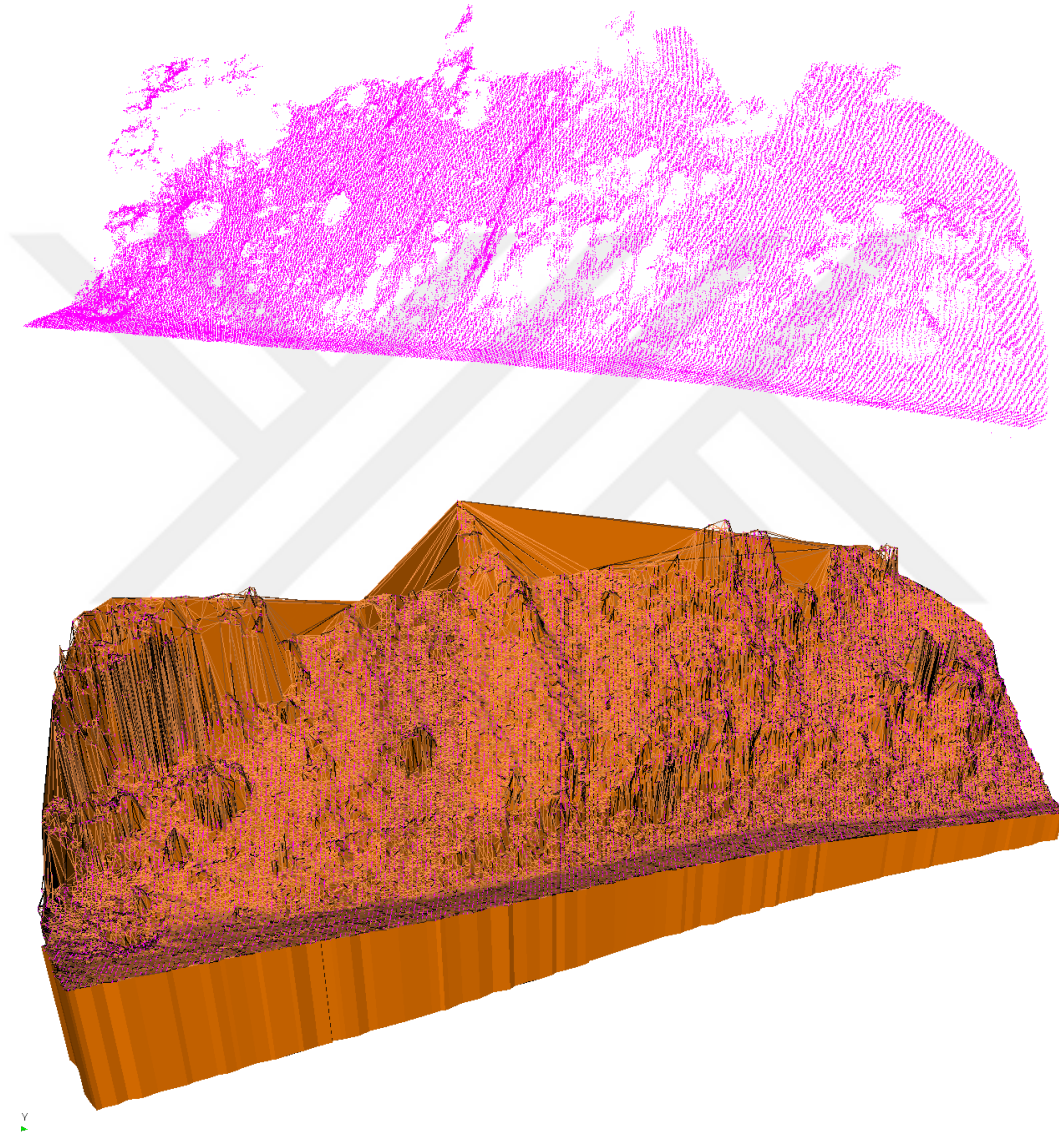
Şekil 46. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi



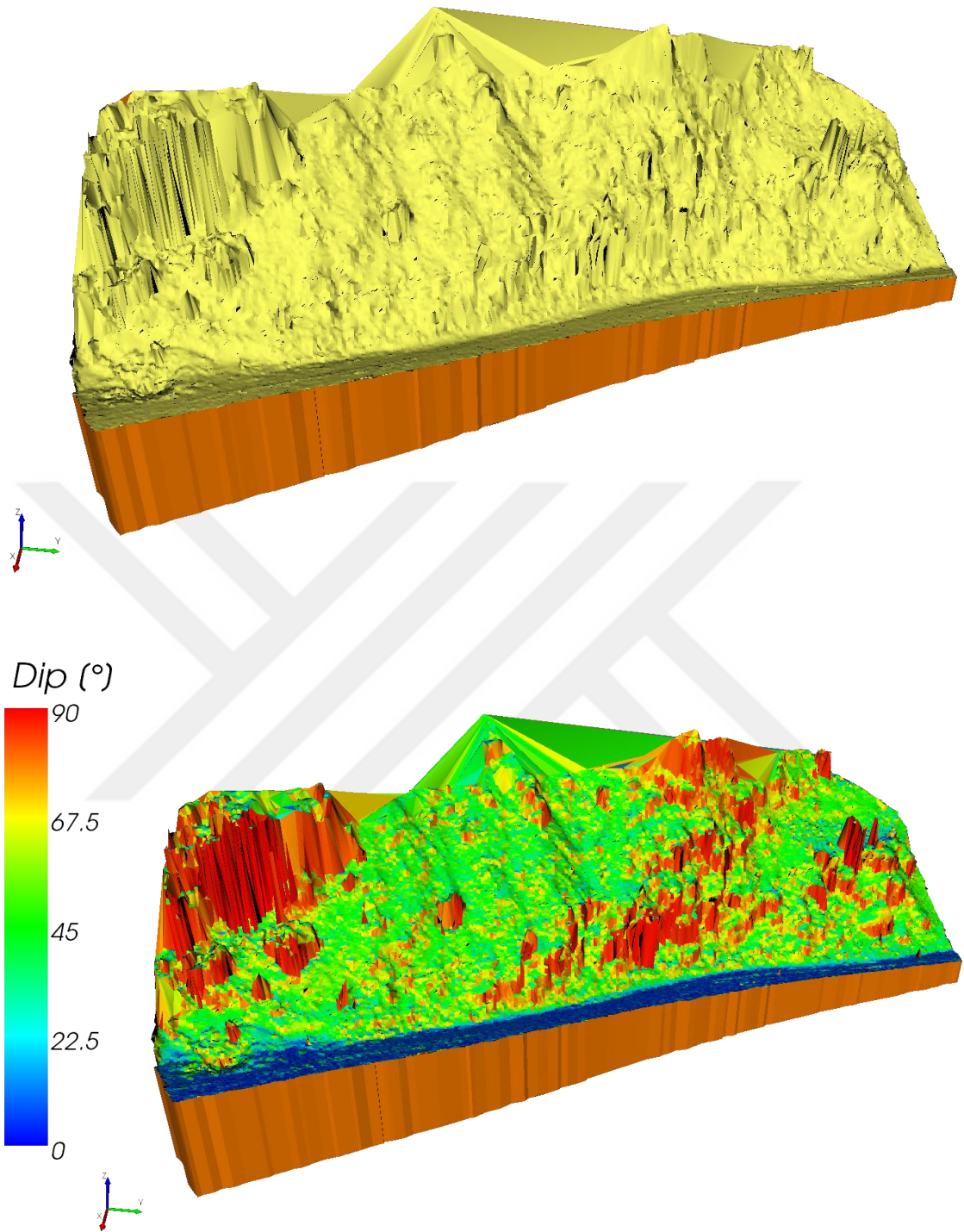
Şekil 47. Karayolu şevi üzerinden 5 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri

Şev-3 için 3 Boyutlu Kaya Düşme Analizleri

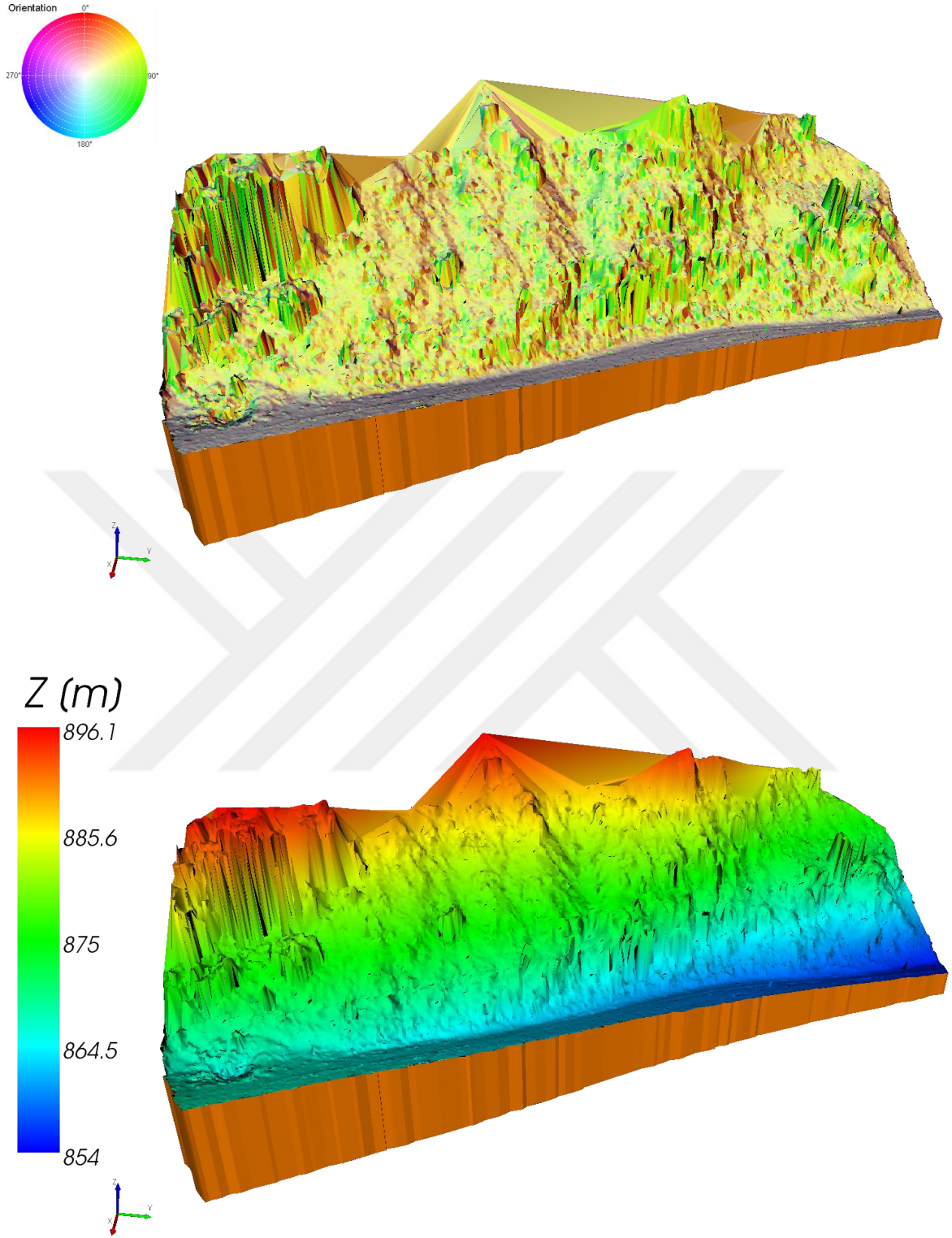
JB-4 için $R_n=0,75$, $R_t=0,75$, $k=0,4$ olarak kabul edilmiştir. 1000 kg ve 100 kg kütleli bloklar için yapılan analizlerle enerji değerleri hesaplanmış, dağılım izi haritaları hazırlanmıştır (Şekil 48-53).



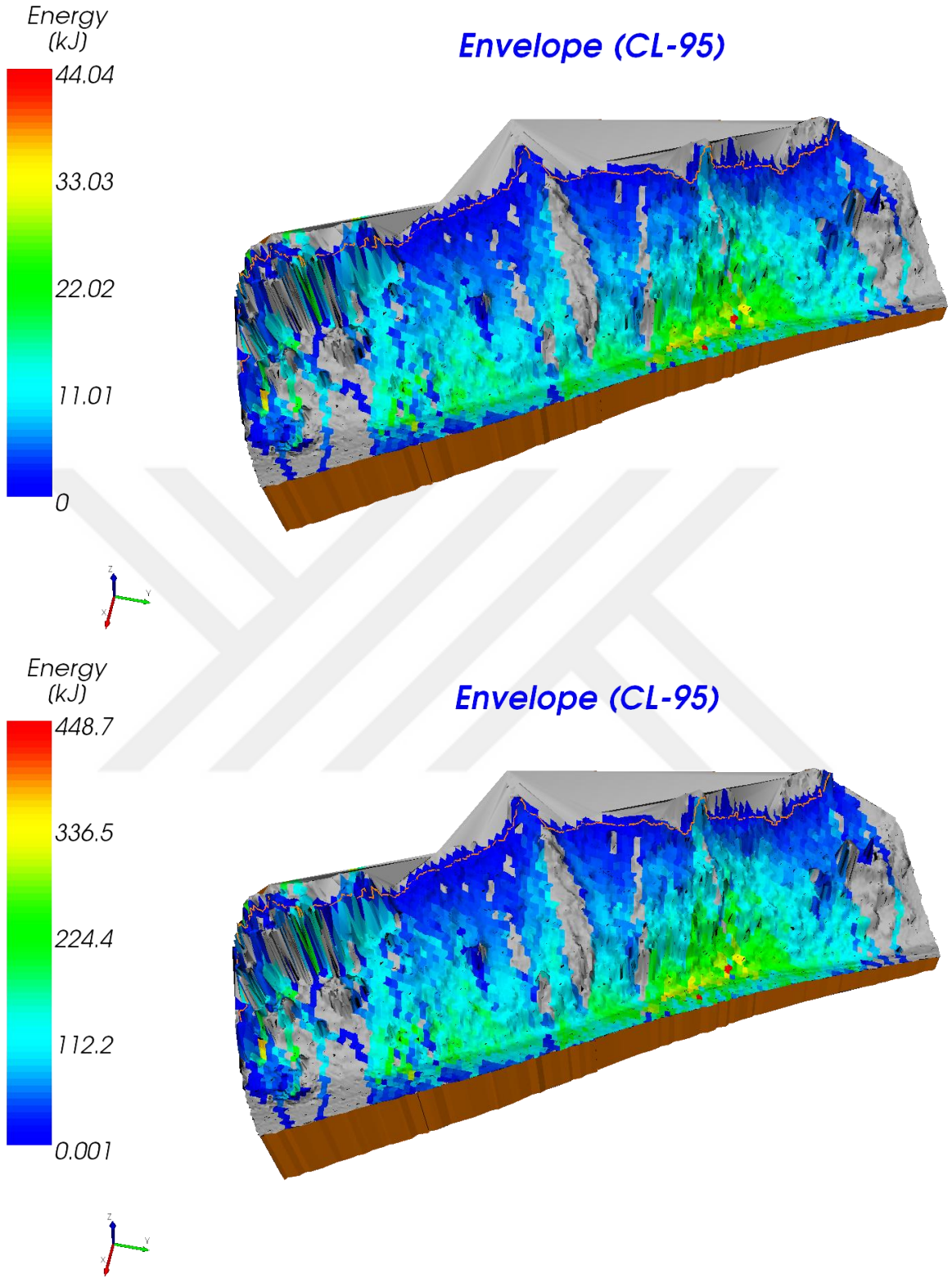
Şekil 48. RocPro3D yazılımında oluşturulan nokta bulutu (üst şekil) ve düzensiz üçgen ağı (alt şekil)



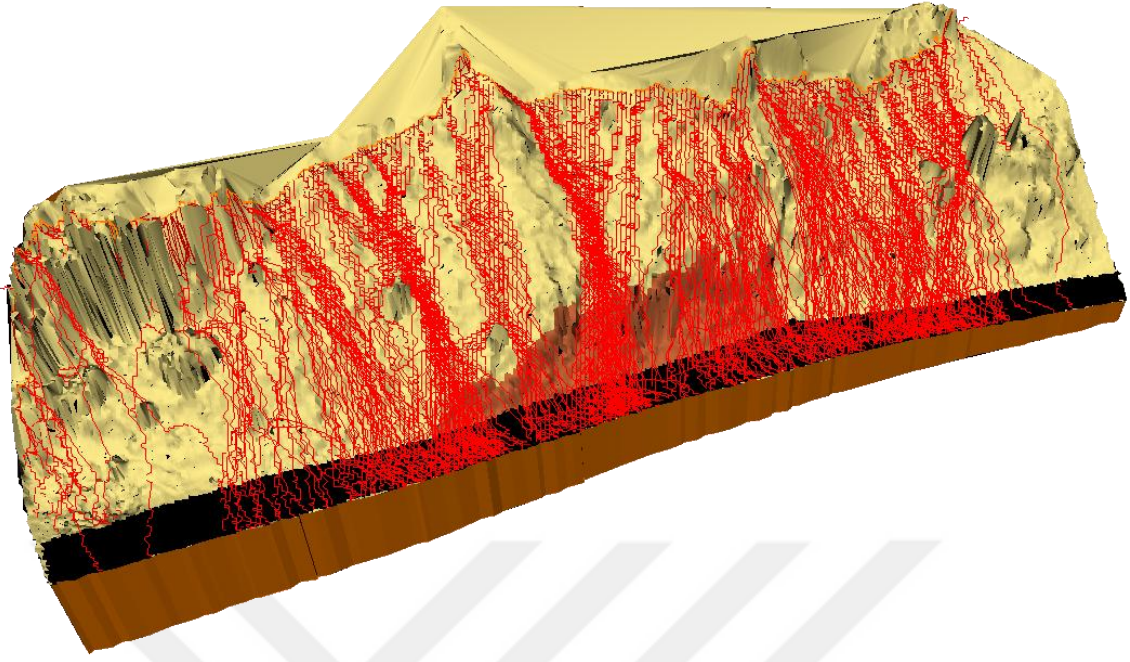
Şekil 49. RocPro3D yazılımında oluşturulan 3 boyutlu katı model (üstte), eğim derecesi (altta) modelleri



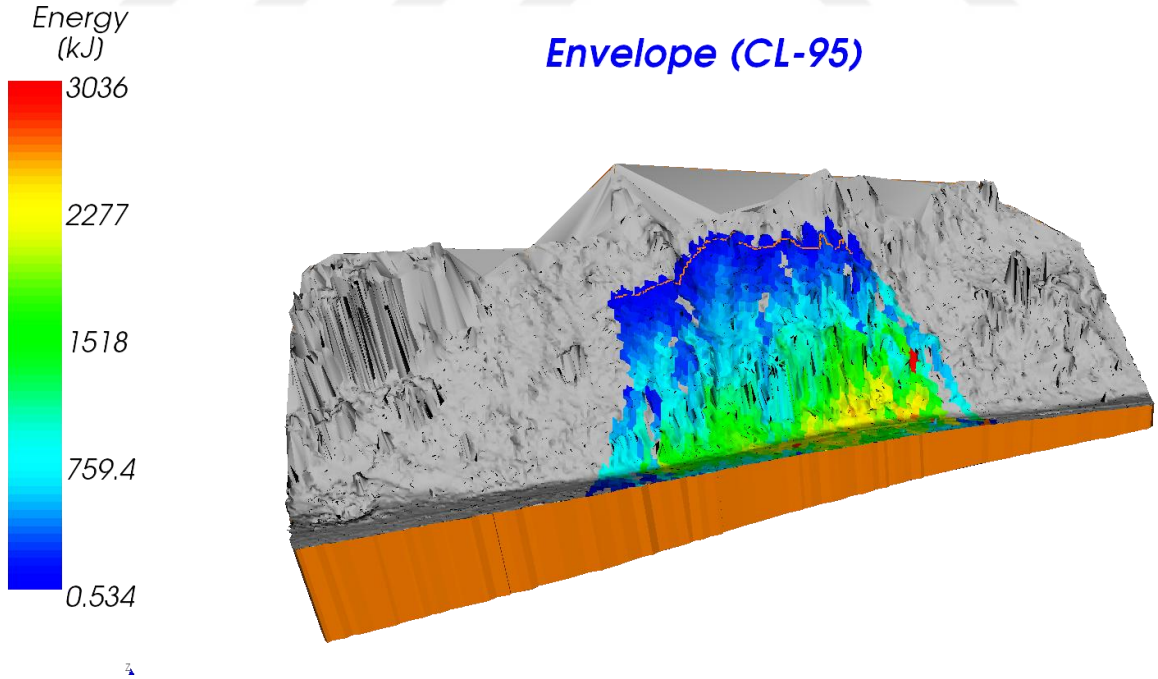
Şekil 50. RocPro3D yazılımında oluşturulan eğim yönü (sol alt) ve yükseklik (sağ alt) modelleri



Şekil 51. Karayolu şevi üzerinden 100 kg (üst şekil) ve 1 ton (alt şekil) kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri



Şekil 52. Karayolu şevi üzerinden 1 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumunda blokların izleyeceği yolun modellenmesi



Şekil 53. Karayolu şevi üzerinden 5 ton kütleye sahip kaya bloklarının düşmesi/yuvarlanması durumu için hesaplanan enerji değerleri

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında Trabzon ili Araklı ilçesi Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerinde bulunan 3 farklı kaya şevinin kaya düşme potansiyeli değerlendirilmiş ve RocPro3D yazılımı kullanılarak 3 boyutlu kaya düşme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışılan şevlerde yüzeylenme veren kaya kütlelerine ait süreksizlik ve dayanım özellikleri saha çalışmaları ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş, İHA ile yapılan fotogrametrik ölçümlerle şevlerin 3 boyutlu katı modelleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılmış ve farklı boyut ve şekillerdeki blokların şev üzerinde izleyeceği yollar ve düşme enerjileri hesaplanmıştır.

29-26 KK No'lu Trabzon-Gümüşhane İl Sınırı Salmankaş Geçidi İl Yolu Km: 15+400-15+700 arasında yer alan Şev-1'in bulunduğu lokasyonda Üst Kretase – Paleosen yaşlı Kaçkar Granitoidine ait kayaçların yüzeylenme verdiği belirlenmiştir. Riskli bölgede (i) farklı litolojik özellikler (kırıklı çatlaklı ayrışma kaya kütlesi ile birkaç süreksizlikle bölünmüş ayrışma derecesi düşük kaya kütlesi gibi) (ii) topografik özellikler (yamaç/şev yüksekliği, doğrultusu ve eğimi), (iii) bitki örtüsünün varlığı (orman veya seyrek çalılık) (iv) kütle hareketinin potansiyel etkisi dikkate alınarak şev “JB-1: çok kırıklı ayrışmış granitler” ve “JB-2: ileri derecede ayrışmış-kısmen arenalaşmış- granitler” olarak 2 farklı bölgeye ayrılmıştır. Saroglou (vd. 2012) sınıflamasına göre kaya düşme riski ağırlıklı puanı 57,25 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Şev-1'in “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğunu göstermektedir. Kinematik analizler 280/85 ve 110/85 duruşlu kaya şevlerinde kayma ve devrilme riski olduğunu göstermiştir. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde 1000'er ayrı noktadan ayrı ayrı 1 tonluk ve 100 kg'lık bloklar düşürülmüş ve toplam 2000 blok hareketi simüle edilmiştir. Blok boyutları arazi çalışmaları ve ortofotolardan elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir. 3 boyutlu analizler sonucunda 100 kg'lık blokların düşmesi sonrasında enerjinin 150 kJ'a, 1 tonluk bloğun düşmesi sonrasında ise 300 kJ'a ulaşacağı görülmektedir. Blokların çoğunun karayolunu aşacak şekilde yol izleyeceği belirlenmiştir.

61-26 KK No'lu Araklı-Dağbaşı (Trabzon-Gümüşhane) İl Yolu Km: 52+820-52+900 arasında yer alan Şev-2'nin bulunduğu alanda yine Üst Kretase-Paleosen yaşlı Kaçkar Granitoidine ait kayaçların yüzeylenme verdiği belirlenmiş ve şev “JB-3: kırıklı ayrışmış granitler” olarak tek bir jeoteknik birim altında incelenmiştir. Saroglou (vd. 2012)

sınıflamasına göre Şev-2 için kaya düşme riski puanı 55,45 olarak belirlenmiştir. Bu değer şevin “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğunu göstermektedir. Yapılan kinematik analizlere göre 25/85 duruşlu kaya şevde kayma ve devrilme riski olduğu belirlenmiştir. 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde 1000’er ayrı noktadan ayrı ayrı 1 tonluk ve 100 kg’lık bloklar düşürülmüş ve toplam 2000 blok hareketi simüle edilmiş; 100 kg’lık blokların düşmesi sonrasında enerjinin 50 kJ’a, 1 tonluk bloğun düşmesi sonrasında ise 560 kJ’a ulaşacağı hesaplanmıştır. Düşen blokların büyük çoğunluğunun karayolunu tamamen kat ederek aşacağı belirlenmiştir.

61-26 KK No’lu Araklı-Dağbaşı (Trabzon-Gümüşhane) İl Yolu Km: 40+950-41+000 arasında yer alan Şev-3’ün bulunduğu alanda volkaniklerden oluşan Üst Kretase yaşlı Çağlayan Formasyonu ayırt edilmiş ve şev “JB-4: çok kırıklı ayrıışmış volkanikler” ve “JB-5: bloklu yamaç molozu” olmak üzere iki farklı jeoteknik birim altında incelenmiştir. Saroglou (vd. 2012) sınıflamasına göre Şev-3 için kaya düşme riski puanı 54,85 olarak belirlenmiştir. Bu değer Şev-3’ün “orta riskli yamaç (risk sınıfı III)” sınıfında olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen kinematik analizler sonucunda 55/80 duruşlu şevde kama tipi kayma riski olduğu belirlenmiştir. 3 boyutlu kaya düşme analizlerinde 1000’er ayrı noktadan ayrı ayrı 1 tonluk ve 100 kg’lık bloklar düşürülmüş ve toplam 2000 blok hareketi simüle edilmiştir. Analizler sonucunda 100 kg’lık blokların düşmesi sonrasında enerjinin 45 kJ’a, 1 tonluk bloğun düşmesi sonrasında ise 450 kJ’a ulaşacağı hesaplanmıştır. Düşen blokların çoğunun karayolunu kat edeceği belirlenmiştir.

Elde edilen veriler ve yapılan 3 boyutlu kaya düşme analizleri sonucunda çalışılan karayolu şevlerinde kaya düşme riskinin bulunduğu ve olası bir kaya düşmesi olayında düşecek blokların karayolunu aşacağı ortaya konulmuştur. Bu nedenle ilgili şevlerde yüzey temizliği yapılması ve çelik ağ ve/veya yüksek kapasiteli halka ağ gibi kaya düşme ıslah yöntemlerinin uygulanarak şevlerin güvenli hale getirilmesi önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- AFAD. (2018). *Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri*. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- AFAD. (2024). *2023 Yılı Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri Raporu*. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Arslan, M., Aslan, Z. (2006). Mineralogy, Petrography and Whole-Rock Geochemistry of The Tertiary Granitic Intrusions in The Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27,2, 177-193.
- Barton, N., Bandis, S. (1982). Effect of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock. *Issue in Rock Mechanic, 23 rd U.S. Symposium on Rock Mechanic*, s. 739-760 California.
- Barton, N., Bandis, S. (1990). *Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model In Engineering Practice*. Rotterdam: Norwegian Geotechnical Institute.
- Bektaş, O., Şen, C., Atıcı, Y., Köprübaşı, N. (1999). Migration Of The Upper Cretaceous Subduction-Related Volcanism Towards The Back-Arc Basin Of The Eastern Pontide Magmatic Arc (NE Turkey). *Geological Journal*, 34, 95-106.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley.
- Brown, E. T. (1970). Strength of models of rock with intermittent joints. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(6), 1935-1949.
- EM-DAT. (2024). *2023 Disasters in Numbers: A Significant Year of Disaster Impact*. Brüksel: UCLouvain.
- Ersoy, H. (2007). *Trabzon İli Katı Atıkları İçin Düzenli Depolama Yeri Seçimi ve Önerilen Düzyurt Düzenli Depolama Alanının Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Eyuboglu, Y., Bektas, O., Pul, D. (2007). Mid-Cretaceous olistostromal ophiolitic melange developed in the back-arc basin of the eastern Pontide magmatic arc, northeast Turkey. *International Geology Review*, 49(12), 1103-1126.
- Eyuboglu, Y., Chung, S. L., Santosh, M., Dudas, F. O., Akaryalı, E. (2011). Transition from shoshonitic to adakitic magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: implications for slab window melting. *Gondwana Research*, 19(2), 413-429.

- Goodman, R. E., Bray, J. W. (1976). Toppling of rock slopes. *ASCE Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, Vol. 2*, s. 201–234. Colorado.
- Güven, İ. H. (1993). *Doğu Pontidlerin Jeolojisi ve 1/250000 Ölçekli Kompilasyonu*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- 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. ve Brown, E.T., (1980a). Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy. Londra: Stephen Austin and Sons.
- Hoek, E., Brown, E. T. (1980b). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *ASCE Journal of The Geotechnical Engineering Division*, 106 (GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Karzulovic, A. (2000). *Rock Mass Properties for Surface Mines*. Colorado: Society For Mining, Metallurgical and Exploration.
- Hoek, E. (1968). *Brittle Failure of Rock, In Rock Mechanics in Engineering Practice*. Londra: John Wiley & Sons Ltd.
- Hoek, E. (1994). Strength of Rock and Rock Masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E. (2000). *Practical Rock Engineering*. Canada: Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion, 2002 Edition. *Proc. 5th North American Rock Mechanics Symposium*, s. 267-273. Toronto.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Rotterdam: Balkema.
- 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 Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57 (2), 151-160.
- Hoek, E., Wood, D., Shah, S. (1992). A Modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses. *ISRM Symposium: Eurock'92-Rock Characterization*, s. 209-213. Chester.
- IAEG (International Association of Engineering Geology). (1979). *Engineering Geological Mapping for Planning, Design and Construction in Civil Engineering*. İngiltere: IAEG.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (1981). *ISRM Suggested Methods: Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. Oxford: Pergamon Press.

- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*. Ankara: Kazan Offset Press.
- Jaeger, J.C. (1970). The Behaviour of Closely Jointed Rock. *Proc. 11th Symp. Rock. Mech.* Berkeley: ARMA.
- Marsal, R. J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(2), 27-43.
- Kara, R. (1998). *Maçka-Zigana Dağı (Trabzon) Arasındaki Üst Kretase Yaşlı Volkaniklastik Kayaçların Sedimentolojik ve Organik Jeokimyasal Özellikleri*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kincal, C., Koca, M. Y. (2009). A proposed method for drawing the great circle representing dip angle and strike changes. *Environmental & Engineering Geoscience*, 15(3), 145-165.
- Okay, A. I. (2008). Geology of Turkey: a synopsis. *Anschnitt*, 21, 19-42.
- Özyurt, M. (2019). *Gümüşhane (Kd Türkiye) Yöresinde Yüzeylenen Üst Jura-Alt Kretase Platform Karbonatlarındaki (Berdiga Formasyonu) Dolomitleşmenin Kökeni*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Palmström, A. (1995). RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, Doktora Tezi, Norveç.
- Pelin, S. (1977). *Alucra (Giresun) Güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından jeolojik incelemesi*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayını.
- 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. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(6), 1823-1836.
- 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), 743-760.
- Sönmez, H., Ulusay. R. (2002). A discussion On The Hoek Brown Failure Criterion and Suggested Modification to The Criterion Verified by Slope Stability Case Studies, *Yerbilimleri*, 26, 77-9
- Taşlı, K. (1984). Hamsiköy (Trabzon) Yöresinin Jeolojisi. *Karadeniz Üniversitesi Dergisi*, 3,1-2, 69-76.

- Türk, E. (2009). *Geç Kretase Yaşlı Çatak Formasyonu (Maçka, Trabzon) Çeşmeler Üyesinin Foraminifer Faunası ve Biyostratigrafisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Uğuz, M. F. (2011). *Doğu Karadeniz Bölgesinin Jeolojisi Raporu (Bayburt-Gümüşhane-Trabzon)*. Ankara: MTA Jeoloji Etütleri Dairesi.
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2022). *Global assessment report on disaster risk reduction 2022: Our world at risk: Transforming governance for a resilient future*. Cenevre: Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi.
- URL-1. (2025, Şubat 04). 2020-2024 Stratejik Plan:
<https://kurumsal.trabzon.bel.tr/Upload/BaglantiFotolar/303edfef-b888-4018-a5d9-34751483301b/20220822034918IHSLP.pdf> adresinden alınmıştır.
- Yücel, C. (2013). *Trabzon-Giresun Arasındaki Tersiyer Volkanitlerinin Petrografisi, 40Ar-39Ar Jeokronolojisi, Petrokimyası, Sr-Nd-Pb İzotop Jeokimyası ve Petrolojisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Çorum Atatürk Lisesi'nde tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda İngilizce eğitimi aldı. 2011 yılının haziran ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı ancak sağlık sorunları nedeniyle eğitime ara vermek zorunda kaldıysa da 2022 yılının eylül ayında eğitime tekrar başladı.

