

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALTINDERE VADİSİ (MAÇKA-TRABZON) BOYUNCA GÖZLENEN KAYA ŞEVLERİNDEKİ  
KAYA DÜŞME POTANSİYELİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN 2 VE 3 BOYUTLU BENZETİM  
MODELLER'İLE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ehsan ALİZADEH**

**MAYIS 2021  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALTINDERE VADİSİ (MAÇKA-TRABZON) BOYUNCA GÖZLENEN KAYA  
ŞEVLERİNDEKİ KAYA DÜŞME POTANSİYELİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN 2 VE 3  
BOYUTLU BENZETİM MODELLER'İLE İNCELENMESİ**

**Ehsan ALİZADEH**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 / 05 /2021**

**Tezin Savunma Tarihi : 27 / 05 /2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aykut AKGÜN**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Bu vesileyle, bu tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasında etkili olan kişilere şükranlarımı sunarım. Değerli danışmanım Prof. Dr. Aykut AKGÜN'e her zaman verdiği destek, yön, tavsiyeler ve yardımları için canı gönülden teşekkür ederim.

Prof. Dr. Fikri BULUT ve Doç. Dr. Ayberk KAYA Tez İzleme Komitesi üyelerine, şükranlarımı sunarım.

Değerli arkadaşım Dr. Ali ARYANFAR'a tezi tamamlama süreci boyunca katkıları ve destekleri için ayrıca teşekkür ederim.

Bu süreçte benden yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Kübra TEZEL'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep arkamda duran en değerli varlıklarım canım aileme sonsuz emekleri, sevgileri ve destekleri için çok teşekkür ederim.

Ehsan ALİZADEH  
Trabzon, 2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Altındere vadisi boyunca gözlenen kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyelinin çevresel etkilerinin 2 ve 3 boyutlu benzetim modelleri’ile incelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut AKGÜN’ün sorumluluğunda tamamladığımı, modelleri kendimizin ürettiğimizi, analizleri kendimizin yaptığımızı, diğer kaynaklardan almış olduğum bilgileri metinde ve kaynaklar kısmında eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süreci boyunca bilimsel araştırma ve etik kurallara uyumlu davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/05/2021

Ehsan ALİZADEH

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ .....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş ve Amaç .....	1
1.2. Kaya Düşme Tanımlaması ve Terminolojisi .....	3
1.3. Kaya Düşme Tehlikesi .....	4
1.4. Kaya Düşmesi Duyarlılık Tanımlaması ve Terminolojisi .....	4
1.5. Kaya Düşme Riski .....	5
1.6. Duyarlılık ve Kaya Kütlesinin Jeolojik Özellikleri .....	5
1.7. Ayrışma .....	7
1.8. Kaya Düşmesine İnsan ve Hayvan Etkileri .....	7
1.9. Kaya Düşmelerinde Sismik Etkiler .....	8
1.10. Literatür Araştırması .....	8
1.10.1. Trajectory (Kaya Düşmesi Yörüngesi).....	8
1.10.2. Kaya Düşmesi Modellemesi .....	9
1.10.3. Kaya Düşmesi Tehlikesini Hafifletme .....	10
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	11
2.1. Çalışma Alanı .....	11
2.2. Jeolojik Yapı .....	13
2.2.1. Çatak Formasyonu .....	13
2.2.2. Berdiga Formasyonu .....	14
2.2.3. Hamurkesen Formasyonu .....	14
2.2.4. Kaçkar Granitoidleri .....	15

2.2.5.	Jeoloji .....	15
2.3.	Duyarlılık Çalışmaları .....	16
2.3.1.	Duyarlılık Çalışmasında Kullanılması Gereken Verilerin Elde Edilmesi .....	16
2.3.2.	Yapısal Kırıklık Durumunu İncelemesi .....	19
2.3.3.	Lojistik Regresyon .....	23
2.3.3.1.	Lojistik Regresyon Sonuçları .....	32
2.3.3.2.	Doğrulama (ROC eğrisi) .....	32
2.3.4.	Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) .....	34
2.3.4.1.	Kaya Düşmesi Duyarlılık Haritası ve Doğrulama .....	36
2.4.	Uzaktan Algılama ve Yersel Lazer Tarama (Fotogrametri).....	38
2.4.1.	Çözünürlük .....	41
2.4.2.	Konumlandırma ve Birleştirme .....	41
2.4.3.	3 Boyutlu Modellerin Üretilmesi (CloudCompare).....	42
2.4.4.	Çalışma Alanlarının Yersel Lazer Taraması .....	43
2.4.5.	Modellerin Boyutlarının Düşürülmesi .....	44
2.5.	Süreksizlik İncelemeleri (DSE) .....	46
2.5.1.	Süreksizlik Seti Çıkarıcısı (DSE) .....	47
2.5.2.	Süreksizlik Takımların Belirlenmesi .....	48
2.6.	Kinematik Analizi .....	61
2.6.1.	Düzlemsel Yenilme .....	63
2.6.2.	Kama Tipi Yenilme .....	63
2.6.3.	Devrilme .....	63
2.6.4.	Kinematik Analizi Sonuçları .....	77
2.7.	RMR Kaya Kütle Sınıflandırması (Rock Mass Rating).....	78
2.7.1.	Kayaç Malzemesinin Dayanımı .....	80
2.7.1.1.	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi .....	80
2.7.1.2.	Yöntem .....	80
2.7.2.	Kaya Kalitesi Tanımı (RQD).....	82
2.7.3.	Süreksizlik Ara Uzaklığı .....	83
2.7.4.	Süreksizlik Devamlılığı .....	84
2.7.5.	Süreksizlik Pürüzlülüğü ve Dalgahlığı .....	85
2.7.6.	Süreksizlik Açıklığı .....	87
2.7.7.	Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi .....	88

2.7.8.	Süreksizlik Yüzeylerinin Su Durumu .....	90
2.7.9.	RMR Puanlaması .....	90
2.8.	Kaya Düşmesi Modellemesi .....	92
2.8.1	Kaya Düşmelerinde Etkili Olan Eğim Geometrisi .....	93
2.8.2.	Geri Sıçrama Katsayısı .....	94
2.8.3.	2 Boyutlu Modelleme (Rocfall).....	95
2.8.3.1.	Genel Bakış ve Ayrıntılar .....	95
2.8.4.	Rocfall Simülasyonu .....	96
2.8.5.	2 Boyutlu Modelleme Aşaması .....	98
2.8.6.	Coğrafi Bilgi Sistemi Ortamında 3 Boyutlu Kaya Düşmesi Yörüngesi İçin Modelleme Yaklaşımı (Rockfall Analyst) .....	122
2.8.6.1.	3 Boyutlu Modelleme Aşaması .....	122
3.	TARTIŞMA .....	147
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	149
5.	KAYNAKLAR .....	151
6.	EKLER .....	168
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

ALTINDERE VADİSİ (MAÇKA-TRABZON) BOYUNCA GÖZLENEN KAYA  
ŞEVLERİNDEKİ KAYA DÜŞME POTANSİYELİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİNİN 2 VE 3  
BOYUTLU BENZETİM MODELLERİ İLE İNCELENMESİ

Ehsan ALİZADEH

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Aykut AKGÜN  
2021, 167 Sayfa, 5 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasının amacı, 2 ve 3 boyutlu benzetim modellerinden yararlanarak Trabzon ili, Maçka ilçesi sınırları içinde bulunan Altındere vadisi boyunca yer alan kaya şevlerinin kaya düşme potansiyelinin incelenmesidir. Tez kapsamında, ilk olarak kaya düşmesi potansiyeli olan alanlara ait bir duyarlılık değerlendirmesi incelemesi gerçekleştirilmiştir. Yapısal süreksizlik özelliklerinin bilgisayar ortamında sayısal olarak incelenmesine olanak sağlayan yersel lazer tarayıcı yardımıyla fotogrametrik bir yaklaşım kullanılmış ve bu verilerden yararlanarak incelenen kaya şevlerinin kinematik analizi ve kaya kütle sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Kaya düşmesi modellemesi, çevrenin korunması, arazi kullanım planlaması ve karmaşık süreçlere rağmen kaya düşmesi tehlikesinin tahmin edilmesinde etkili bir yöntem olmakla birlikte önlemlerin tasarımında büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu kapsamda, iki boyutlu modelleme yapmaya imkan tanıyan Rocfall yazılımı ve CBS ortamında geliştirilmiş bir üç boyutlu kaya düşmesi simülasyonu yazılımı olan Rockfall Analyst kaya düşmelerinin modellenmesi ve koruma tasarımının desteklenmesi için araç olarak kullanılmıştır. Çalışılan 2 ve 3 boyutlu modellerde, topoğrafya, şev malzemesi sürtünme karakteristikleri, başlangıç hızı büyüklüğü ve yönü ve blok hızındaki geri sıçrama katsayılarına dayanarak kaya bloklarının düşüş yörüngeleri ve ulaştıkları mesafeler konumsal olarak belirlenmiştir. Elde edilen modellerin çıktıları dikkate alınarak kaya düşmesi süreci ile ilgili karar verme ve alınabilecek olası önlemler bu tez çalışması kapsamında irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya düşmesi, CBS, Duyarlılık, 2 ve 3 boyutlu modelleme



PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL EFFECTS OF ROCKFALL POTENTIAL IN  
ROCK SLOPES OBSERVED ALONG ALTINDERE VALLEY (MAÇKA- TRABZON) WITH  
2 AND 3 DIMENSIONAL SIMULATION MODELS

Ehsan ALİZADEH

Karadeniz Technical University  
The Graduated School of Natural and Applied Sciences  
Geological Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Aykut AKGÜN  
2021, 167 Pages, 5 Pages Appendix

The purpose of this thesis is to investigate the rock fall potential of the rock slopes along the Altındere valley within the borders of Trabzon province, Maçka district using 2 and 3 dimensional simulation models. Within the scope of the thesis, first of all, a susceptibility assessment has been carried out for areas with rockfall potential. A photogrammetric approach which enables the structural discontinuity features to be analyzed numerically in a computer environment has been used with the help of a terrestrial laser scanner, and kinematic analysis of the investigated rock slopes and rock mass classification have been performed using these data. Although rockfall modeling is an effective method for environmental protection, land use planning and predicting rockfall hazard despite complex processes, it greatly helps in the design of preventions. In this context, Rocfall software which allows two-dimensional modeling, and Rockfall Analyst, a three-dimensional rockfall simulation software developed in GIS environment, have been used as tools for modeling rockfalls and supporting protection design. In the studied 2 and 3 dimensional models, the fall trajectories of the rock blocks and the distances they reached have been determined positionally based on the topography, slope material friction characteristics, the magnitude and direction of the initial velocity and the rebound coefficients in the block velocity. Considering the outputs of the obtained models, decision making and possible preventions dealing with the rockfall process are examined within the scope of this thesis.

**Keywords:** Rockfall, GIS, Susceptibility, 2 and 3 dimensional modelling

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Eğitim açısına göre kaya düşme şeması .....	3
Şekil 2.	Çalışma alanına ait yer bulduru haritası .....	12
Şekil 3.	Çalışma alanlarından çekilmiş fotoğraflar .....	12
Şekil 4.	Çalışma alanına ait genel jeoloji haritası .....	16
Şekil 5.	Alana ait eşyüksekti eğrileri, SYM, TIN, Eğim, Yönelim ve Eğrisellik .....	18
Şekil 6.	Landsat görüntüsünün 8. Bandı .....	20
Şekil 7.	PCI-Geomatica'nın LINE uygulaması .....	20
Şekil 8.	İnceleme alanına ait kırık hatları haritası .....	21
Şekil 9.	ArcGIS ortamında oluşturulan "Kırık Yoğunluk" haritası .....	22
Şekil 10.	Rockworks ortamında rose diyagram uygulaması .....	23
Şekil 11.	Rockworks ortamında elde edilen gül diyagramı .....	23
Şekil 12.	İdrisi ortamında reclass uygulaması .....	25
Şekil 13.	Yeniden sınıflandırılmış Sayısal Yükseklik Modeli, Eğim, Yönelimi .....	25
Şekil 14.	Çalışma alanındaki yeniden sınıflandırılmış 4 litoloji grubu .....	26
Şekil 15.	Lojistik regresyon uygulaması .....	27
Şekil 16.	Lojistik regresyon uygulamasında kullanılan 1. veri seti .....	27
Şekil 17.	Lojistik regresyon uygulamasında kullanılan 2. veri seti .....	28
Şekil 18.	Veri seti -1 ile elde edilen duyarlılık haritası .....	30
Şekil 19.	Veri seti -2 ile elde edilen duyarlılık haritası .....	31
Şekil 20.	Doğrulama için elde edilmiş ROC eğrisi .....	33
Şekil 21a.	AHP yöntemi ile elde edilen indeks duyarlılık haritası .....	36
Şekil 21b.	AHP yöntemi ile elde edilen kategorik duyarlılık haritası .....	37
Şekil 22.	Doğrulama için elde edilmiş ROC eğrisi .....	38
Şekil 23.	Lazer tarayıcı koordinat sistemi .....	42
Şekil 24.	Çalışma alanlarında kullanılan yersel lazer tarama cihazı .....	43
Şekil 25.	Çalışma lokasyonlarını yersel lazer tarama cihazı kullanarak taranması .....	43

Şekil 26.	1. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. b) 2. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. c) 3. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. d) 4. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. e) 5. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. f) 6. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. g) 7. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. h) 8. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. i) 9. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. j) 10. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. k) 11. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları.....	44
Şekil 27.	a) 1. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. b) 2. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. c) 3. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. d) 4. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. e) 5. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. f) 6. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. g) 7. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. h) 8. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. i) 9. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. j) 10. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. k) 11. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. ....	49
Şekil 28.	a) DSE programından elde edilen 1. alandaki süreksizlik takımları. b) DSE programından elde edilen 2. alandaki süreksizlik takımları. c) DSE programından elde edilen 3. alandaki süreksizlik takımları. d) DSE programından elde edilen 4. alandaki süreksizlik takımları. e) DSE programından elde edilen 5. alandaki süreksizlik takımları. f) DSE programından elde edilen 6. alandaki süreksizlik takımları. g) DSE programından elde edilen 7. alandaki süreksizlik takımları. h) DSE programından elde edilen 8. alandaki süreksizlik takımları. i) DSE programından elde edilen 9. alandaki süreksizlik takımları. j) DSE programından elde edilen 10. alandaki süreksizlik takımları. k) DSE programından elde edilen 11. alandaki süreksizlik takımları. ....	55
Şekil 29.	Cloud Compare programından elde edilen alanlara ait genel eğim ve eğim yönü açısı.....	58
Şekil 30.	Süreksizliklerin yenilmeleri .....	62
Şekil 31.	Arazide uygulanan Tilt testi .....	65
Şekil 32.	a) 1. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 1. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 1. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 1. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	66
Şekil 33.	a) 2. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 2. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 2. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 2. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	67
Şekil 34.	a) 3. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 3. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 3. alan süreksizlik takımları için	

	kama tipi yenilme. d) 3. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	68
Şekil 35.	a) 4. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 4. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 4. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 4. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	69
Şekil 36.	a) 5. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 5. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 5. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 5. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	70
Şekil 37.	a) 6. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 6. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 6. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 6. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	71
Şekil 38.	a) 7. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 7. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 7. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 7. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	72
Şekil 39.	a) 8. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 8. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 8. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 8. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	73
Şekil 40.	a) 9. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 9. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 9. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 9. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	74
Şekil 41.	a) 10. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 10. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 10. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 10. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	75
Şekil 42.	a) 11. Alan süreksizlik takımları için contour. b) 11. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 11. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 11. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme. ....	76
Şekil 43.	a) Kumpas kullanarak düzensiz şekilli kaya örneklerin genişlikleri ve kalınlık ölçümleri. b) Şekilsiz kaya blokların üzerinde uygulanan nokta yükü dayanım indeksi deneyi. ....	81
Şekil 44.	Pürüzlülük tarağı (Profilometre). ....	86
Şekil 45.	Pürüzlülük profilleri ve katsayısı (JRC) değerleri (ISRM,1981). ....	86
Şekil 46.	a) Tek eksenli basınç dayanımı (Mpa), b) Süreksizlik ara uzaklığı puanı, c) RQD parametrelerine ait puanları bulmak için kullanılan grafikler (Bieniawski, 1989). ....	90

Şekil 47.	Eğim profilinin elde edilmesi .....	97
Şekil 48.	Modellemelerde kullanılan üç farklı malzeme .....	97
Şekil 49.	1. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	100
Şekil 50.	2. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	102
Şekil 51.	3. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	104
Şekil 52.	4. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	106
Şekil 53.	5. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	108
Şekil 54.	6. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. ....	110

- Şekil 55. 7. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. .... 112
- Şekil 56. 8. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. .... 114
- Şekil 57. 9. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. .... 116
- Şekil 58. 10. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. .... 118
- Şekil 59. 11. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. .... 120
- Şekil 60. 1. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). .... 125

- Şekil 61. 2. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 127
- Şekil 62. 3. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 129
- Şekil 63. 4. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 131
- Şekil 64. 5. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 133
- Şekil 65. 6. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 135

- Şekil 66. 7. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 137
- Şekil 67. 8. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 139
- Şekil 68. 9. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 141
- Şekil 69. 10. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 143
- Şekil 70. 11. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası). ..... 145



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	Maçka-Meryemana yolu trafik değerleri .....	13
Tablo 2.	Lojistik regresyon 1. veri seti sonuçları .....	28
Tablo 3.	Lojistik regresyon 2. veri seti sonuçları .....	29
Tablo 4.	Veri seti -1 ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları .....	30
Tablo 5.	Veri seti -2 ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları .....	31
Tablo 6.	Lojistik regresyon 2 veri seti sonuçlarının karşılaştırılması .....	32
Tablo 7.	Roc eğrisi sınıflama tablosu .....	34
Tablo 8a.	AHP analizi parametrelerin ağırlık değerleri ve tutarlılık oranı .....	35
Tablo 8b.	AHP analizi parametrelerin ağırlık değerleri ve tutarlılık oranı .....	35
Tablo 9.	AHP yöntemi ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları .....	37
Tablo 10.	Roc eğrisi sınıflama tablosu .....	38
Tablo 11.	Alanlara ait yoğunluğu yüksek olan süreksizlik takımları .....	54
Tablo 12.	Kinematik analizinde kullanılacak parametrelere ait tablo .....	65
Tablo 13.	Çalışma alanlarına ait kinematik analizi sonuçları .....	78
Tablo 14.	Nokta yükü dayanım indeksi deneyi sonuçları .....	81
Tablo 15.	Kayaç kalitesine (RQD' ye) göre sınıflandırması .....	82
Tablo 16.	Kaya kalitesi sınıflandırma sonuçları .....	83
Tablo 17.	ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri .....	84
Tablo 18.	Elde edilen süreksizlik ara uzaklıkları değerleri .....	84
Tablo 19.	ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri .....	85
Tablo 20.	Elde edilen süreksizlik devamlılık değerleri .....	85
Tablo 21.	Elde edilen pürüzlülük değerleri .....	86
Tablo 22.	ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri .....	87
Tablo 23.	Elde edilen süreksizlik açıklığı değerleri .....	87
Tablo 24.	Kaya kütlelerinin bozuşma dereceleri ve tanımlanması (ISRM, 2007) .....	88
Tablo 25.	Süreksizliklerin bozunma dereceleri ile ilgili sınıflama .....	89
Tablo 26.	Elde edilen bozunma derecesi değerleri .....	89
Tablo 27.	RMR puan tablosu (Bieniawski ,1989) .....	91

Tablo 28. Kaya Sınıfları ve Puanları .....	91
Tablo 29. Kaya şevleri için süreksizlik yönelimi düzeltmesi puanları .....	92
Tablo 30. Elde edilen final RMR puanları ve tanımlamaları .....	92
Tablo 31. Malzeme türüne bağlı değişen $R_n$ ve $R_t$ değerleri .....	99
Tablo 32. Malzeme türüne bağlı değişen $R_n$ ve $R_t$ değerleri .....	123



## SEMBOLLER DİZİNİ

CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
RA	: Rockfall Analyst
ESRI	: Çevre Sistemleri Araştırma Enstitüsü
MTA	: Maden Teknik ve Arama
ISO	: Uluslararası Sandart Organizasyonu
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TIN	: Üçgen Düzensiz Ağ
CAD	: Computer Aided Design
DSM	: Sayısal Yüzey Modeli
DTM	: Sayısal Arazi Modeli
AHP	: Analitik Heyerarşi Süreci
LR	: Lojistik Regresyon
ROC	: Alıcı İşletim Özellikleri
TPR	: Doğru Pozitif Oran
FPR	: Yanlış Pozitif Oran
AUC	: Eğri Altındaki Alan
TLS	: Yersel Lazer Tarama
LIDAR	: Lazer Görüntüleme Tespiti ve Değişimi
SAR	: Sentetik Açıklık Radarı
DInSAR	: Diferansiyel Sentetik Açıklık Radarı
DSE	: Süreksizlik Takımı Çıkarıcı
RMR	: Kaya Kütlesi Sınıflandırması
RQD	: Kaya Kalitesi Tanımı
COR	: Geri Sıçrama Katsayısı
CRSP	: Colorado Kaya Düşmesi Simülasyon Programı
RBIM	: Sert Cisim Etki Mekaniği

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş ve Amaç

Kaya düşmesi, diğer tehlikelerle kıyaslandığında doğal olarak yalnızca küçük alanları etkiler. Kaya düşmesi, karayollarında trafik gibi düşük derecede maruz kalma riski taşıyan unsurlar söz konusu olduğunda bile, ölümcül sonuçların önemli bir nedeni olabilmektedir. Genel olarak diğer kütle hareketleri türleriyle karşılaştırıldığında daha küçük kaya hacimli olsa da kaya düşmesi olayları, uzamsal ve zamansal frekansları, kolayca serbest bırakılması ve kinetik enerjiden dolayı binalar, altyapı ve yaşam hatlarında ciddi hasarlara neden olmaktadır. Kaya şevlerinde süreksizliklerle ayrılmış kaya blokları serbest hale geçerek şev eğiminin yüksek olduğu alanlarda sıçrayarak veya şev yüzeyinde yuvarlanarak hareket edecektir. Kaya bloklarının hareketini denetleyen faktörler olarak donma- çözünme, yapay ve doğal sarsıntılar gibi dış etmenler şevin güvenlik sayısını düşürerek kaya bloklarının düşme potansiyelini arttıracaktır. Kaya bloğu düşmeye başladığı andan itibaren litolojiye bağlı olarak farklı enerjilerle aşağıya doğru hareket edecektir. Çarpma etkisiyle çarpma yüzeyi ne kadar yumuşaksa enerjisi sönmümlenir, ancak yüzey ne kadar sertse bu durumda enerji daha fazla artıp ve sıçrama miktarı da o kadar fazla olacaktır. Genel olarak bakıldığında, Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesi sürecinde aşağıdaki hususların değerlendirilmesini gerektirecektir:

- 1) Geçici olasılık (yıllık frekans veya geri dönüş süresi) ve mekansal duyarlılık
- 2) Düşen blokların 3-B yörüngesi ve maksimum menzil bölgesi
- 3) Her konumdaki kaya düşme yoğunluğunun dağılımı

Bu durumu denetleyen, yüzeye dik ve paralel olan ve yüzeyin litolojisiyle değişen  $R_n$  ve  $R_t$  değerleridir. Bu değerleri bulmak için arazide blok yuvarlama deneyi yapılacaktır. Yuvarladıktan sonra yüzeye çarpıp belli bir noktada, şev dibinden enerjisini sıfırlamış olduğu yere kadar (runout bölgesi) kaya bloğunun yapacağı zarardan etkilenebilecek unsurlar (arabalar, insanlar, evler vb.) araştırılacaktır.

Çalışmada, hem yayılma (runout) bölgesini bularak hem de  $R_n$  ve  $R_t$  katsayıları değerlerinden yola çıkarak 2 ve 3 boyutlu modeller elde edip ve bu modelleri karşılaştırdıktan sonra can ve mal kaybının önlenmesi veya minimize edilmesi yönelik

çözümler geliştirilecektir. Bu çalışmada amaç, 2 ve 3 boyutlu benzetim modellerden yararlanarak Altındere boyunca yer alan kaya düşme alanlarının ve kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyeli incelenmesidir. Yerkabuğunun aktif kütle hareketleri alanları, birçok doğal afete neden olmuş ve olmaya devam etmektedir. Bu tez çalışma kapsamında, iki boyutlu modelleme yapmaya imkan tanıyan Rocfall yazılımı ile CBS ortamında geliştirilmiş bir üç boyutlu kaya düşmesi simülasyon modeli olan Rockfall Analyst, yüksek çözünürlüklü sayısal arazi ve sayısal yükseklik modelleri yardımıyla yersel veya bölgesel ölçekli olarak kaya düşmesi tehlikesinin değerlendirilmesi için araç olarak kullanılacaktır. Aynı zamanda kaya düşmelerinin modellenmesi ve koruma tasarımlarının irdelenmesi için üç boyutlu modellerin elde edilmesine olanak tanıyacaktır.

Genellikle kaya düşmesi ile ilgili hep 2 boyutlu analizler yapılmaktadır. Bu çalışmanın amacı 3 boyutlu analizlerin Rockfall Analyst ile modellenmesi ve artı bunların 2 boyutlu bir modelle karşılaştırması artı böyle bir yol güzergahında özellikle Rockfall Analyst gibi bir yazılım yardımıyla bir tehlike sınıflandırması yapılmasının mümkün olabileceğinden dolayı çalışmaya bir özgünlük kazandırmaktadır. Yani çalışmamızda hem tehlike haritası yapma özgünlüğü var hem de 2 farklı 3 boyutlu yazılımı kullanma özgünlüğü var, aynı zamanda bu 3 boyutlu yöntemler ve 2 boyutlu yöntem sonucunda elde edilen verilerin ve modellerin karşılaştırma özgünlüğü var.

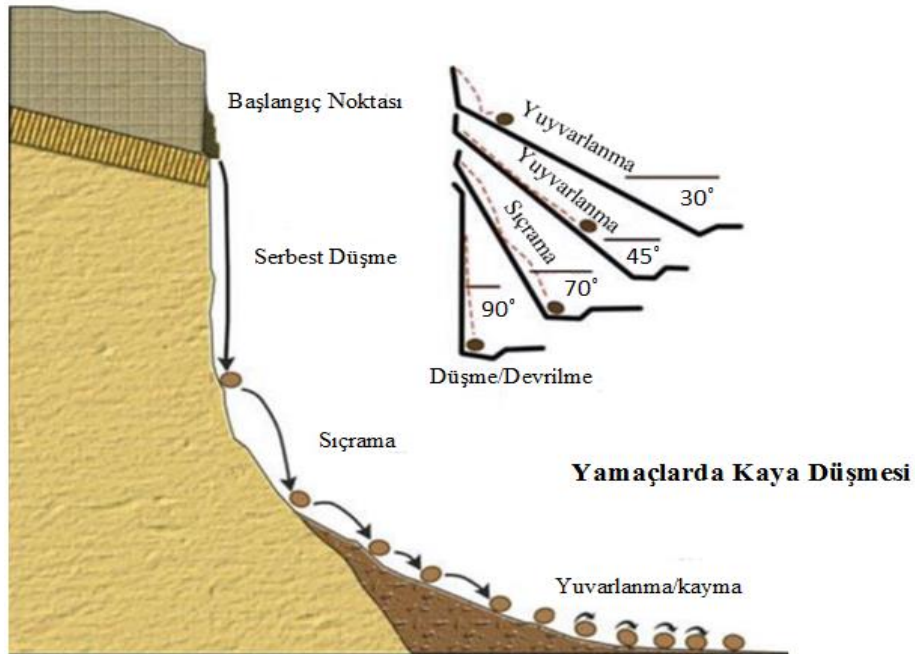
Tez çalışma alanındaki kaya şevlerindeki kaya düşme potansiyeli insan hayatını ve mal kaybını tehdit etmektedir. Bu çerçevede, Altındere vadisi boyunca olası kaya düşme potansiyeli 2 ve 3 boyutlu modeller kullanılarak incelenmiş söz konusu kaya şevlerinin genel mühendislik özellikleri bu kapsamda değerlendirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında genel olarak yapılan çalışmalar şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- 1) Kaya düşmelerine neden olan kaya kütlelerine ait süreksizlik değerlendirmeleri
- 2) Kaya düşmelerinin 2 ve 3 boyutlu simülasyon (Rocfall ve Rockfall Analyst) modelleriyle gerçekleştirilmesi ve bu modellerinin birbiriyle karşılaştırılması
- 3) Yapılan modellemeler ile kaya düşmelerinin yayılma ve ilerleme mesafelerinin belirlenmesi ve risk altındaki elemanların tespit edilmesi
- 4) Risk yönetimi için uygun çözümlerin irdelenmesi

## 1.2. Kaya Düşmesi Tanımlaması ve Terminoloji

Kaya düşmesi terimi, kaya bloklarının bir yamaç boyunca farklı hareketlerini (örneğin kayma, zıplama, yuvarlanma ve serbest düşme gibi) tanımlamak için kullanılmaktadır (Bozzolo ve Pamini, 1986; Varnes, 1978). Kaya düşmesi gerçekleşen alanlardan geçen ulaşım faktörleri için ciddi tehlike oluşturabilir. Kaya düşmelerinde kaya bloklarının büyüklüğü ve enerjisi değişebilir ve eğimli sarp arazilerde bir doğal afet kaynağı sayılmaktadır. Kaya bloklarının büyüklüğü süreksizlik özellikleri ile değişebilir. Şev yüzeyinin eğim açısının  $70^\circ$ 'den fazla olduğunda (Dorren, 2003; Ritchie, 1963) meydana gelen kaya düşmesi, kaya bloklarının ana kayadan koptuğu andan itibaren serbest düşüş dönemine girebilir. Kaynaktaki kaya kütlesi  $70^\circ$ 'den küçük ise, blok büyük olasılıkla eğim aşağı doğru yuvarlanma şeklinde ilerler. Ancak bunlar genellikle nispeten küçük hacimlidir (Hungr vd., 2013) ve eğer  $105 \text{ m}^3$ 'ten küçük ise ve parçalanma düşmesi olarak adlandırılır (Hungr ve Evans, 1988a). Hareket halinde olan parçalar arasındaki etkileşimin ihmal edilebilir olduğu varsayılır ve kayalar bağımsız katı cisimler olarak hareket eder (Hungr ve Evans, 1988a; Hungr vd., 2013).



Şekil 1. (Ritchie, 1963) tarafından hazırlanan (Fanos ve Pradhan, 2018) tarafından değiştirilmiş olan eğim açısına göre kaya düşme şeması

### 1.3. Kaya Düşme Tehlikesi

Kaya düşmesi terminolojisinde, kaya düşmesi tehlikesi, önceden belirlenmiş bir süre zarfında ve belirli bir alan içerisinde belirli bir büyüklük (hacim) veya sıklıkta kaya düşmesi olayının meydana gelme olasılığını ifade eder (Varnes, 1984; Fell, 1994; Fell ve Hartford, 1997; Crosta vd., 2001; Guzzetti vd., 1999). Bu nedenle, en basit kaya düşmesi tehlike haritası, belirli bir alanda önceden tanımlanmış bir büyüklükte kaya düşmelerinin oluşma olasılığını tanımlamalıdır (Crosta ve Agliardi 2003). Bu yüzden, kaya düşmesi tehlikelerinin genellikle üç faktöre bağlı oldukları belirlenmiştir (Jaboyedoff vd., 2001; Volkwein vd., 2011; Crosta ve Agliardi 2003; Jaboyedoff vd., 2005):

- 1) Kaya şev yüzeyinden ayrılma olasılığı: Belirli bir büyüklükte (blok büyüklüğünde) bir kaya düşmesi olasılığı, belirli bir süre boyunca belirli bir kaynak konumunda gerçekleşir. Bu parametre hem mekansal oluşum olasılığını içerir (duyarlılık) ve aynı zamanda yenilme olasılığı olarak da adlandırılan ilgili geçici olasılık, (örneğin, frekans),
- 2) Eğim aşağıya doğru yayılma: yörünge ve düşen blokların maksimum yayılması,
- 3) Kaya düşmesi şiddeti (kinetik enerji).

Bu nedenle, herhangi bir tehlike değerlendirme yöntemi, duyarlılık, sıklık, yayılma ve kayaların düşme yoğunluğunun her yerde ve düşme yolu boyunca göz önüne alınmalıdır.

### 1.4. Kaya Düşmesi Duyarlılık Tanımlaması ve Terminolojisi

Belirli bir alanda belirli bir zaman dilimi içerisinde bir kaya düşmesi olayının meydana gelme olasılığı olan duyarlılık (Brabb, 1984), belirli bir gelecekteki olaydan etkilenecek bir alanın yatkınlığını açıklar ve kaya düşmelerinin meydana gelebileceği yerin tahmin edilmesiyle sonuçlanır (Guzzetti vd., 1999; Guzzetti, 2005, 2006a, b; Rossi vd., 2010; Volkwein vd., 2011). Literatürde potansiyel kaya düşmesi olaylarının yerlerini belirlemek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Duyarlılık şu şekilde değerlendirilebilir:

- Nitel ve doğrudan yöntemler kullanarak jeomorfolojik haritalama (Reichenbach vd., 2005),

- Ampirik ve yarı ampirik derecelendirme sistemleri (Pierson vd., 1990; Cancelli ve Crosta, 1993; Rouiller ve Marro, 1997; Crosta ve Locatelli, 1999; Mazzoccola ve Sciesa, 2000; Budetta, 2004; Fernandez-Hernandez vd., 2012),
- İstatistiksel analizler (Marquinez vd., 2003; Frattini vd., 2008),
- Deterministik yöntemler (Jaboyedoff vd., 2004; Guenther vd., 2004; Derron vd., 2005).

Sonuçta ortaya çıkan duyarlılık haritaları bir eğim veya alanın duyarsızlığa eğilimini göstermektedir (Varnes, 1984; Van Westen vd., 1997; Guzzetti, 2005).

### 1.5. Kaya Düşme Riski

Birkaç kaya düşme tehlikesi değerlendirme yöntemi, tehlike ve risk değerlendirme parametrelerini birleştirir. Bu bağlamda, kaya düşmesi riskinin belirlenmesi ile ilgili birkaç temel kavram sunulmaktadır. Corominas vd. (2014), riski üç temel bileşen ile tanımlamaktadır: tehlike, risk altındaki unsurlar ve tehlikeye maruz kalma.

Kaya düşmesi risk analizi için ortak çerçeve aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Mavrouli, 2011):

1. Tehlike analizi, yoğunluğun analizi, yenilme olasılığı ve potansiyel kaya düşmesi olayının yayılma bölgesi dahil,
2. Risk altındaki unsurların sayısı, değeri ve maruz kalma derecesi dahil olmak üzere tanımlanması,
3. Tehlikeye maruz kalma analizi,
4. Riskin hesaplanması / tahmini.

### 1.6. Duyarlılık ve Kaya Kütlesinin Jeolojik Özellikleri

Yüzeylerde ve şevlerde gözlenen tüm kayaların, tabaka düzlemleri gibi oluşum sırasında veya sonrasında oluşan veya stres kaynaklı kırık, eklem ve fay gibi deformasyon ürünü süreksizlikleri vardır (Wyllie ve Mah, 2004).

Dayanımlı kayalardaki eğimler için stabilite ve kaya düşmesi oluşumu esas olarak süreksizliklerin özellikleri ile ilgilidir (Wyllie ve Mah, 2002).



Kaya düşmesi tehlikeleri, düşme potansiyelinin kaynağı olan eğimin jeolojisi ile açıkça ilgilidir. Başka bir deyişle, kaya düşme sırasında etkilerini koruyacak ve zararsız parçalara bölünmeyecek bir blok oluşturmak için yeterince güçlü olmalıdır. Örneğin, granit, kireçtaşı ve bazalt gibi dayanımı yüksek kayalarındaki eğimler tehlikeli kaya düşmelerine neden olurken, şeyl ve filitler gibi daha zayıf kayalar genellikle tehlikeli olmayacak şekilde küçük parçalara dönüşür. Kaya düşmesi olayını denetleyen bir diğer jeolojik parametre olan süreksizlik ara uzaklığı ve devamlılığı, yakın mesafeli birleşme yerleri, birkaç santimetre boyutlarında küçük kaya blokları oluşturacaktır; bu da sadece yaya yürüyüş yolları ve muhtemelen otomobiller gibi hassas durumlara tehlike oluşturabilir. Buna karşılık, trenler ve güçlü sistemler gibi daha sağlam araçlar yalnızca yaklaşık 1 m'yi aşan boyutlara sahip bloklardan dolayı risk altında olabilir.

Kaya kütlelerindeki süreksizliklerinin türleri, nasıl oluştukları (faylanma, tabakalanma, yapraklanma, birleşme ve yarıma) ile sınıflandırılır ve bir bloğun kırılmasının ne kadar kolay olduğunu belirler (Wyllie ve Mah, 2004).

Bir süreksizlik pürüzlülüğü, yüzeydeki düzensizliklerin şeklini ve eğimini tanımlar. Süreksizliğin kayma direncinin önemli parametrelerindedir, yüzey ne kadar kaba olursa, düzensizliklerin birbirine geçme doğasını aşarak bloğun yerini almak için daha fazla kayma gerilmesi gerekir (Wyllie ve Mah, 2004).

Süreksizlikler, kaya bloğunun boyutunu ve şeklini kontrol ederken, litoloji, yoğunluk ve sertleşme gibi ana kaya kütlelerinin özellikleri (kayaların oluşum veya metamorfizma sırasında sertleştiği işlemler) de blok büyüklüğü üzerinde bir kontrole sahip olacaktır.

Bir şev yüzeyinde bulunan süreksizlik boyunca gözlenen bitişik kaya blokları arasındaki mesafe olarak bilinen açıklık, kaya kütlelerinin hidrolik iletkenliğini etkileyen önemli bir parametredir. Bir kaya kütlelerine su girişi, iletkenlik tarafından belirlenen çıkış hızını aşarsa, o zaman su birikir ve ortalama efektif kayma mukavemetinde bir azalma ile şev yenilmesine neden olabilecek kayma mukavemeti artar. Geniş açıklık genellikle ayrışmanın sonucudur. Bunun sebebi, kaya çatlaklarının içine suyun sızması ve kaya malzemesinin erimesi ve parçalanmasıdır.

## 1.7. Ayrışma

Kaya düşmesi olayını başlatmak için kayaların yamaç yüzeyinden kopması gerekir. Tipik olarak, kayanın tutulma şeklini değiştiren bazı fiziksel veya çevresel olaylardır (Wyllie, 2007). İnsan kaynaklı tetikleyiciler arasında ormanların yok edilmesi, şev morfolojisini değiştiren toprak işleri, makine ve patlamalardan kaynaklanan titreşimler (Dorren, 2003) ve bunları yanal olarak kaynaklarından çıkarmaları yer almaktadır (Khajavi vd., 2012). Bu genellikle dağlık bölgelerde, dik kaya yamaçları ve topografik amplifikasyonun varlığı (zemin ivmelerinin eğimlerin üst kısımlarında yükseltildiği bir işlem (Khajavi vd., 2012) nedeniyle ortaya çıkar.

Ayrışma en sık yerinde ana kayadan kaynaklanır, ancak toprağa gömülmüş izole edilmiş kayalar veya yamaç molozu örtüsü yeniden taşınabilir olduğunda da oluşabilir (Dorren, 2003). Parçalanma ayrıca sağlam bloktan çok daha farklı giden yörüngelere sahip parçalar yaratma potansiyeline sahiptir (Giacomini vd., 2009). Bir bloğun içine girdiği parçaların sayısının, enerjiyi etkilemekten çok, çarpma açısının bir işlevi olduğu görülmüştür, böylece düşük açılardaki (yataydan) etki, yüksek açılardan daha az parça üretir (Giacomini vd., 2009).

## 1.8. Kaya Düşmesinde İnsan ve Hayvan Etkileri

Kazılan yamaçlarda kaya düşmelerinin en yaygın nedeni, aşırı patlama kuvvetlerinin sağlam kayaları kopardığı, blokları yerinden çıkardığı ve yüzdeki açık çatlakların neden olduğu patlama hasarıdır. Kaya çatlakları içerisinde suyun bulunması ve mevsim değişimiyle (değişen hava sıcaklığı nedeniyle) donma-çözünme gerçekleştiğinde kaya bloklarında genleşme meydana gelmektedir. Ek olarak, açık çatlaklar, ağaç köklerinin büyümesini ve çatlakların daha da açılmasını kolaylaştırır.

Tarım, sanayi ve inşaat alanlarının sürekli genişlemesi, karayolları ve demiryolları gibi altyapıların sürekli genişlemesi insan eylemiyle dengesizleşen yeni alanlar yaratıyor, örneğin: Ormansızlaşma, İnşaat faaliyetleri, Yol ve tren ağlarının genişletilmesi, İklim değişikliği (Beek vd., 2008).

## 1.9. Kaya Düşmelerinde Sismik Etkiler

Yer hareketlerinin sonucu olarak kaya düşmesi, dağlık arazideki depremler sırasında sık görülen bir durumdur. Olaylar, tek kayalıkların düşmesinden, geniş alanlardaki çoklu düşmelere ve toprak kaymalarına kadar değişebilir. Kobayashi vd., (1990), 1980 yılında Kaliforniya'daki Mammoth Lakes'deki 6.0 büyüklüğündeki deprem sonucu, dik bir kaya yüzündeki kaynaktan 421 m (1.380 fit) yatay bir mesafede ilerleyen, 19.000 kg (42.000 lb) kütleli bir bloku açıklamaktadır.

Keefe (1992), depremler sırasında stabilite üzerinde en büyük etkiye sahip olan beş eğim parametresinin eğim açısı, ayrışma, sertleşme, süreksizlik özellikleri ve suyun varlığı olduğunu bulmuştur.

Bir yamacın tepesinde bir kayanın hareketi başlatıldıktan sonra, düşme davranışı, eğim geometrisi, eğim özellikleri ve kaya özellikleri ile kontrol edilir.

## 1.10. Literatür Araştırması

### 1.10.1. Trajectory (Kaya Düşmesi Yörüngesi)

Kaya düşmesi, nispeten küçük hacimdeki kayaların hızla eğim aşağı yuvarlandığı bir doğal olaydır. Bir kaya düşmesini bir kaya kaymasından ve bir kaya çığından farklı kılan şey, parçaların bağımsız hareketleridir (Hungry ve Evans, 1988). Sayısal simülasyonlar, deneysel gözlemlere (Jaboyedoff ve Labiouse, 2011) dayalı olarak kaya düşmelerinin yayılma bölgelerini veya Newton mekaniğini kullanarak tek tek kayaların yörüngelerini tahmin eder (Örneğin, "Olasılıklı modellemenin gözden geçirilmesi"). Kaya bloklarının izlediği yolun modellenmesi olan yörünge simülasyonu kaya düşmesi olayının fizikini gösterme avantajına sahiptir ve bu simülasyonun uygulama aşamasında alınabilecek önlemlerin geliştirilmesinde özel olarak hareketli kaya bloklarının önemli parametrelerinden olan kinematik enerji ve sıçrama yüksekliğini tahmin edebilme becerisi sebebiyle de öne çıkmaktadır (Agliardi vd., 2009; Pantelidis ve Kokkalis, 2011; Bourrier vd., 2015).

Farklı kategorilere ayrılabilen kaya bloklarının izlediği yol (yörüngeler) aşağıda getirilmiştir:

- 1) 2 ve 3 boyutlu sayısal arazi modelleri ile gösterilebilen eğim topoğrafyası
- 2) Toplu kütle/katı cisim yöntemleri ve hibrit yöntem (hem toplu kütle hem de katı cisim) kullanarak bir kaya düşmesinin kinematığının modellenmesi.
- 3) Kaya bloklarının izlediği yolu deterministik/olasılıksal bir yaklaşım ile simüle edilmesi.

Uygulamada, kaya düşmesi modellemede yer alan belirsizlikler ve hesaplama verimliliği dikkate alındığında, basitleştirilmiş algoritmalar kullanılarak olasılıklı modelleme genellikle uygulanabilir (Turner ve Duffy, 2012).

Serbest düşüşün dinamikleri açıktır ve havanın etkisi göz ardı edilirse oldukça yüksek hassasiyete sahip analitik modellerle tahmin edilebilir. Kaya bloklarının eğim yüzeyinde kayması, çarpması, geri sıçraması ve yuvarlanmasını içeren kaya-eğim etkileşimi oldukça karmaşıktır. Kayanın etkisini ve geri tepmesini örnek olarak alırsak, bu süreçteki etkileşim kuvvetlerinin zaman fonksiyonları son derece karmaşıktır ve muhtemelen hiçbir zaman kesin olarak belirlenemeyecektir.

### **1.10.2. Kaya Düşmesi Modellemesi**

Yıllar boyunca 2 boyutlu modelleme, kaya düşmesi problemlerini modellemek için en son teknoloji olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşımlarda saha araştırmasına odaklanmak çok önemli olmakla birlikte modelleme için doğru eğim profilinin seçimi, maksimum kaya düşme enerjilerinin ve sıçrama yüksekliklerinin tanımlanmasında belirleyicidir. Kaya ve şev arasındaki temasları ve etkileşimleri temsil eden zemin koşulları seçilmelidir. Geçmişte 3 boyutlu simülasyon modelleri inceleme çalışmalarında kullanılmıştır, ama günümüzde araştırmalar yanı sıra ticari çalışmaları için de kullanılmıştır.

Kaya düşmesi süreçlerinin belirlenmesi, karmaşıklıkları ve stokastik yapıları nedeniyle zorlaşmaktadır (Frattini vd., 2012).

Kaya düşmelerinin yayılma bölgelerini belirlemek için farklı yöntemler mevcuttur ve genellikle üç yöntem olarak ayrılabilir: 1) Ampirik tabanlı yöntemler kullanılarak elde edilen modeller 2) Süreç tabanlı yöntemler kullanılarak elde edilen modeller ve 3) CBS tabanlı yöntemler kullanılarak elde edilen modeller (Dorren, 2003). (Volkwein vd., 2011) toplu kütle yaklaşımı (kayanın tek boyutsuz bir nokta gibi hesaplandığı yer), katı cisim yaklaşımı (kaya şeklinin hareket hesaplamasına dahil olduğu yer) ve hibrit yaklaşımı

(Serbest düşüş, topaklanmış kütle nesnelere kullanılarak simüle edildiğinde ve çarpma, geri tepme ve yuvarlanma simüle edilirken sert gövde mekaniği kullanılır) arasında ayırım yapmıştır.

### **1.10.3. Kaya Düşmesi Tehlikesini Hafifletme**

Kaya düşme tehlikesi geniş ölçüde kategorize edilen aktif ve pasif tekniklerle azaltılabilir. Aktif önlemler kayayı stabilize etmeyi amaçlayan önlemlerdir. Pasif önlemler, halihazırda müstakil blokları durdurmayı veya engellemeyi hedefleyen önlemlerdir. Aktif azaltma önlemleri arasında, arızayı engellemek için püskürtme beton, kafes veya cıvata kullanımı, su basıncı oluşumunu önlemek için drenajı arttırmak ve dengesiz blokları kaldırmak bulunur (Domaas ve Grimstad, 2014).

Mevcut alan sınırlıysa, alt tabakaya sabitlenmiş bir beton duvar veya gabion bir duvar (kayalarla dolu çelik ağ) tercih edilebilir (Domaas ve Grimstad, 2014). Daha fazla alan varsa ve arazi yeterince yumuşaksa, bentler yerel sedimanlar tarafından inşa edilebilir (Domaas ve Grimstad, 2014). Bu yapılar stabiliteyi bozduğundan, 34 dereceden daha dik olamazlar, bu yüzden yüksekliğinin, yanlarını yuvarlama kabiliyeti dikkate alınarak ölçeklendirilmesi gerekir (Domaas ve Grimstad, 2014). Arazi dik ve / veya engebeli ise Kaya düşmesi tutucu çitler, ağ ve deformasyon elemanlarının deformasyonu ile darbeyi emen tel ağ yapıları tercih edilebilir (Domaas ve Grimstad, 2014).

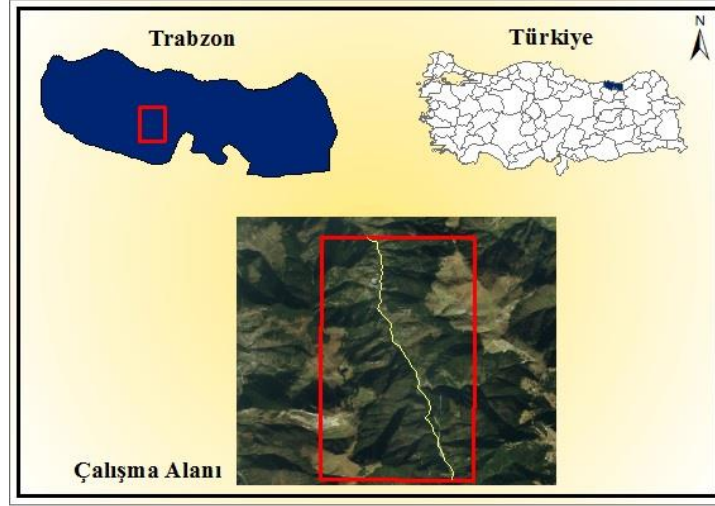
Altındere vadisi boyunca gözlenen kaya düşmesi potansiyelli alanların tehlike değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında izlenen adımlar dört aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik analizler ve laboratuvar çalışmaları kaya düşmesi analizlerinin temel girdilerinin elde edilmesi için gereklidir. Kaya düşmesi analizleri ise hem 2B hem de 3B analiz yöntemleri kullanılarak uygulanmıştır. Kaya düşmesi analizleri ise, tehlike ve tehlike gerçekleştiğinde olası kayıpların bileşkesinden oluşan risk analizinin tehlike bileşenini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında izlenecek yöntemlere ait adımlar:

- 1) Fotogrametrik analizler,
- 2) Laboratuvar çalışmaları,
- 3) 2 ve 3 boyutlu kaya düşmesi analizleri,
- 4) Tehlike değerlendirmesi.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Çalışma Alanı

Kaya düşmesi, Karadeniz Bölgesinin Doğu Karadeniz bölümünde oldukça sık karşılaşılan kütle hareketlerinden birisidir. Gerek litolojik birimlerdeki bozunma, dayanım karakteristikleri, gerekse yoğun kırıklık ve yüksek yamaç eğimi gibi jeolojik ve yapısal unsurların uygunluğu, kaya düşmesi olaylarını da bölgede kaçınılmaz kılmaktadır. Bu nedenle, Doğu Karadeniz bölümü özelinde kaya düşmesi olayının modellenmesi ve olası etkilerinin değerlendirilmesi önemli bir gereklilik olarak görülmektedir. Bu noktadan hareketle, kaya düşmesi olayının sıkça görüldüğü Trabzon ili, Maçka ilçesi sınırları içinde yer alan ve ülkemizin önemli turizm noktalarından olan Sümela Manastırına giden yolu oluşturan Altındere Vadisi boyunca uzanan yaklaşık 10 km uzunluğundaki karayolu güzergahı bu tez çalışmasının inceleme alanını oluşturmaktadır. Maçka ilçesinden Sümela manastırına giden güzergah asfalt ve stabilize bir yoldan oluşmaktadır. Bölgede en çok yerleşimi olan Altındere köyüdür ve etrafındaki çok sayıda yaylaların bulunduğu en düşük kotu 700 m ve en yüksek 2111 m olan bu bölgenin son derece engebeli olduğunu göstermektedir. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası ve alanda çekilmiş fotoğraflar aşağıda sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası



Şekil 3. Çalışma alanlarından çekilmiş fotoğraflar

Çalışma alanı önemli turizm noktalarından birinden yer alması ve buna bağlı çok yoğun bir trafiğe sahip olması nedeniyle çalışmayı gerekli ve önemli hale getirmiştir. Bölgeye ait trafik istatistikleri Karayolları Bölge Müdürlüğünden alınan 2012, 2014, 2016 ve 2019 yılları ortalama araç geçiş sayıları ile aşağıda sunulmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. 2012-2014-2016 ve 2019 yılları Maçka-Meryemana yolu Y.O.G.T. değerleri

OTOMOBİL	O.Y.T.T.	OTOBÜS	KAMYON	TIR	TOPLAM	Yıl
1,226	129	38	172	6	1,571	2012
1,275	134	40	179	6	1,634	2014
1,005	137	2	111	2	1,257	2016
7517	1006	49	669	0	9241	2019

O.Y.T.T: Orta Yüklü Ticari Taşıt

Y.O.G.T: Yıllık Ortalama Günlük Trafik

## 2.2. Jeolojik Yapı

Türkiye'nin kuzeyinde yer alan Karadeniz bölgesi, doğu-batı yönü boyunca gözlenen Kuzey Anadolu Orojenik Kuşağı, çok eskiden beri hem maden yatakları hem de jeolojik birimlerin ilginçliği, farklılıkları, mineralizasyon ve yan kayaçlarla yakın ilişkileri nedeniyle ilgiyle incelenmiştir. Mesozoik ve Senozoik yaşlı birimlerin görüldüğü bölgede gerçekleşen ilk çalışmalar sonucunda yöre, "Doğu Pontid Tektonik Birliği" olarak tanımlanmıştır (Anonim, 2001). Yukarıda belirtilen döneme ait toleyitik kalkoalkalen kayaçlar izlenmektedir. Hem volkanik hem de granitik kayaçlarda bozulmaların sık görüldüğü Altındere vadisi, iki tür ayrımı yapılmış bir bölge olarak bilinmektedir. Sert ve dayanıklı özellikleri ile bilinen granitik kayaçlar genellikle eğim açısının düşük olduğu yamaç yüzeylerinde, volkanik kayaçlar ise çalışma alanının en çok eğimli kısımlarında görülmektedir. Derin vadilerle ayrılmış bir jeomorfolojik yapıya sahip olan Altındere vadisinin kuzey kesimlerinde V şeklinde vadiler, güney kesimlerinde ise U şeklinde glasiyal tekneler izlenmektedir. Çalışma alanı boyunca yüzeylenen dört ayrı formasyon (Çatak, Berdiga, Hamurkesen ve Kaçkar granitoidleri) bulunmaktadır.

### 2.2.1. Çatak Formasyonu

Üst Kretase dönemine ait toleyitik ve kalkoalkalen volkanitler ve denizel tortullardan oluşan Doğu Pontidlerin Kuzey zonu en iyi kesit örneğini Maçka'nın güney doğusunda, Değirmendere, Çatak mevkinde vermektedir. Güven (1993) tarafından yapılan



çalışmalar sonucunda adı geçen formasyonu Geç Kretase dönemine ait bazik volkanitler oluşturmaktadır. Bazalt-Andezit ve piroklastların kumtaşı, kiltası, silttaşı ve marn tabakaları ile aralanmasından oluşan formasyon, inceleme alanının orta kesimlerinde izlenmektedir. Yastık lav yapılar bazaltlarda iyi gelişmiştir. Gri-yeşil istifin hakim rengidir. Çatak formasyonu, Berdiga formasyonu üzerine uyumlu olarak gelişerek, kalınlığı 750-1000 m arasındadır. Formasyonun yaşı kırmızı-bordo renkli kireçtaşlarındaki fosil türlerine bağlı olarak Turoniyen-Koniasiyen-Santoniyen zaman dilimi içerisinde yer almaktadır.

### **2.2.2. Berdiga Formasyonu**

Berdiga dağları'nda yapılan incelemeler sonucunda gri-beyaz renkli Geç Jura-Erken Kretase yaşlı dolomitik, çörtlü, kumlu ve oolitik kireçtaşları ilk kez Pelin (1997) tarafından Berdiga formasyonu olarak tanımlanmıştır. Kadirga Yaylası, Maçka –Hamsiköy, Maçka-Meryemana, Maçka-Şimşirli, Arsin-Çatak, Çaykara-Uzungöl, Çaykara-Günbuldu yörelerinde izlenen mostralardan sahanın orta ve güney kesimlerinde gözlenir. Adı geçen formasyon genel olarak kumlu, çörtlü ve killi kireçtaşları'ndan oluşmaktadır ve Hamurkesen formasyonu üzerine uyumlu olan Berdiga formasyonu 100-200 m kalınlığındadır. Formasyon yaşı Malm-Erken Kretase-Senomaniyen'dir.

### **2.2.3. Hamurkesen Formasyonu**

Bayburt-Demirözü yöresinde Geç Jura-Erken Kretase kireçtaşları altında izlenmekte olan volkano-sedimanter yapıları bir birim olarak Ağar (1997) tarafından tanımlanmıştır. Maçka-Meryemana (Sümela), Maçka-Hamsiköy, Yomra-Maden, Dumanlı köyü (Santa-Gümüşhane), Çaykara ilçesi güneyinde Uzungöl (Şerah)-Çakıroğlu yaylası-Varda yaylası yörelerinde izlenmekte olan formasyon inceleme alanının orta ve güney kesimlerinde görülür. Renkleri genel olarak mor ve gri bazalt ve piroklastlardan oluşmaktadır. Dokusu entergranüler ve mikrolitik porfirik olmakla birlikte kalınlığı 3-5 m olan formasyonda killi kireçtaşları ve kumtaşları görülmektedir. Formasyon, Berdiga Formasyonu üzerine uyumlu örtülür, kalınlığı yaklaşık 500 m'dir. Yaşı ise Liyas olarak tespit edilmiştir.

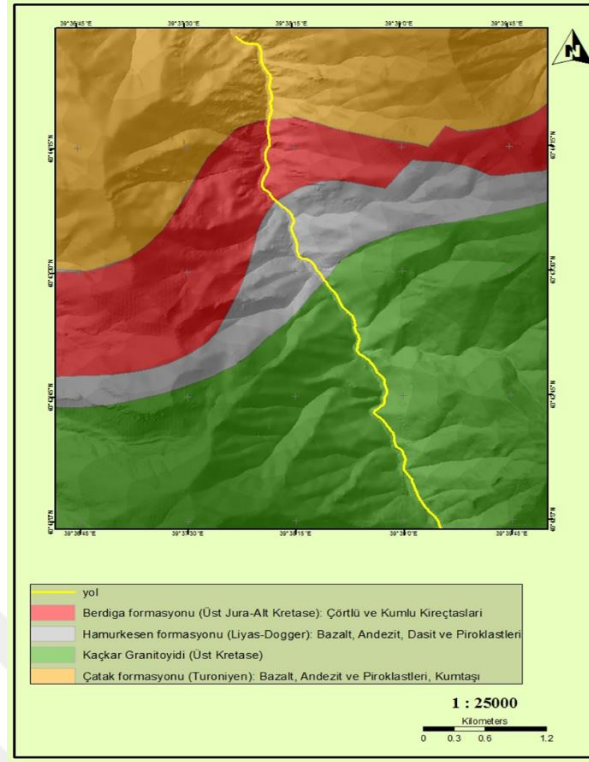
#### 2.2.4. Kaçkar Granitoidleri

Rize'nin Güney doğusunda Kaçkar Dağları adıyla bilinmekte olan dağ silsilesidir. Granitoidlerin Mesozoik ve Senozoik yaşlı birimler içine sokulum yapmış olması nedeniyle "Kaçkar Granitoidi" olarak adlandırılmıştır. Çoğullu (1970) "Rize Granitoidi" olarak adlandırmış, intrüzif kompleks bir yapı içerisinde granitten gabroya bir değişimden dolayı Güven (1993) "Granitoid" tanımını daha uygun bulmuştur. Kaçkar Granitoidleri gelişimlerini Geç Kretase devresi boyunca sürdürmüş, yerleşiminin Paleosen'in sonlarında tamamlamıştır. Bu formasyon ilk olarak Eosen yaşlı Kabaköy formasyonu ile aşınma uyumsuzluğu ile örtülü olup, aynı dönemde tekrar intrüzyon yapan granitoidler, bu defa kabaköy formasyonuna intrüzif olarak görülmektedir. Formasyon, alandaki kontakt, skarn ve porfiri cevherleşmelerin oluşumları ile direk olarak ilişkidir.

Granitik kayalar; yer yer bloksu yapıda ve sert zemin özelliğine sahiptir. Yamaç eğimlerinin düşük olduğu yerde bulunurlar Volkanik kayalar ise; Altındere vadisi 'in en sert eğimli alanlarını oluşturmaktadır. Çalışma alanında çok parçalı ve derin vadilerle bölünmüş bir jeomorfolojik yapı bulunmaktadır. Vadinin kuzey kesimlerinde genç "V" biçimli vadiler bulunurken, güneyde ise Pleistosen Glasiyasyonunun işlediği "U" şekli glasiyal tekneler ortaya çıkmıştır.

#### 2.2.5. Jeoloji

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (M.T.A.)' dan alınan 1:25.000 ölçekli Jeoloji haritaları vektör veri formatında sayısallaştırılarak analizlerin yapılabilmesi ve diğer verilerle uyumlu olması için 10 m mekansal çözünürlüklü raster veriye dönüştürülmüştür. Çalışma alanına ait genel jeoloji haritası aşağıda sunulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma alanına ait genel jeoloji haritası

### 2.3. Duyarlılık Çalışmaları

#### 2.3.1. Duyarlılık İncelemelerinde Kullanılması Gereken Verilerin Elde Edilmesi

Bölgenin 1:5000 ölçekli hali hazır haritası 2017 yılında Maçka Belediyesinden elde edilmiştir. Formatı NCZ olan ve Netcad ortamında açılan dosya dönüştürülerek shape file formatına çevrilmiştir. Sayısal eşyüksekti eğrileri CBS ortamında kesilerek çalışma alanına ait eğriler elde edilmiştir. Ayrıca Altındere vadisi Sümela manastırı güzergahının 1:5000 ölçekli sayısal yolu Karayolları Bölge Müdürlüğü tarafından elde edilmiştir.

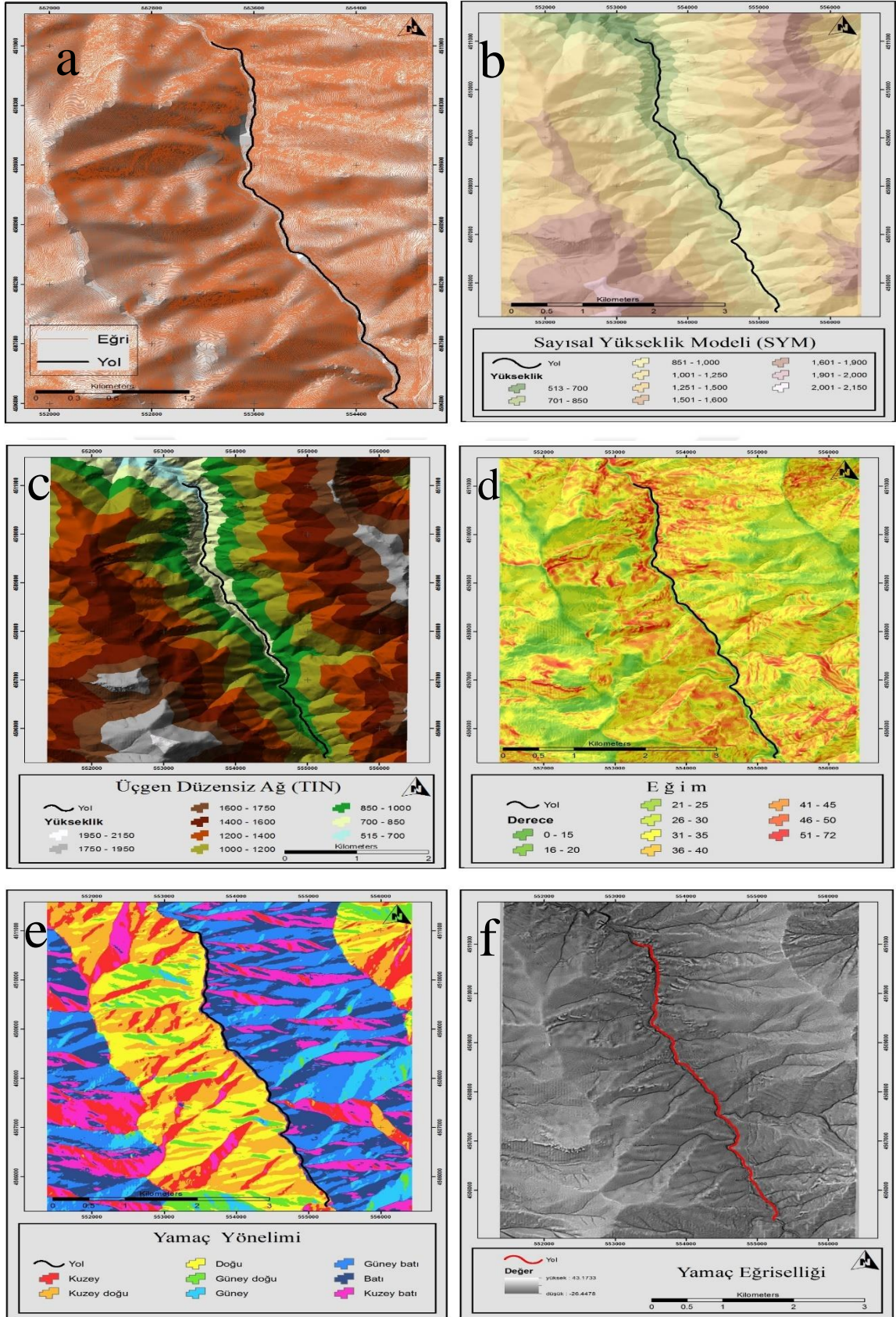
İlk olarak söz konusu güzergaha ait 1:5000 ölçekli topoğrafik haritalar üzerinden CBS ortamında 10 m mekansal çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (SYM) ve üçgen düzensiz ağ (TIN) oluşturulmuştur. Duyarlılık analizlerinde girdi parametreleri olarak kullanılması planlanan güzergaha ait yamaç eğimi, yamaç yönelimi ve yamaç eğriselliği elde edilen SYM kullanılarak oluşturulmuştur.

Yüzey morfolojisine dayanan kıvrımlar ve faylar da dahil olmak üzere jeolojik yapıların tanımlanması, yüzey yapısal haritalarının hazırlanması veya revize edilmesi için

faydalıdır. Son on yılda yeni bir aracın uygulamalarında kaydedilen ilerleme, sayısal yükseklik modellemesi, hataların uzaysal dağılımının ve kıvrımların geometrisinin ayrıntılı bir analizini sağlar. Sayısal yükseklik modellerinin (SYM) işlenmesi, yer şekillerinin gösterilmesi (Kühni ve Pfiffner, 2001; Miliareisis ve Iliopoulou, 2004), deforme stratigrafik birimlerde kıvrım paternleri ve yapısal stilin belirlenmesi (Banerjee ve Mitra, 2005), blok hareketlerin analizi (Collet ve Ark. 2000), aktif fayların keşfedilmesi (Sung ve Chen, 2004; Ganas vd., 2005) ve eğim hareketlerinin analizi (Iwahashi vd., 2001) için kullanışlıdır. Sayısal yükseklik modelleri ayrıca volkanların dağılımını ve şekillerini haritalamakta (Adıyaman vd., 1998) ve eğim ve doğrultu ölçülerinde de kullanılmaktadır (Banerjee ve Mitra 2005). SYM tabanlı morfometri aynı zamanda fay dikliklerinin tanımlanması ve ölçülmesinde (Hooper vd., 2003; Ganas vd., 2005), fay kayma oranlarının hesaplanmasında (Ganas vd., 2005), fay hareket miktarının tahminlerinde (Walker ve Jackson, 2002) ve tektonik yükselme aşamalarının tanınmasında (Booth-Rea vd., 2004) uygulanmıştır.

Eğim ve baki, yüzeydeki bir noktaya teğet olan bir düzlemin özellikleridir. Eğimi ve yönelim hesaplayan birçok algoritma olup ve çok sayıda çalışma hassasiyetlerini bildirmiştir (Zhou ve Liu, 2004). Eğim ve yönelim değerlerini hesaplamak için Fleming ve Hoffer (1979) yöntemi ile ikinci derece sonlu fark algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma türetilmiş parametrelerin en iyi doğruluğunu sağlar (Jones, 1998; Zhou ve Liu, 2004). Eğim ve yönelim değerleri, üçe üç grid bir pencerede SYM'nin yerel bir özelliği olarak hesaplanmış ve daha sonra pencerenin merkezi hücrelerine atanmıştır. Bu şekilde, her grid hücresi için eğim ve yönelim açıları hesaplanmıştır. Eğim değerleri haritalarda açıların sinüsü olarak veya derece, yönelim azimutunun değeri olarak sunulmuştur. Eğim haritasının oluşturduğu konturlar yapıların hassas bir şekilde konumlanmasını sağlar. Eğim haritalarının yorumlanmasındaki hataları önlemek için, özellikle eğim açıları çok az değiştiğinde, güçlü zıt renk ölçekleri uygulanmıştır.

TIN genel olarak araziye ve çalışma alanları gösterebilecek ve aynı zamanda sayısal yüzey modeli (DSM) veya sayısal arazi modeli (DTM) üretiminde bir sayısal yüzey modeli olarak isimlendirilebilir. Haritalama ve analizde rasterlaştırılmış bir sayısal yükseklik modeli (SYM) üzerinde TIN kullanmanın avantajlarından biri, TIN'in noktalarının, arazinin doğru bir temsilini oluşturmak için en gerekli noktaların belirlendiğini belirleyen bir algoritmaya göre değişken bir şekilde dağıtılmasıdır. Elde edilen sayısal topoğrafik haritalar aşağıda getirilmiştir (Şekil 5).



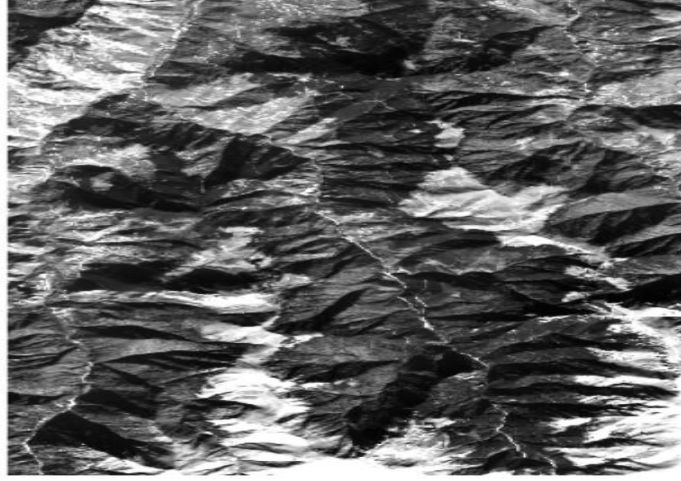
Şekil 5. Alana ait a) Eşyüksekti eğrileri, b) SYM, c) TIN, d) Eğim, e) Yamaç yönelim, f) Yamaç eğriselliği

### 2.3.2. Yapısal Kırıklılık Durumunun İncelemesi

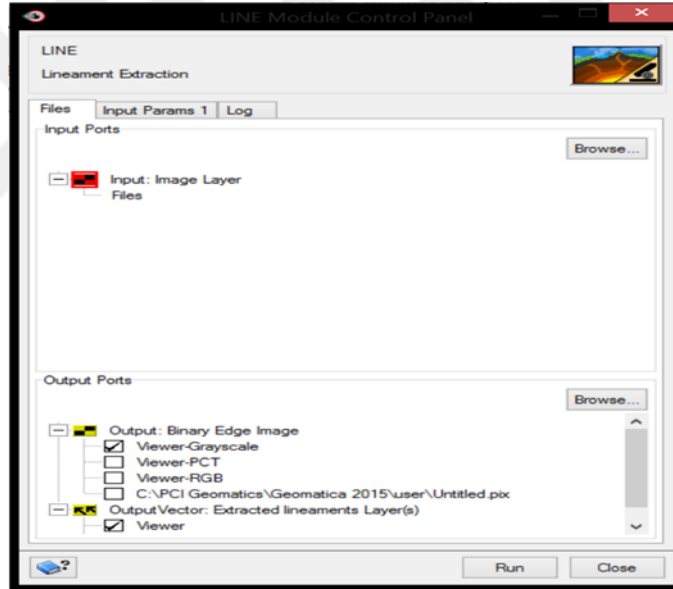
Dünya yüzeyindeki doğrusal özellikler son yüzyılın ilk yıllarından (Hobbs, 1904, 1912) bugüne kadar uzun yıllardır jeologlar için bir çalışma konusu olmuştur. Çizgisellik, fay gibi bir jeolojik yapının ifadesi olan doğrusal bir özelliktir ve etkileşimli bir sistemden yararlanıp görsel veya desen tanıma yardımı ile otomatik olarak (Chorowicz vd., 1989), kenar saptama rutinleri (Heddi vd., 1999) veya doku analizleri ile (Morris, 1991) belirlenebilir. Çizgilerin incelenmesi, bölgedeki heyelan/kaya düşmesi nedenlerini anlamada yardımcı olabilecek genellerin ortaya çıkmasına yardımcı olabilir. Günümüzde uzaktan algılama, jeolojik verilerin belirlenmesinde önemli bir faktör olarak bilinmektedir. Bölgenin doğrusal ve jeomorfolojik özelliklerini belirlemek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir örneğin: uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları. Literatüre göre, uydu görüntülerinden çizgilerin çıkarılması için iki yaygın yöntem vardır: 1) Görsel çıkarım: Kullanıcı ilk önce Laplacian ve Sobel gibi yönsüz ve yönsüz filtrelerin kullanarak kenar geliştirmeleri yapmak için bazı görüntü işleme teknikleriyle başlamayıp, daha sonra çizgiler kullanıcı tarafından elle sayısallaştırılabilir (Arlegui ve Soriano, 1998; Süzen ve Toprak, 1998). 2) Otomatik/dijital çıkarım: Önerilen bilgisayar tabanlı ve çoğunlukla kenal filtreleme tekniklerinden yararlanan çizgi çıkarmak yöntemleri. Bilgisayarın yazılımı ve algoritmalarını kullanılarak bir çizgisellik (kırıklılık) haritası üretilebilir (Burdick ve Speirer 1980, Karnieli vd., 1996; Baumgartner vd., 1999, Hung vd., 2002, 2003, Kim vd., 2004) Otomatik çizgi çıkartma işlemi için en yaygın kullanılan yazılım PCI Geomatica'nın LINE modülüdür.

Alandaki yapısal kırıklılık durumunu irdelemek amacıyla kırık yoğunluk indeksi haritası elde edilmiştir. Bu amaçla, alana ait Ekim 2017 tarihli Landsat 8 uydu görüntüsünün 15 m mekansal çözünürlüklü pankromatik bandı üzerinden PCI Geomatica yazılımının otomatik çizgisellik çıkarım aracından yararlanılmıştır.

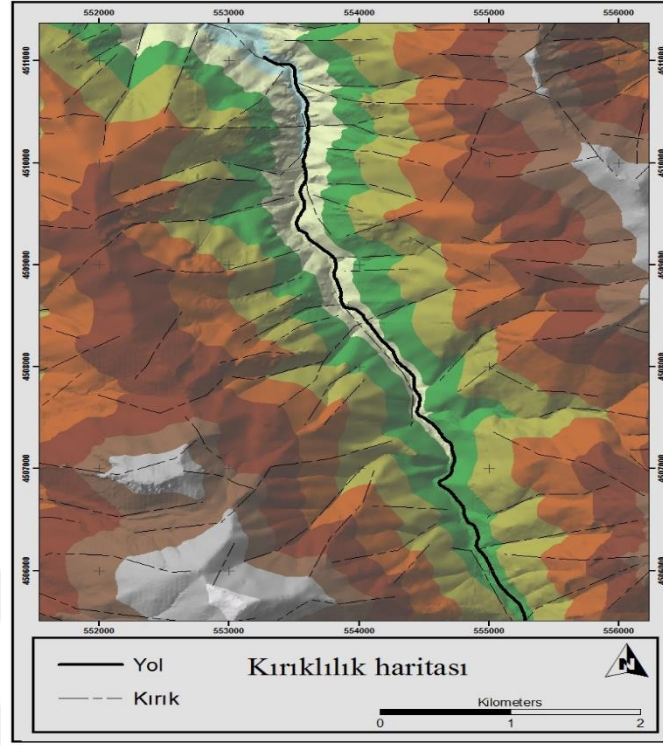
Öncelikle USGS'den elde edilen çalışma alanına ait Landsat görüntüsünün 8. bandı CBS ortamında kesilerek tiff formatına dönüştürülmüştür (Şekil 6). Kırıklılık haritasının üretilmesinde 8.bandı kullanmamasını nedeni 15 m çözünürlüğe sahip olmasıdır. Hazırlanan bant PCI-Geomatica ortamında kullanarak "Lineament extraction" aracı (Şekil 7) yardımıyla alanın kırıklılık durumunun haritası elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 6. Landsat görüntüsünün 8. Band



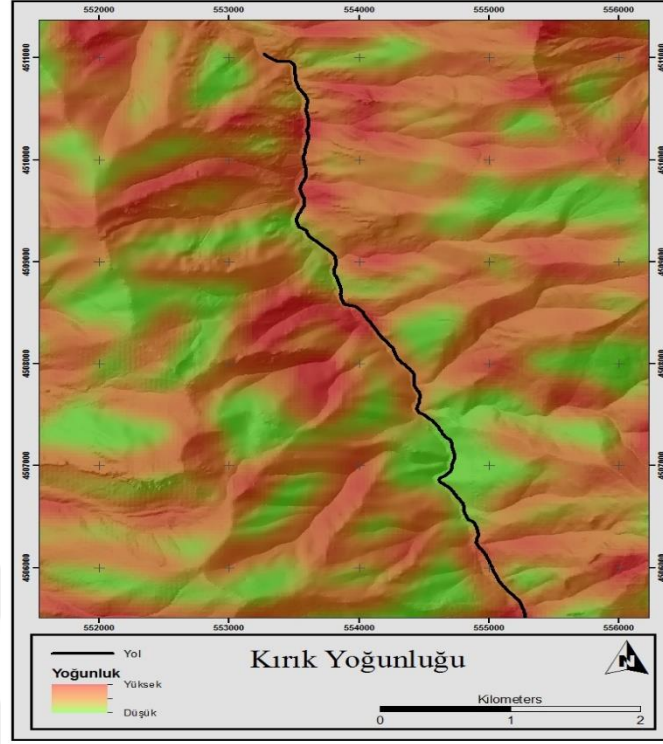
Şekil 7. PCI-Geomatica'nın LINE uygulaması



Şekil 8. İnceleme alanına ait kırık hatları haritası

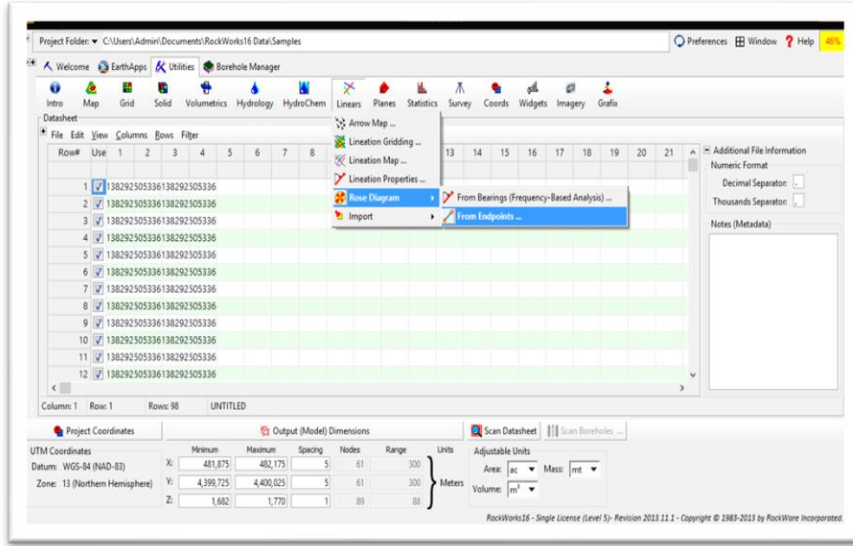
Değişen coğrafi konumların kalıplarını anlamak için çeşitli uzaysal yazılımlar vardır. Bu amaca ulaşabilmek için, girdi olarak birtakım noktalar sunan ve bir yoğunluk seviyesi oluşturan en önemli araçlardan bir tanesi olan Kernel density analizidir (Chainey ve Ratcliffe, 2005). Yoğunluk tahmini ölçülen verilerden (koşullu) olasılık yoğunluk fonksiyonunu yaklaşık olarak belirlemek için bir yöntemdir. Çekirdek yoğunluk (Kernel density) tahmini yoğunluk tahmini için parametrik olmayan bir yöntemdir. Ayrıca Parzen penceresi olarak adlandırılan bu uygulama, yaklaşık bir yoğunluk fonksiyonu elde etmek için bir çekirdek fonksiyonu ölçülen veriler arasında hareket eder (Webb, 2002). Elde edilen kırıklılık haritası kullanılarak CBS ortamında Kernel Density aracı yardımıyla kırıklılık yoğunluğu haritası üretilmiştir (Şekil 9). Elde edilen kırıklılık yoğunluğu haritasına göre çalışma alanında kırıkların yoğun olduğu ve bunun sonucunda kaya kütlelerinin oluşumunda çok etkili bir parametre olduğunu ve çalışma alanına daha çok odaklanması gerektiğini göstermektedir.



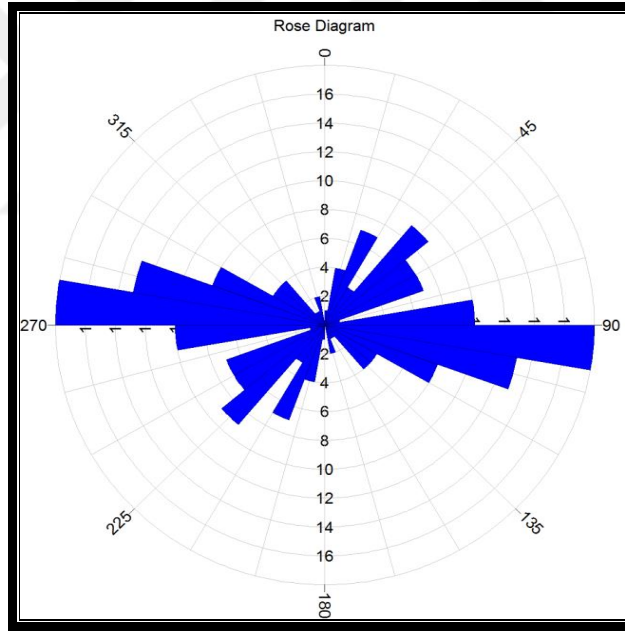


Şekil 9. ArcGIS ortamında oluşturulan “Kırık Yoğunluk” haritası

Çizgiler, genel olarak azimut histogramlarına karşı sıklık veya uzunluk (Mostafa ve Zakir, 1996; Zakir vd., 1999), gül diyagramları (Karnieli vd., 1996) ve / veya lineament yoğunluk haritaları (Zakir ve diğerleri) kullanılarak analiz edilir. Bu çalışmada alana ait kırıklılık haritasını incelemek için gül diyagramı yöntemi kullanılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için Rockworks 16 programı ortamında (Şekil 10) kırıklılık yönlerini belirlemek için gül diyagramı elde edilmiştir. Sonuç olarak kırıklılık yönlerinin genelde doğu-batı yönünde olduğu belirlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 10. Rockworks ortamında rose diyagram uygulaması



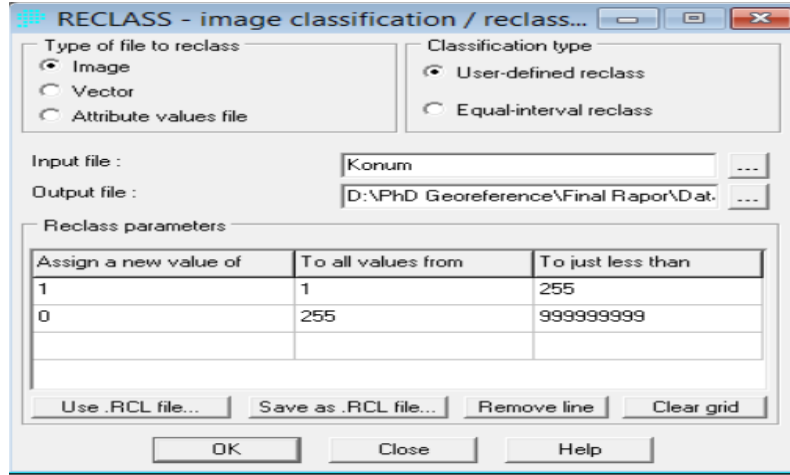
Şekil 11. Rockworks ortamında elde edilen gül diyagramı

### 2.3.3. Lojistik Regresyon

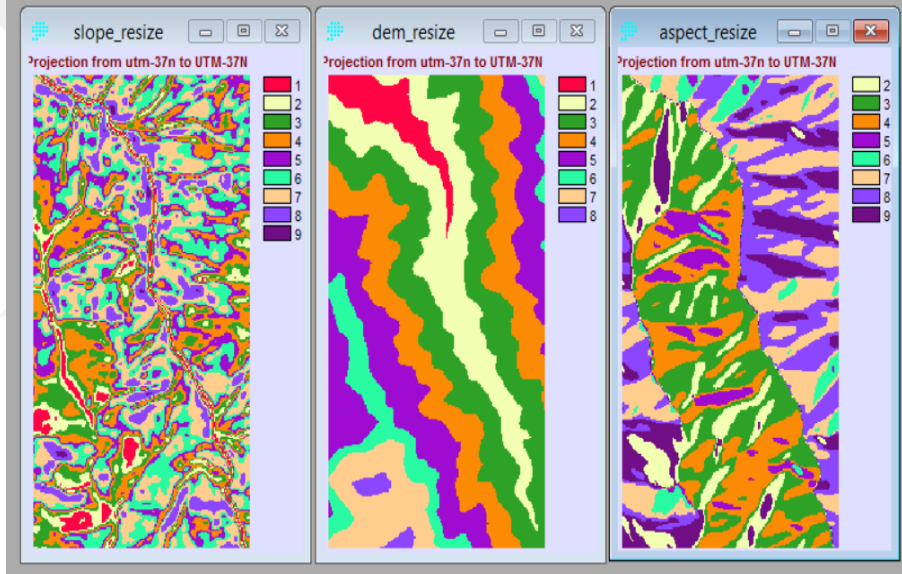
Kaya düşmesi duyarlılık haritalarını üretilmek amacıyla bilinen ve tutarlı ve güvenilir sonuçlar veren, aynı zamanda literatürde genellikle tercih edilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır örneğin: yarı niteliksel yöntemler, analitik hiyerarşi süreci (AHP) (Barredol vd., 2000), iki değişkenli istatistiksel analiz (Nandi ve Shakoor, 2009; Kelarestaghi ve

Ahmadi 2009), olasılık-frekans oranı modeli (Lee ve Pradhan, 2006) ve lojistik regresyon gibi çok değişkenli regresyon yöntemleri (Lee ve Sambath, 2006; Su ve Cui, 2010; Pradhan 2010; Choi vd., 2012). Bilgi işlem kapasitesindeki hızlı artış ve gelişme, bilim insanlarının çok değişkenli istatistiksel analizleri uygulamada çok önemli bir etken olan büyük veri setlerini işlemelerine de izin vermektedir. Heyelen/kayadüşmesi duyarlılık haritalarının elde edilmesi için uzun zamandır kullanılmakta olan çok değişkenli prosedürler bulunmaktadır. (Reger, 1979; Carrara vd., 1992; Gorseveski vd., 2000; Lee ve Min, 2001; Baeza ve Corominas 2001; Ayenew ve Barbieri, 2005; Can vd., 2005; Chau ve Chan, 2005; Greco vd., 2007). Farklı kaya düşmesi duyarlılık haritalama teknikleri arasında, lojistik regresyon (LR), toprak ve/veya ayrılmış kayaların toprak kaymalarını incelemek için bazı avantajlar sağlamaktadır (Gorseveski vd., 2000; Dai ve Lee, 2002; Ayalew ve Yamagishi, 2004; Chau vd., 2004; Lee ve Sambath, 2006; Akgun ve Bulut 2007; Lamelas vd., 2008; Akgun vd., 2008). LR yöntemi özellikle son yıllarda heyelan ve kaya düşmesi duyarlılık değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan istatistiksel bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. LR olasılıksal bir istatistiksel model olup kategorik olarak sınıflandırılmış bağımlı bir değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkinin açıklanmasında kullanılmaktadır (Alizadeh ve Akgün, 2018). Güvenilir ve tutarlı sonuç verme ve literatürde yaygın olarak kullanma sebebiyle farklı araştırmacılar tarafından Bernknopf vd., (1988), Jade ve Sarkar (1993), Wiczorek vd. (1996), Atkinson ve Massari (1998), Guzzetti vd. (1999), Gorsevski vd. (2000), Dai vd. (2001), Lee ve Min (2001), Dai ve Lee (2002, 2003) ve Ohlmacher ve Davis (2003) olmak üzere duyarlılık haritalarını üretmek için lojistik regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, duyarlılık değerlendirmesi yapmak amacıyla literatürde hem sıklıkla kullanılan bir yöntem olduğundan hem de yeterince tutarlı ve verimli sonuçlar vermesi nedeniyle lojistik regresyon uygulaması tercih edilmiştir.

Coğrafi Bilgi sistemleri ortamında hazırlanan haritalar (sayısal yükseklik modeli (Digital Elevation Model), yamaç eğimi, yamaç yönelimi) raster formatında dönüştürülüp IDRISI Selva ve CBS ortamına aktarılmıştır. Lojistik regresyon analizinde elde edilmiş veri setindeki haritaların analiz için uyumlu olması açısından boyutlarının aynı olması gerekmektedir. Bu nedenle boyutlarını düzeltmek için haritalar yeniden sınıflandırılmıştır (Şekil 12 ve 13).



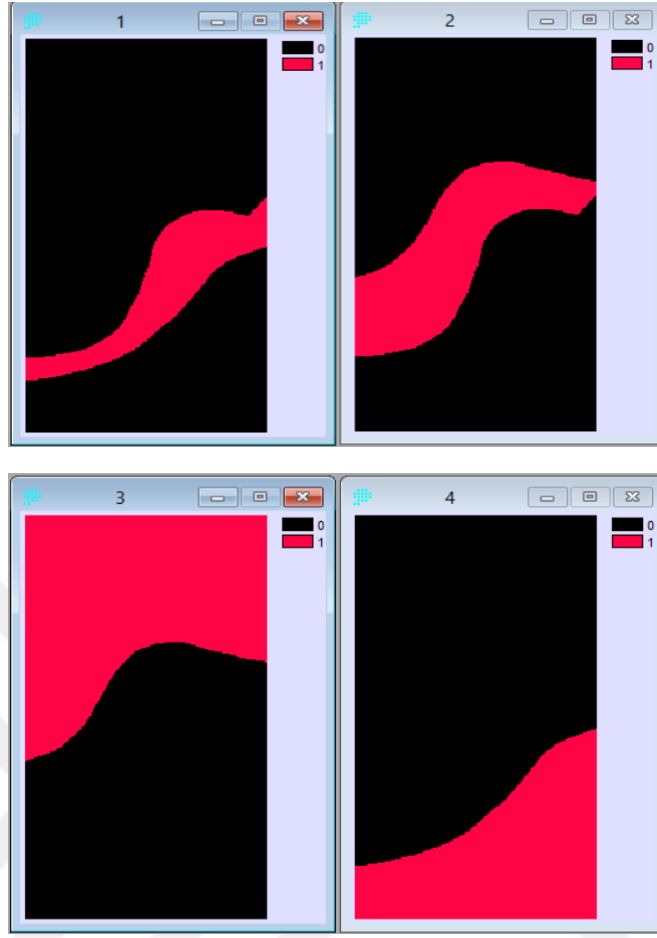
Şekil 12. İdrisi ortamında reclass uygulaması



Şekil 13. Yeniden sınıflandırılmış Sayısal Yükseklik Modeli, Eğim, Yamaç Yönelimi

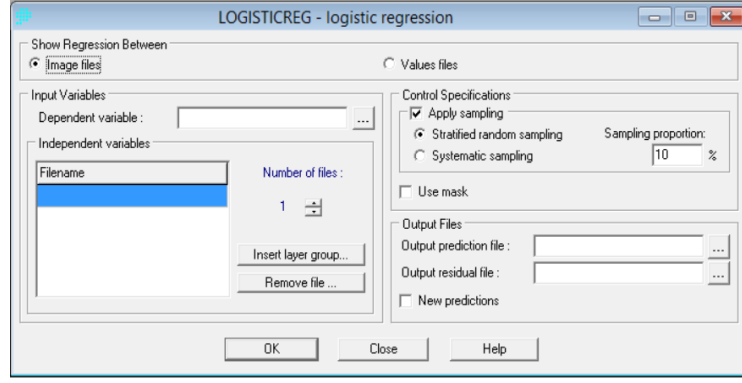
Yeniden sınıflandırma işlemi kaya düşmelerinde denetleyici parametrelerinden olan litoloji haritası içinde uygulanmıştır. Çalışma alanı 4 farklı litolojiden oluşmaktadır ve tekrardan sınıflandırma sebebiyle her bir litoloji biriminin lojistik regresyon analizindeki etkisini belirlemektir (Şekil 14).

1. Liyas-Dogger yaşlı Hamurkesen formasyonu (Bazalt, Andezit, Dasit ve piroklastleri)
2. Üst Jura-Alt Kretase yaşlı Berdiga formasyonu (Kumlu ve Çörtlü kireç taşı)
3. Turoniyen yaşlı Çatak formasyonu (Bazalt, Andezit ve piroklastleri, kum taşı)
4. Üst Kretase yaşlı Kaçkar Granitoidleri (Derinlik kaya)

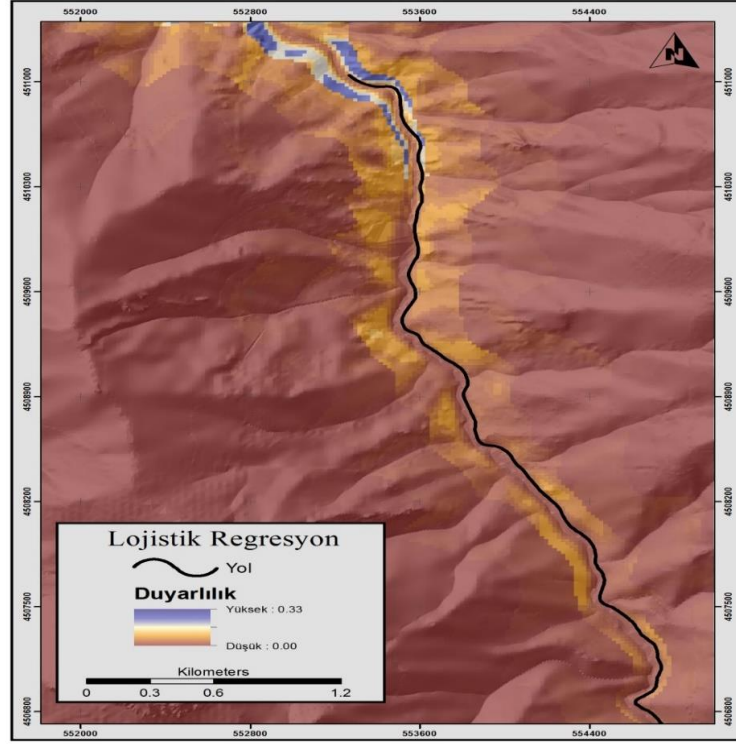


Şekil 14. Çalışma alanındaki yeniden sınıflandırılmış 4 litoloji grubu

İlk olarak topoğrafik denetleyici parametreler ve daha sonra hem topoğrafik ve litolojik özellikler kullanılarak lojistik regresyon analizi yapılmıştır. 1. Lojistik regresyon analizinde, daha önce kaya düşmesi olayının meydana geldiği alanlar şev uzunluğu ve yüksekliği dikkate alınarak sayısallaştırılmış ve kaya düşmesi duyarlılık analizi sırasında bağımlı değişken olarak tanımlanmıştır. Söz konusu diğer parametrelerde bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. 2. lojistik regresyon analizinde girdi parametresi olarak hem topoğrafik hem litolojik özellikler bağımsız değişkenler olarak kullanılmış ve indeks haritalar elde edilmiştir. IDRISI Selva ortamındaki lojistik regresyon analizi ile elde edilen veriler kullanılarak çalışma alanının kaya düşmesi duyarlılık değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu aşamada, yapılan analizlerde hem topografik hem de litolojik denetleyici parametrelerin modellemeye etkileri de incelenmiştir. Bu haritalar, Sümela manastırı yolu boyunca kaya düşmesi potansiyelinin kategorik sınıflandırmasını elde etmek için bir kez daha sınıflandırılmıştır. Lojistik regresyon uygulaması ve sonuçları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 15. Lojistik regresyon uygulaması

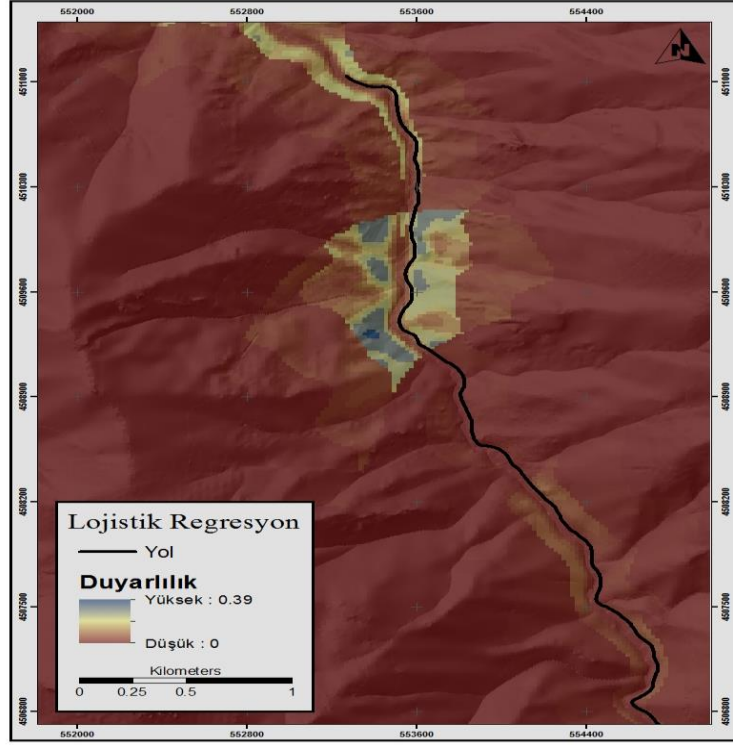


Şekil 16. Lojistik regresyon uygulamasında kullanılan 1. Veri Seti

Tablo 2. Lojistik regresyon 1. veri seti sonuçları

Regresyon Statistikleri:		Değişkenler	Katsayı
Pseudo R <sup>2</sup>	0.2558	Intercept	-2.6674
ROC = 0.9160		Sayısal Yükseklik Modeli	-1.4047
		Yamaç Eğimi	0.3209
		Yamaç Yönelimi	0.0658

\* **ROC = 1** mükemmel uyumu gösterir; ve **ROC = 0.5**, rastgele uyumu belirtir.



Şekil 17. Lojistik regresyon uygulamasında kullanılan 2. veri Seti

Tablo 3. Lojistik regresyon 2. veri seti sonuçları

Regresyon Statistikleri:		Değişkenler	Katsayı
Pseudo R <sup>2</sup>	0.3489	Intercept	-12.6766
		Yamaç Yönelimi	-0.0051
		Sayısal Yükseklik Modeli	-1.9370
		Yamaç Eğimi	0.3796
		Çatak Formasyonu (1)	9.5926
		Berdiga Formasyonu (2)	12.7296
		Hamurkesen Formasyonu (3)	10.2776
		Kaçkar Granitoidleri (4)	11.0249

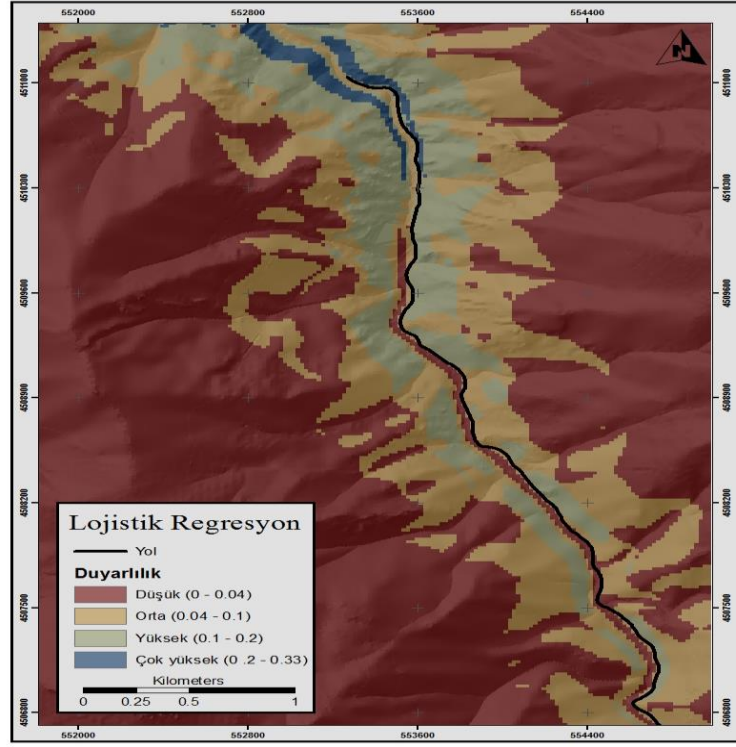
ROC = 0.9388

\* ROC = 1 mükemmel uyumu gösterir; ve ROC = 0.5, rastgele uyumu belirtir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında topoğrafik ve litolojik parametreler analizi pozitif ve negatif yönde etkilemektedir. Pseudo R2 ve ROC değerlerine göre çalışmamız tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Elde edilen indeks haritalar tekrar sınıflandırılıp Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında kaya düşme potansiyeli olan alanlar kategorik olarak 4 farklı kategoride (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) sınıflandırılmıştır.

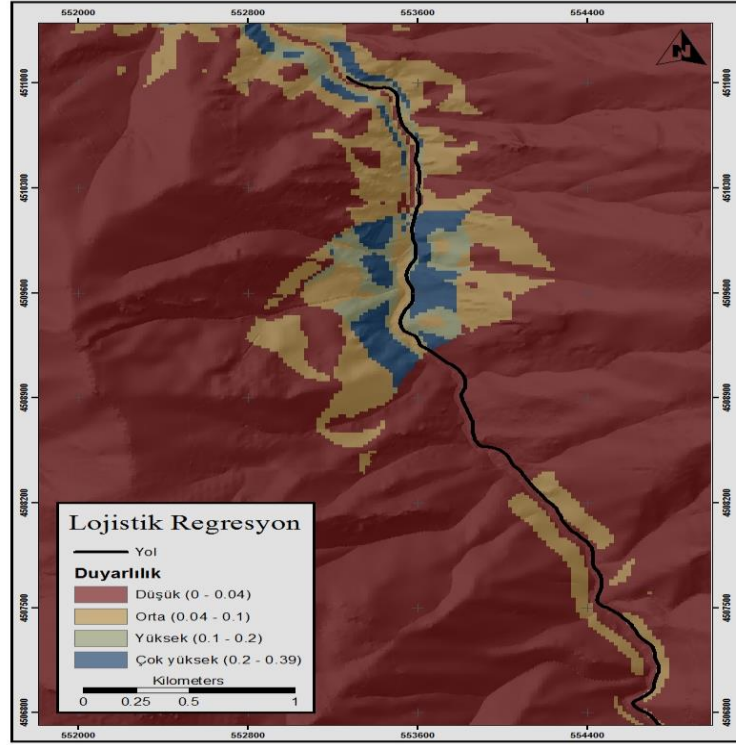




Şekil 18. Veri Seti -1 ile Elde Edilen Duyarlılık Haritası

Tablo 4. Veri Seti -1 ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları

Kategori	Piksel	Alan_m <sup>2</sup>	Alan_Yüzde	Alan_Km <sup>2</sup>
Düşük	43607	4360700	79.25	4.36
Orta	6551	655100	11.9	0.6551
Yüksek	3870	387000	7.03	0.3870
Çok yüksek	100	100000	1.82	0.01



Şekil 19. Veri Seti -2 ile Elde Edilen Duyarlılık Haritası

Tablo 5. Veri Seti -2 ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları

Kategori	Piksel	Alan_m <sup>2</sup>	Alan_Yüzde	Alan_Km <sup>2</sup>
Düşük	45173	4517300	83.44	4.517
Orta	4526	452600	8.36	0.4526
Yüksek	3346	334600	6.18	0.3346
Çok yüksek	1092	109200	2.02	0.1092

İki takım veri setinden elde edilen kategorik haritaların istatistik sonuçlarına göre ikinci veri setinde kaya düşme potansiyeli çok yüksek olan lokasyonlar daha büyük bir alan kapsadığını ve bu nedenle daha çok odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 6. Lojistik regresyon 2 veri seti sonuçlarının karşılaştırılması

Alan_Km <sup>2</sup>	Alan_Km <sup>2</sup>
4.36	4.517
0.6551	0.4526
0.3870	0.3346
0.01	0.1092

### 2.3.3.1. Lojistik Regresyon Sonuçlar

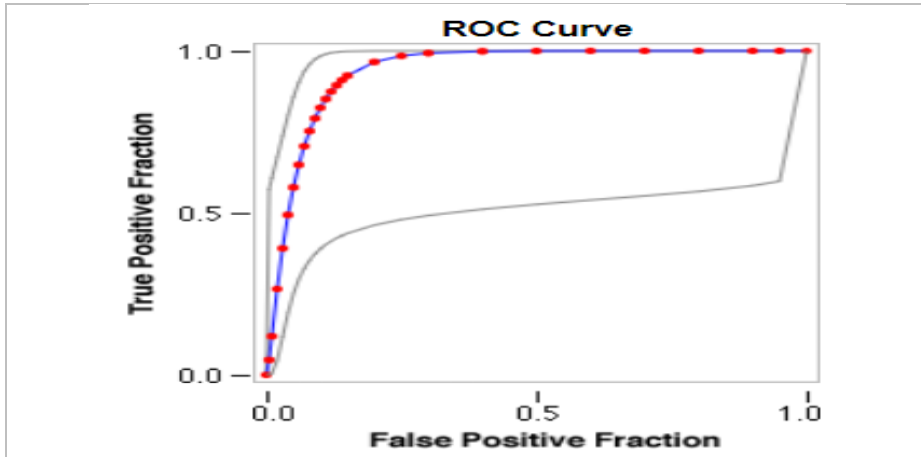
Lojistik regresyon analizinden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Kaya düşmesi duyarlılık değerlendirmesi topoğrafik verilerden oluşan veri seti yanısıra bu veri setine ilave olarak litoloji verisi eklenmek üzere iki ayrı veri seti yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir.
- Bu sayede topoğrafik verinin alandaki kaya düşme sürecine olan denetleyici etkisiyle litolojinin denetleyici etkisini irdeleme olanağı elde edilmiştir.
- Üretilen kaya düşmesi duyarlılık haritasının, alanda yapılması planlanan detay kaya düşmesi tehlike zonlaması çalışmalarına altlık oluşturması hedeflenmekte ve hızlı bir değerlendirme ile önleme planlaması gerektiğinde, bir yönlendirici veri oluşturabileceği sonucuna da varılmıştır.

### 2.3.3.2. Doğrulama (ROC Eğrisi)

Doğrulama, analizin önemli bir parçasıdır çünkü modellerin tahmin doğruluğuna ilişkin içgörüler sağlar (Ghorbanzadeh vd., 2019). Altındere vadisi boyunca kaya düşmeleri duyarlılık haritalarının doğruluğunu belirlemek için lojistik regresyondan elde edilen haritaları analiz edilmiştir. Modelin etkinliğini anlamak için kaya düşmesi envanter veri seti ile ortaya çıkan harita arasındaki uyum çok önemlidir. Doğruluk sonuçları, kullanılan modelin kaya düşmesine duyarlı alanları doğru şekilde tahmin edip edemeyeceğini göstermektedir (Pourghasemi vd., 2018).

ROC eğrisi, lojistik regresyondan gelen kaya düşmesi duyarlılığının sonucunu doğrulamak için kullanılır. ROC yöntemi, ortaya çıkan kaya düşmesi duyarlılık haritasında gerçek pozitif oranın (TPR geri çağırma ve hassasiyet olarakta bilinen ve y ekseninde çizilen) ve yanlış pozitif oranın (FPR yanlış alarm olasılığı ve özgüllük olarakta bilinen ve x ekseninde çizilen) değerlendirilmesini sağlar (Ghorbanzadeh vd., 2018). Olasılık eğrisi olan ROC eğrisi, yanlış pozitif orana karşı doğru pozitif oranı çizilerek elde edilir. Bu amaca ulaşabilmek için duyarlılık haritaları çalışma alanları ile çakıştırılmıştır ve bunun sonucunda elde edilen harita roc eğrisi doğrulamasında kullanılmıştır. Roc eğrisi için gereken veriler Coğrafi Bilgi Sistemi ve İdrisi Selva yardımıyla elde edilmiştir. Hazırlanan veriler ROC Eğrileri için web tabanlı hesap makinesi kullanarak roc eğrisi elde edilmiştir. Ayrılabilirliğin derecesini veya ölçüsünü temsil eden eğri altındaki alan oranı (AUC), ortaya çıkan kaya düşmesi duyarlılık haritasının doğruluğunu ve sınıfları ne kadar ayırt edebildiğini göstermektedir. Daha büyük bir eğri altındaki alan değeri, modelin daha yüksek bir doğruluğunu gösterirken, daha düşük bir eğri altındaki alan değeri, modelin daha düşük bir doğruluğunu gösterir ve bu oran 1'e ne kadar yakın olursa çalışmanın tutarlı ve sağlam sonuç verdiğini göstermektedir. Doğrulama çalışmasına ait eğri ve eğri altındaki alan değerleri aşağıdaki tabloda getirilmiştir (Şekil 20 ve Tablo 7).



Şekil 20. Doğrulama için elde edilmiş ROC eğrisi Receiver Operating Characteristics (ROC) = 0.94

Tablo 7. Roc eğrisi sınıflama tablosu

Eğri altındaki alan	Kategori
0.9 - 1	Çok iyi
0.8 -0.9	İyi
0.7 – 0.8	Orta
0.6 – 0.7	Düşük
0.5 – 0.6	Çok düşük

### 2.3.4. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesine yönelik metodolojiler, CBS teknolojisine dayanmaktadır ve heyelan duyarlılık değerlendirmesindeki eksiklikleri ve zorlukları çözmek için birçok çalışma yayınlanmıştır. Saaty (1977) tarafından geliştirilmiş olan Analitik Hiyerarşi Süreci, çok değişkenli bir karar verme yöntemidir. AHP'yi uygulamaya geçirmek için, ilk olarak karmaşık problemin bileşen faktörlerine ayrılması ve bunları hiyerarşik bir yapıda organize etmesi gerekmektedir. Diğer bir deyişle, her birinin diğerine göre doğrusal korelasyonu yoluyla her bir parametrenin ağırlığını tercihlerine göre tahmin edebilir ve alanın kaya düşmesi potansiyeline ilişkin göreceli bir matriste gösterildiği gibi, çiftler halinde ilgili korelasyon yoluyla elde edilir. Bu yöntemin birçok araştırmacı tarafından heyelan duyarlılık haritalarının üretiminde ve değerlendirmesinde çok önemli bir araç haline gelme ve tercih edilme sebebi, farklı denetleyici parametrelerini ilişkilendirme kabiliyetine sahip olmasıdır (Ayalew vd., 2004, 2005; Komac, 2006; Yoshimatsu ve Abe, 2006; Castellanos Abella ve Van Westen, 2007; Yalçın ve Bulut, 2007; Akgün ve Bulut, 2007; Akgün vd., 2008).

Genel olarak Bütün dünyada çoğu yazarlar tarafından yaygın olarak kullanılan bu yöntem (Hong vd., 2015; Shahabi vd., 2015; Sangchini vd., 2016; Althuwaynee ve Pradhan, 2016), bakışların ve gözlemlerin incelenmesine ve son derece tutarlı ve güvenilir bir karar modeline dönüştürülmesine olanak tanımaktadır (Saaty, 1980).

AHP, kullanıcıların ağırlığı tahsis ederken belirli kriterlere (faktör) ve alt kriterlere (sınıflar) daha iyi odaklanmalarını sağlayan kriterlerin hiyerarşik yapısına izin verme avantajına sahiptir (Ishizaka ve Labib, 2009). Hiyerarşi oluşturulduktan sonra, karar vericiler farklı öğeleri birbirleriyle karşılaştırarak sistematik olarak değerlendirir: hiyerarşide üstlerindeki bir öğe üzerindeki etkilerine göre birer birer iki tane. Karşılaştırma yaparken, karar vericiler tipik olarak öğelerin göreceli anlamı ve önemi hakkındaki uzman

bilgilerini (kararlarını) kullanırlar. AHP, karar vericilerin rasgele atama yerine oran ölçeği önceliklerini veya ağırlıklarını türetmelerine olanak sağlamasıyla, keyfi ağırlık ve puan yaklaşımları ile ilgili sorunların üstesinden gelmeye yardımcı olur (Yalçın, 2007).

Organize bir şekilde karar vermek ve öncelikler oluşturmak için kararı adımlara ayırmamız gerekir. AHP'nin bir karar problemine uygulanması dört aşamayı ele alır (Saaty, 1980; Zahedi, 1986; Saaty, 2008): (1) Karar probleminin hiyerarşik bir yaklaşımla yapılandırılması, (2) İkili karşılaştırmalar yapılması ve matrisin elde edilmesi, (3) Yerel ağırlıkların ve karşılaştırmaların tutarlılık oranının hesaplanması ve (4) Ağırlık toplamalarının hesaplanması.

Bu amaca ulaşabilmek için tüm topoğrafik ve litolojik özellikleri kullanarak kaya düşmesine neden olan faktörler ve görelî sınıflar için çift yönlü karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri İdrisi Selva ortamında elde edilmiştir. Tüm ikili karşılaştırma matrisleri, kurulu öğeleri kaya düşmesi oluşumu üzerindeki etkilerine göre sıralayarak yapılandırılmıştır. Çift yönlü karşılaştırma matrisindeki ağırlık değerleri Tablo 8a, b'de getirilmiştir.

Tablo 8a. Analitik Hiyerarşi analizi parametrelerin ağırlık değerleri ve tutarlılık oranı (T.O).

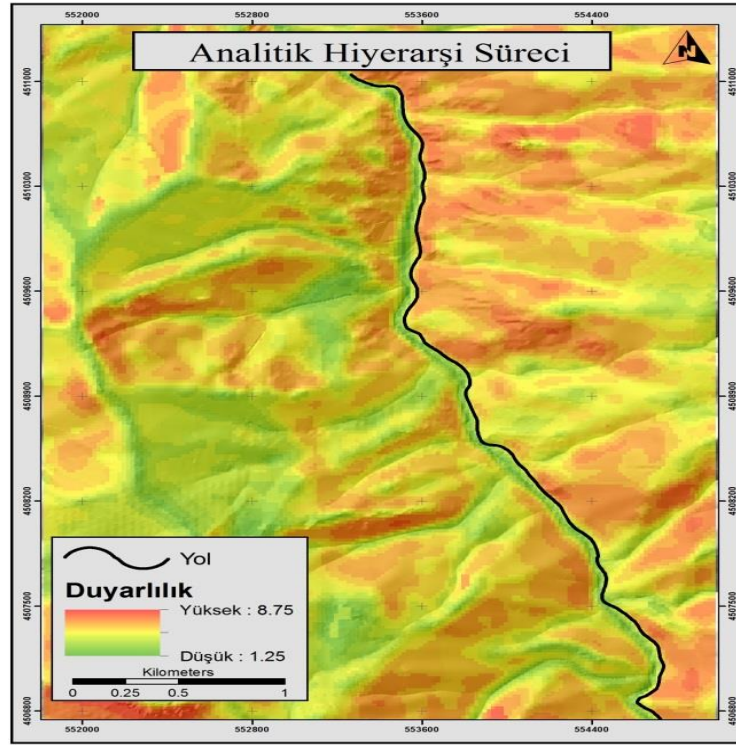
Parametere	Çatak formasyon	Berdiga formasyon	Hamurkesen formasyon	Kaçkar Granitoyidleri	Ağırlık değeri
Çatak formasyon	1				<b>0.18</b>
Berdiga formasyon	1/6	1			<b>0.04</b>
Hamurkesen formasyon	2	6	1		<b>0.28</b>
Kaçkar Granitoyidleri	3	7	2	1	<b>0.47</b>
Tutarlılık oranı = <b>0.04</b> < 0.1 kabul edilebilir					

Tablo 8b. Analitik Hiyerarşi analizi parametrelerin ağırlık değerleri ve tutarlılık oranı (T.O).

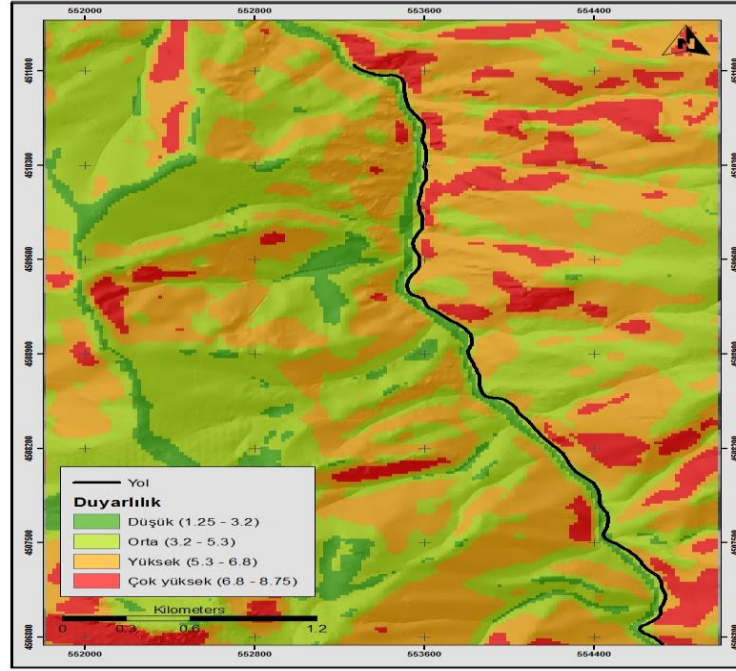
Parametere	Eğim	Yönelim	Yükseklik	Ağırlık değeri
Eğim	1			<b>0.66</b>
Yönelim	1/4	1		<b>0.2</b>
Yükseklik	1/4	1/2	1	<b>0.13</b>
Tutarlılık oranı = <b>0.05</b> < 0.1 kabul edilebilir				

### 2.3.4.1. Kaya Düşmesi Duyarlılık Haritası ve Doğrulama

AHP uygulamasıyla birlikte, kaya düşmelerini denetleyen parametreleri kullanarak, çalışma alanına ait kaya düşmesi duyarlılık haritası elde edilmiştir Şekil 21a, b. Eğim faktörü en yüksek ağırlığı sağlayan 0,66 ile en önemli değişken, ardından litoloji ve sonra diğer topoğrafik özellikler denetleyici parametre olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerin tutarlılık oranı kabul edilebilir oranda olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 21a. AHP yöntemi ile elde edilen duyarlılık indeks harita



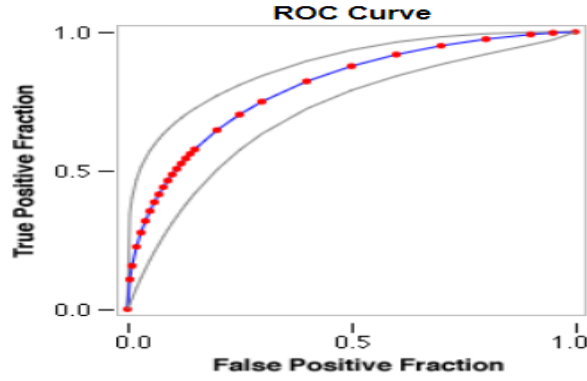
Şekil 21b. AHP yöntemi ile elde edilen duyarlılık kategorik harita

Tablo 9. AHP yöntemi ile elde edilen duyarlılık haritasının detayları

Kategori	Piksel	Alan_m <sup>2</sup>	Alan_Yüzde	Alan_Km <sup>2</sup>
Düşük	9894	989400	6.83	0.989
Orta	70302	7030200	48.54	7.03
Yüksek	54895	5489500	37.9	5.489
Çok yüksek	9739	973900	6.73	0.973

Yukarıdaki tablo da belirtildiği gibi kaya düşme potansiyeli yüksek ve çok yüksek olan alanların büyük bir oranı Altındere vadisi boyunca yer almaktadır. Elde edilen duyarlılık haritasının doğrulanması için ROC eğrisi kullanılmıştır ve sonuçlar, ROC değerinin Şekil 6'da gösterilen 0,8 olduğunu göstermektedir (Şekil 22). AUC değeri, AHP yönteminden elde edilen modelimizin mevcut kaya düşmesi alanlarının sınıflandırılmasında yüksek bir doğruluk sağladığını göstermektedir. Bu çalışmada sahadaki kaya düşmesi oluşumları ile yükseklik, eğim, yönelim ve litoloji gibi nedensel faktörler arasındaki mekansal ilişki AHP, İdrisi ve GIS teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir ve sonuçlar kaya düşmesi potansiyeli yüksek ve çok yüksek olan alanlar, Sümela manastırına giden yol boyunca olduğunu göstermektedir.





Şekil 22. Doğrulama için elde edilmiş ROC eğrisi

Receiver Operating Characteristics (ROC) değeri = 0.8

Tablo 10. Roc eğrisi sınıflama tablosu

Eğri altındaki alan	Kategori
0.9 - 1	Çok iyi
0.8 - 0.9	İyi
0.7 - 0.8	Orta
0.6 - 0.7	Düşük
0.5 - 0.6	Çok düşük

Gerçekleştirilen duyarlılık çalışmaları (Lojistik Regresyon ve Analitik Hiyerarşi Süreci) sonucunda elde edilen duyarlılık haritaları, istatistik değerleri, katsayıları ve tutarlılık oranları ve daha sonra gerçekleştirilen doğrulama çalışması (ROC eğrisi) sonucunda alanların ciddi anlamda kaya düşme potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

Ayrıca, Altındere vadisinin kaya düşmesi duyarlılık haritaları, mevcut ve gelecekteki muhtemel kaya düşmeleri hakkında daha fazla bilgi sağlamaktadır. Bu haritalar, kaya düşmesi risklerinin önlenmesini sağlamak ve önleyici ve uygun güvenlik önlemlerini almak için çalışma alanındaki arazi kullanım planlaması ve eğim yönetimi için planlayıcılar ve karar vericiler için yararlı olacaktır.

## 2.4. Uzaktan Algılama ve Yersel Lazer Tarama (Fotogrametri)

Uzaktan algılama teknikleri alanındaki gelişmeler, heyelan ve kaya düşmesi modellenmesi ve duyarlılık çalışmaları için yararlı olan yüksek çözünürlüklü 3B uzaysal

verileri kullanılabilir hale getirmiştir (Fanos ve Pradhan, 2018). Uzaktan algılama, coğrafi koordinatlar atanabildiği için ölçülen özelliklerin coğrafi koordinatlara tabi tutulması gereğidir ve topografik haritaların üretilmesindeki potansiyeli (havadan fotoğrafçılık biçiminde) 1840 yılında önerilmiştir (Khorram vd., 2012).

Pusula, eğimölçer ve bir ölçüm bandı kullanan scanline anketi gibi kaya yamaçlarını karakterize etmenin geleneksel yolu birçok dezavantaja sahiptir çünkü kaya kütlesi yüzeyleri, örnekleme yerinin seçimini etkileyen sınırlı bir erişilebilirliğe sahiptir. Arazi çalışmalarının ve ölçümlerinin tehlikeli, zaman alıcı olma sebebiyle fotogrametri tercih edilmektedir. Fotogrametri, tüm topografyadaki süreksizlikleri 3b olarak hızlı bir şekilde haritalandırabilen, büyük miktarlarda veri toplanmasında erişilmezlik, zaman kaybı ve tehlike sorunlarını gideren, kaya kütlesi özelliklerinin daha temsili ve doğru sonuçları ortaya çıkaran uygun bir yöntemdir. Kaya çıkıntılarındaki düzlemleri tektonik tarih, kaya kütlesi kuvveti, tortu süreçleri vb. gibi birçok yararlı bilgiyi belirtmektedir.

Üç boyutlu ölçme yöntemler geliştikçe, objenin/alanın tamamını veya bir bölümünü elde etmek mümkündür. Bu yöntemler arasında yaygın olarak tercih edilen, ölçülen nesnenin şekline uygun olan ve çalışmanın amacına göre istenilen doğruluk (çözünürlüğe) göre belirlenen yöntemdir. Kompleks çalışmalarda daha fazla hassasiyete (çözünürlüğe) gerek duyulabileceği dikkate alınmalıdır (Alejano vd., 2011).

Büyük projelerde şerit metre ya da lazer metre gibi aletler farklı çalışmalarda yardımcı olmasına rağmen yetersiz kalmaktadır. Çok sayıda veri elde etmek için fazla çaba sarf etmek ve istenilen amaçlara ulaşabilmek için oldukça zordur. Dolayısıyla yersel lazer tarama ve yakın mesafeli fotogrametrik yöntemleri kullanmak daha yararlı olmakla birlikte birçok uygulamada tüm çalışma alanlarının detayların elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Veri toplandığında topografya, bir dizi ayrı yükseklik noktası, eşyükselti kontur eğrileri, 2 boyutlu yükseklik profili veya yükseklik değerine eşit yatay koordinatların bir fonksiyonu olarak sunulabilir, ikincisi genellikle Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) olarak adlandırılır (Redweik, 2012). İçin Yüksek çözünürlüğe sahip olan sayısal yükseklik modeller kaya düşmesi modellemesinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Fratini vd., 2012).

Uzaktan algılayan sensörler, ışık Algılama ve Değişme (LiDAR) ve Diferansiyel SAR İnterferometre (DInSAR) gibi Son on yılda heyelan analizi için önemli bir araç haline gelmiştir (Abellán vd., 2014; Jaboyedoff vd., 2012; Oppikofer vd., 2009; Rosser vd., 2005; Viero vd., 2010).

Lazer tarayıcılar olarak da bilinen LiDAR sensörleri, zemin yüzeyinin üç boyutlu bilgisinin yüksek çözünürlük (104 nokta / m<sup>2</sup>'ye kadar olan noktaların yoğunluğu) ve yüksek hassasiyetli (100 metrede standart sapma <1 cm) elde edilmesini sağlar. Bu tür sistemler yüksek bir yüzeydeki noktaların koordinatlarını (X, Y, Z) yüksek hızda (saniyede 222.000'den fazla ölçüm) önemli ölçüde elde etme mesafesinden (6.000<sup>m</sup>'ye kadar) elde etmeyi sağlar. Bu sensör, süreksizliklerin yönelimi, aralığı, devamlılık ve pürüzlülüğü dahil, küresel ve yerel stabilizasyonu kilit rol oynayan kaya eğimi parametrelerinin edinilmesinde devrim yarattı. 21. yüzyılın başında, bazı yazarlar bir teodolit yardımıyla elde edilen 3B nokta bulutlarından süreksizlik oryantasyonunu doğru bir şekilde elde etme imkanını önermişler (Feng vd., 2001). Diğer bazı yazarlar, normal vektörlerin 2.5B enterpolasyonlu bir seri yüzeyine hesaplanmasını önerdi (Kemeny vd., 2006a; Slob ve Hack, 2004).

Günümüzde Yersel lazer tarama (TLS- Terrestrial Laser Scanning / Scanner) teknolojileri birçok farklı bilimsel uygulamalar için hızla gelişmiş ve yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmalar için gerekli olan doğru ve güncel bilgiler yersel lazer sistemleri yardımıyla elde edilen bilgiler ile oldukça uyumludur. Ulaşılması zor olan alanlar/nesnelere ve onlara ait tüm detaylar yersel lazer tarama ile hızlıca 3 boyutlu bir model elde etmek oldukça kolaydır. Belirtilen özelliklere sahip olma sebebiyle yersel lazer tarama birçok duyarlılık incelemelerinde kullanılmaktadır. Literatürde bu tarama yöntemi ile ilgili çok sayıda kaya düşmesi duyarlılık çalışmaları vardır.

Yersel lazer tarama sonucunda üretilen veriler birçok farklı alanlarda özellikle mühendislik ölçmeleri uygulamalarında ve projelerinde kullanılabilir (Barber, D., 2011), Örneğin:

- ❖ Dış ve iç faktörlerden kaynaklanan kuvvetlerin etkisiyle herhangi bir yapıda tespit edilen deformasyonların incelenmesi
- ❖ Topoğrafik verilerin inceleme sonucunda tespit edilen sel ve taşkın bölgeleri
- ❖ Kaya düşmesi/heyelan veya depremlerin simülasyonu
- ❖ Afet potansiyeli olan ve afetten etkilenmiş olan alanların belgelenmesi
- ❖ Bir yapının yıkılma ve çökme tehlikesi altında olduğunda yapısal analizin gerçekleştirilmesi
- ❖ Ulaşım yollarının ve köprülerin durumunun incelenmesi ve güvenlik analizi yapılması
- ❖ Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında haritalama işleminin gerçekleştirilmesi

- ❖ Herhangi bir yapının restorasyon ve yenilenme işlemi uygulanmadan önceki durumunun kayıt edilmesi ve arşivlenmesi
- ❖ Bir kısmı tahrip olmuş veya değişime uğramış obje, nesne veya yapının mevcut bütün ayrıntılarının kayıt edilmesi
- ❖ Mekansal analizlerin uygulamasında 3 boyutlu veriyi kullanarak yükseklik ve topoğrafik bilgilerin elde edilmesi
- ❖ Yapının veya objenin benzerini elde etme amacıyla 3 boyutlu sayısal modellerinin üretilmesi

### 2.4.1. Çözünürlük

Yersel lazer tarama işlemleri gerçekleştiği zamanda uygun çözünürlük seçimi yapı/nesneye bağlı önemlidir. Çözünürlük, ardarda iki nokta arasındaki uzaklık olarak tanımlanıp ve taram işlemi uygulanan yapı/nesne'nin yüzeyini yansıtan nokta bulutların yoğunluğu proje uygulamalarında farklı çözünürlük isteğine bağlı olarak belirlenir ve bunun sonucunda elde edilen yüzey modelinde en küçük ayrıntı bile belirlenebilir. Projelerde obje/nesnenin büyüklüğüne bağlı çözünürlük değişebilir yani taranacak yüzey büyüdükçe daha fazla veri kümesine gerek duyulur (Santana Q. M. vd., 2008; Barber, D., 2011). Yüksek çözünürlük istendiğinde nokta bulutları sayısı ve buna bağlı olarak elde edilen verilerin depolanması zamanı da artmaktadır.

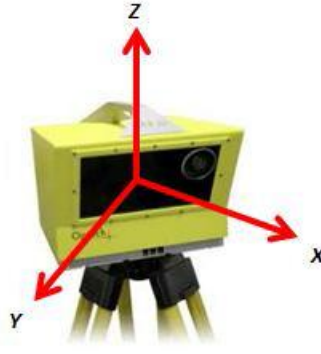
### 2.4.2. Konumlandırma ve Birleştirme

Çalışmalarda bir yapı/objenin tümünü taramak için lazer tarama cihazı farklı noktalarda kurulması gerekir ve her yüzeyin tarama sonucunda nokta bulutları (x,y,z) cihazın kendi koordinat sistemine bağlı olarak elde edilmektedir. Tarayıcının koordinat sistemi (Balis vd., 2004; Reshetyuk, 2006, 2009 ve Gümüş, 2008) X, Y, Z eksenleri olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Şekil 23):

X- Ekseni: Aletin optik ekseni boyunca isteğe bağlı olarak yatay açılı

Y- Ekseni: Önceki iki eksene dik

Z- ekseni: Tarama cihazın dikey (dönme) ekseni boyunca



Şekil 23. Lazer tarayıcı koordinat sistemi

### 2.4.3. 3 Boyutlu Modellerin Üretilmesi (CloudCompare)

(Tung vd., 2018), fotogrametri yazılımı ile yoğun nokta bulutu, dijital yüzey modeli (DSM) ve ortofotoların üretilebileceğinden bahsetmiştir. Yüksek doğrulukta yeniden yapılandırılmış 3B yoğun bulut, milyonlarca nokta bir kaya yüzeyinde, FACET eklentisini kullanarak jeolojik düzlemleri çıkarmak için CloudCompare'e aktarılabilir.

Büyük 3B nokta bulutlarını verimli bir şekilde tek tek düzlem yüzeylerine ayırma, uygun bir yazılım ortamında eksikti. FACETS, düzlemsel faset çıkarma işlemini gerçekleştirmek, eğim ve eğim yönlerini hesaplamak ve çıkarılan verileri interaktif stereogramlarda rapor etmek için CloudCompare bünyesindeki özel bir eklentidir (Dewez vd., 2016).

Yoğun 3 boyutlu nokta bulutu elde etmek on yıl öncesine kadar zorlu bir işti. Nokta bulutlarını üretmek için diğer yazılım parçalarının yanı sıra, CloudCompare (2016), topluluklar arasında yaygın olarak kabul edilen açık kaynaklı bir 3B görselleştirme ve hesaplama yazılımıdır, örneğin: enerji üretim endüstrisi (başlangıçta kaynaklandığı yerde), mühendislik, arkeoloji veya yerbilimleri. Bu nedenle, CloudCompare yıllar boyunca birçok özellik kazanmıştır ve kullanımı kolay olması ve artan özellik seti onu bu topluluklarda standart bir araç olarak belirlemiştir.

Düzlemlerin otomatik olarak çıkarımının daha iyi tekniklerini bulmak devam etmekte ve (Assali vd., 2016; Riquelme vd., 2014; Vasuki vd., 2014) ve bu tür araştırma faaliyetlerinin nedeni, farklı topluluklardan böyle temel öğeye hakim olma doğrultusunda ve oradan devam etme ihtiyacına yakınsak bir evrim olabilir. Birçok projede araştırmacılar birçok farklı ortamda bilgi işlem kodları üretmiştir (Riquelme vd., 2014; Vasuki vd., 2014;

Assali vd., 2016 için bağımsız C ++ yazılımı). Hepsi bir uygulayıcının bakış açısından tam bir jeolojik faset çıkarımı yapmak için çalışıyor, ancak sadece düzlem çıkarma kodunu geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda bun işlemi kullanışlı bir ortamda kapsülleme zorunluluğu da vardır. Araştırma algoritmaları ve programlı şemalar belirli ortamlarda geliştirilmiştir ve hala geliştirilmektedir.

#### 2.4.4. Çalışma Alanlarının Yersel Lazer Taraması

Altındere vadisindeki çalışma lokasyonlarına ait nokta bulutları yersel lazer tarama yardımıyla elde edilmiştir (Şekil 24 ve 25).



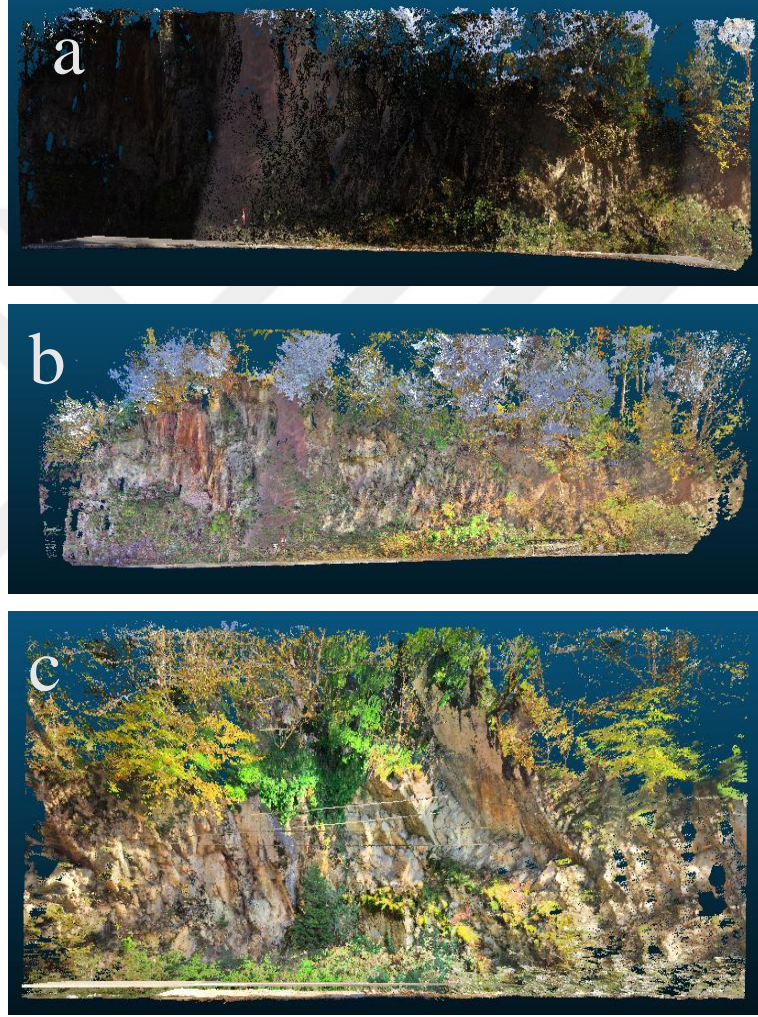
Şekil 24. Çalışma alanlarında kullanılan yersel lazer tarama cihazı



Şekil 25. Çalışma lokasyonlarını yersel lazer tarama cihazı kullanarak tarama

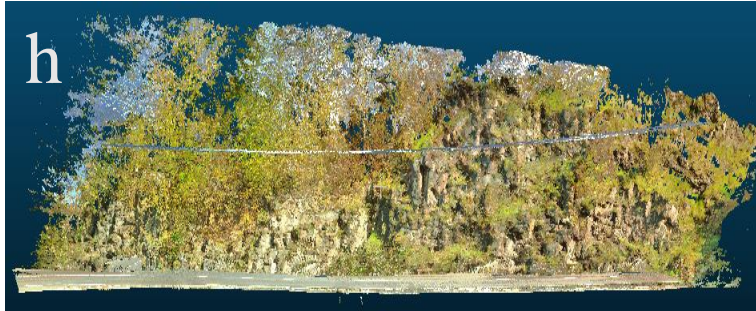
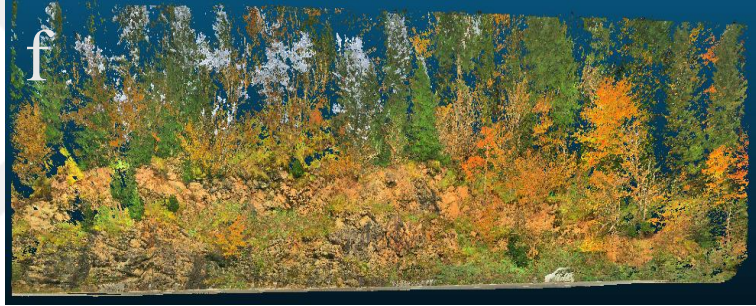
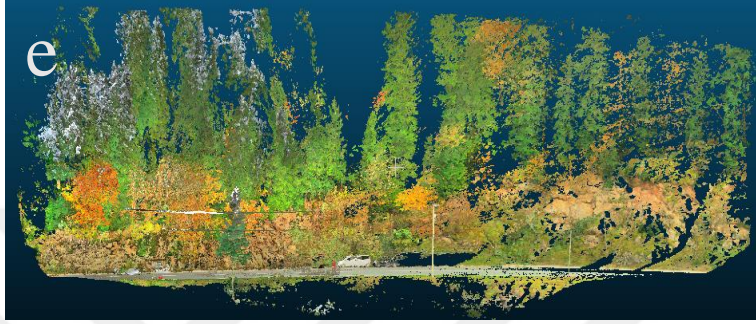
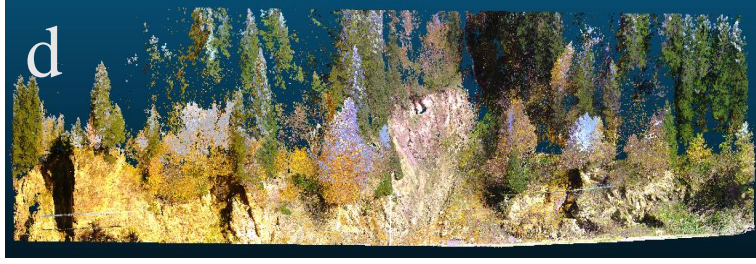
### 2.4.5. Modellerin Boyutlarının Düşürülmesi

Elde edilen nokta bulutları kullanarak 3 boyutlu yüzey elde edilecektir. Bu amaca ulaşabilmek için nokta bulutları CloudCompare programı yardımıyla düşürerek daha küçük boyutlu modeller elde edilmiştir. Bu işlem tüm 11 lokasyon için yapılmıştır.



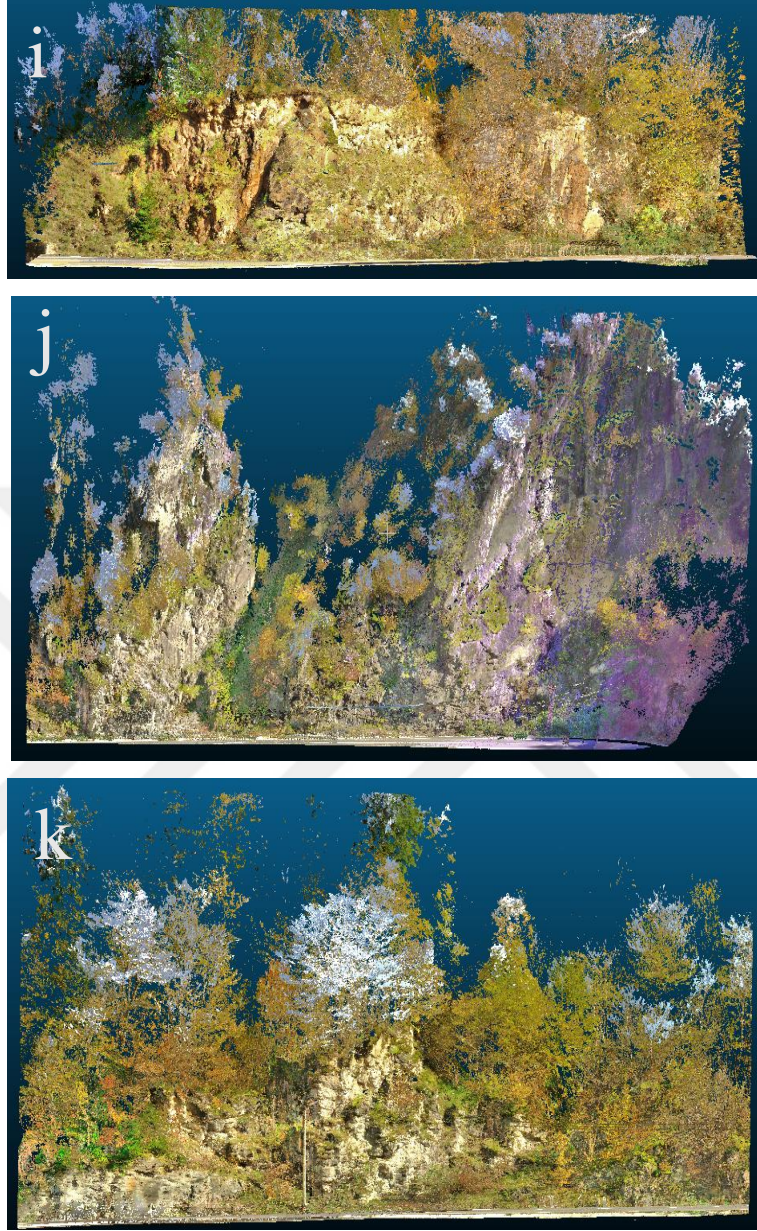
Şekil 26. a) 1. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. b) 2. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. c) 3. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. d) 4. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. e) 5. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. f) 6. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. g) 7. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. h) 8. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. i) 9. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. j) 10. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları. k) 11. alana ait boyutları düşürülmüş nokta bulutları.

Şekil 26'nın devamı





Şekil 26'nın devamı



## 2.5. Süreksizlik İncelemeleri (DSE)

(Dewez vd., 2016) Jeolojik düzlemsel yüzeyler (tabakalaşma, hata, eklem...) kayalıkların tektonik geçmişi çözmek veya tehlikeli bir kaya uçurumunun stabilitesi için temel özellikler olduğunu göstermiştir. Mekansal tutumlarını ölçmek (eğim ve doğrultu) genellikle zaman alıcı ve bir miktar sansür gerektiren bir pusula / klinometre ile elle yapılır

(yani, o zamanlar önemsiz sayılan bazı özellikleri ölçmeyi reddetmek), ancak kırıkların daha yüksekte olması ve biraz tehlikeli olma nedeniyle her zaman mümkün değildir.

Kaya kütlelerinin dayanımı, geçirgenliği ve yüzey ve yeraltı kazılarının stabilitesinde Kaya şevin yüzeyinde bulunan süreksizliklerinin önemli bir denetleyici parametre olmaktadır (Harrison ve Hudson, 2000; Hoek ve Bray, 1981). Bu nedenle, süreksizliklerin özelliklerinin tam olarak anlaşılması, oryantasyonlarını (yani eğim ve eğim yönü) içeren kaya mühendisliği uygulamalarında çok önemlidir.

(Abellan vd., 2014), tipik olarak LiDAR sensörlerinden, 3D sayısallaştırıcılardan, elde edilebileceğinden 3B nokta bulutları kullanarak süreksizlikleri tespit etmek için bir yöntem önermiştir. Gözlenen alanda ham veri noktaları takımı dikkate alındığında (X, Y, Z), eğim yüzeyi çoğunlukla süreksizliklerle tanımlanması halinde yüzey noktaları düzlemleri tanımlayan setler halinde uygun şekilde sıralanabilir. Bu düzlemler süreksizlik takımlarını tanımlar.

Eğimin yüzeyinin veri toplaması, saha çalışması sırasında milyonlarca noktanın elde edilmesiyle birlikte bilgi toplanmasını içermektedir. Bu işlem uzaktan algılama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemlerin kullanılması nokta bulutunun küresel referans sistemine dikey olarak uyum sağlamasına neden olur. Bunun bir sonucu olarak, süreksizlik düzlemlerinin eğimi doğru şekilde çıkarılabilir. Nokta bulutu da kuzeye doğru şekilde yönlendirilebilir, bununla birlikte, nispeten eğimli bir süreksizlik referans sistemi üzerinde çalışırken bu son adım zorunlu değildir (Riquelme vd., 2016).

### **2.5.1. Süreksizlik Seti Çıkarıcısı (DSE)**

DSE, 3 boyutlu yüzey modellerinden süreksizlik setlerinin geometrik bilgilerini yarı otomatik olarak türeyen açık kaynaklı bir yazılımdır (GitHub.com'da mevcuttur). (Riquelme vd., 2016), Süreksizlik Set Çıkarıcısı (DSE), süreksizlik setlerinin sayısını tespit eden, her noktayı süreksizlik seti ve düzlem denklemi ile sınıflandıran ve normal aralıklarını hesaplayan 3D nokta bulutlarını analiz etmeye yardımcı olur.

Süreksizlik Seti Ekstraktörü (DSE) Riquelme ve ark. tarafından geliştirilmiş (2014) ve yarı otomatik yaklaşım kullanarak kaya süreksizliğini tanımlamak, çıkarmak ve analiz etmek için açık kaynaklı bir Matlab tabanlı algoritmadır. Bu Matlab aracı kaya yüzündeki

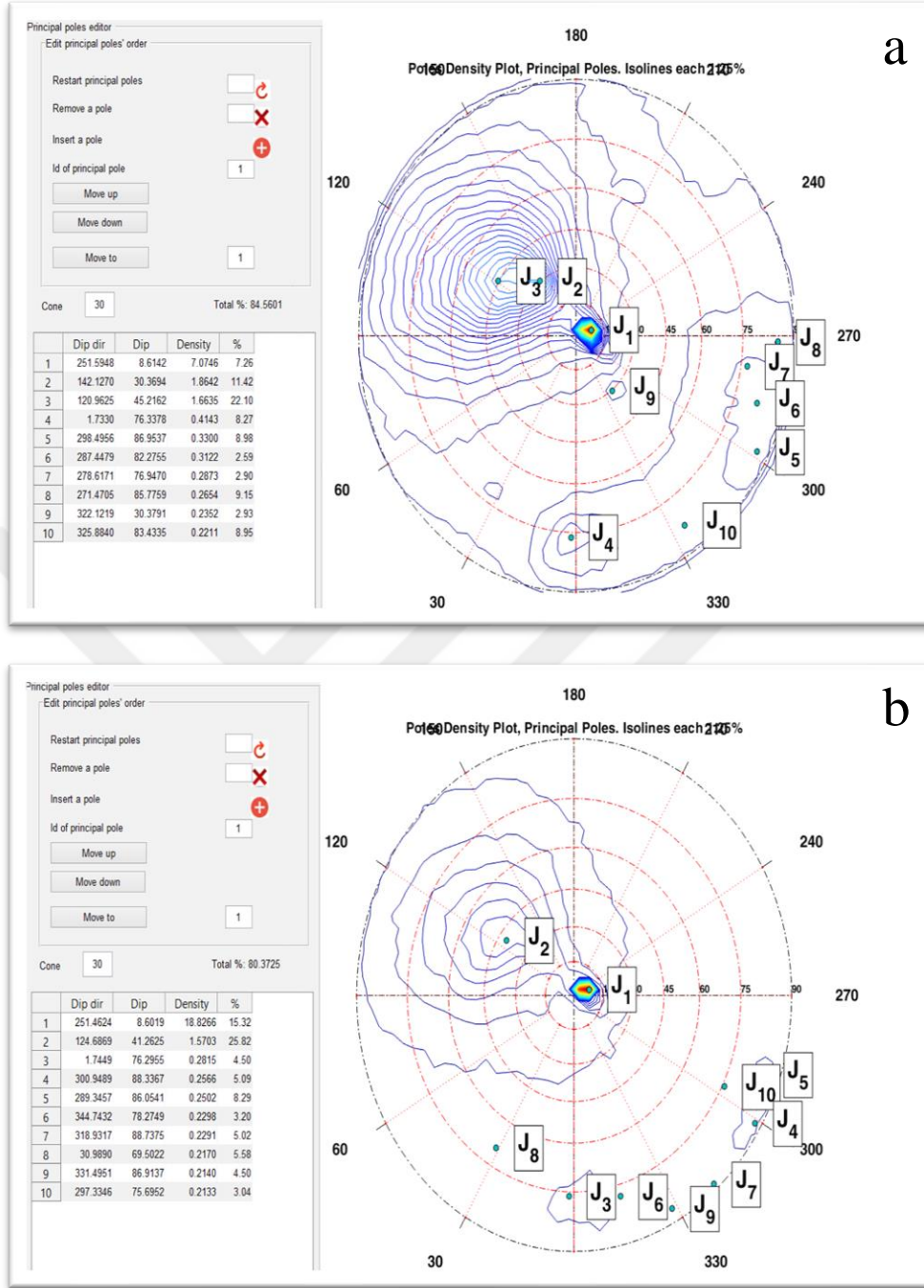
farklı düzlemlerin cebirsel denklemlerini komşu noktalarda bir eşdeğerlik testine dayanan bir analiz uygulayarak, Gürültü ile yoğunluk tabanlı tarama algoritması ile kümeleri belirleyerek ve Çekirdek Yoğunluğu Tahmini (Kernel Density Estimation) tarafından temel yönelimleri bularak belirler (Riquelme vd., 2014). DSE, nokta bulutu verilerindeki her noktada depolanan tüm 3B bilgilerinin, analizi diğerlerinin çoğunun yaptığı gibi basitleştirilmiş yüzey modellerine dayandırmak yerine normal vektörleri hesaplamak için kullanıldığından, diğer programlara göre geliştirilmiş bir doğruluk sağlamaktadır (bunun nasıl gerçekleştirildiğine dair daha fazla ayrıntı Riquelme vd., (2014)). DSE ve diğer programlar arasındaki bir diğer önemli fark, DSE'nin her bir süreksizlik yüzeyinin kaydedilmesinin aksine istatistiksel olarak önemli süreksizlik setlerinin tanımlanması ve haritalandırılmasına odaklanmasıdır.

Bu çalışmada açık kaynaklı yazılım Süreksizlik Seti Çıkarıcısı (DSE) kullanılmıştır. Bu yazılım, veri kümesinin her bir noktasını analiz eder, en yakın komşularını arar ve bu alt kümenin en uygun düzlemini hesaplar. Bu noktanın alt kümesinin eşdüzeliği analiz edilir ve eğer yeterli düzlemsel ise, normal vektörün kutbu bir stereonet içinde hesaplanır. Bu işlem tam veri kümesi için yapıldıktan sonra, bir yoğunluk fonksiyonu elde edilir. Bu yoğunluk fonksiyonunun analizi, yüzeyin düzlemsel yönelimlerini belirlememizi sağlar. Kullanıcı sınıflandırılmış nokta bulutunu incelerken, denetimli bir süreç kullanarak süreksizlik seti yönelimleri çıkarılır. Daha sonra, her nokta karşılık gelen süreksizlik setine atanır. Sonuç olarak, her bir süreksizlik seti için, maruz kalan bir düzlemin (daha sonra küme olarak adlandırılır) nokta üyeleri grubu elde edilir. Düzlemsel bir çıkıntının üyesi olan bu kümelerin düzlem denklemini aşağıdaki formülü kullanarak hesaplamak mümkündür:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \quad (1)$$

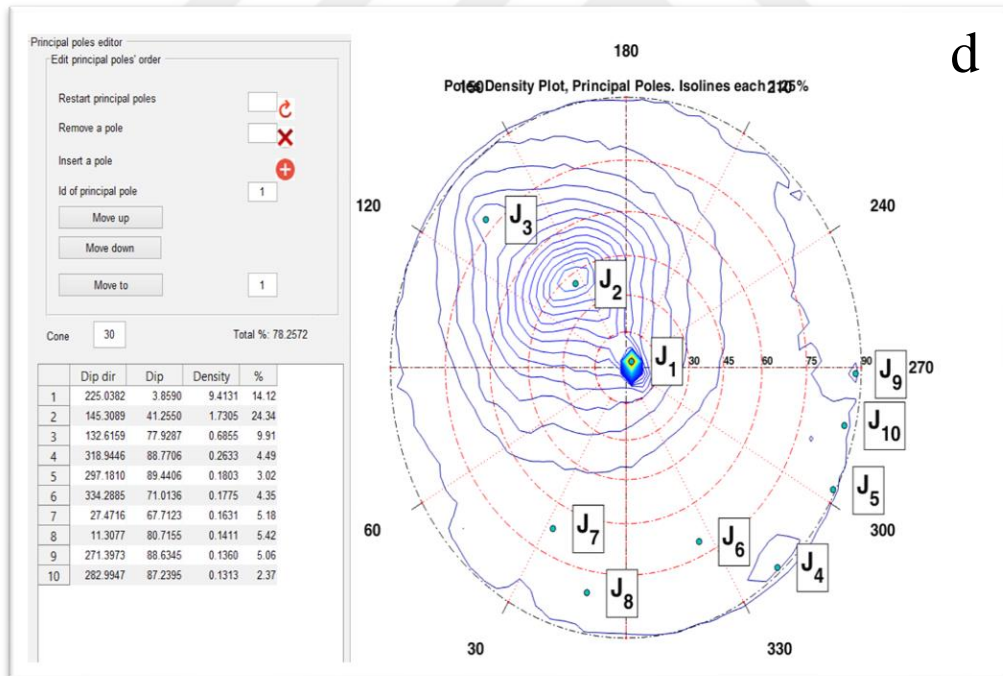
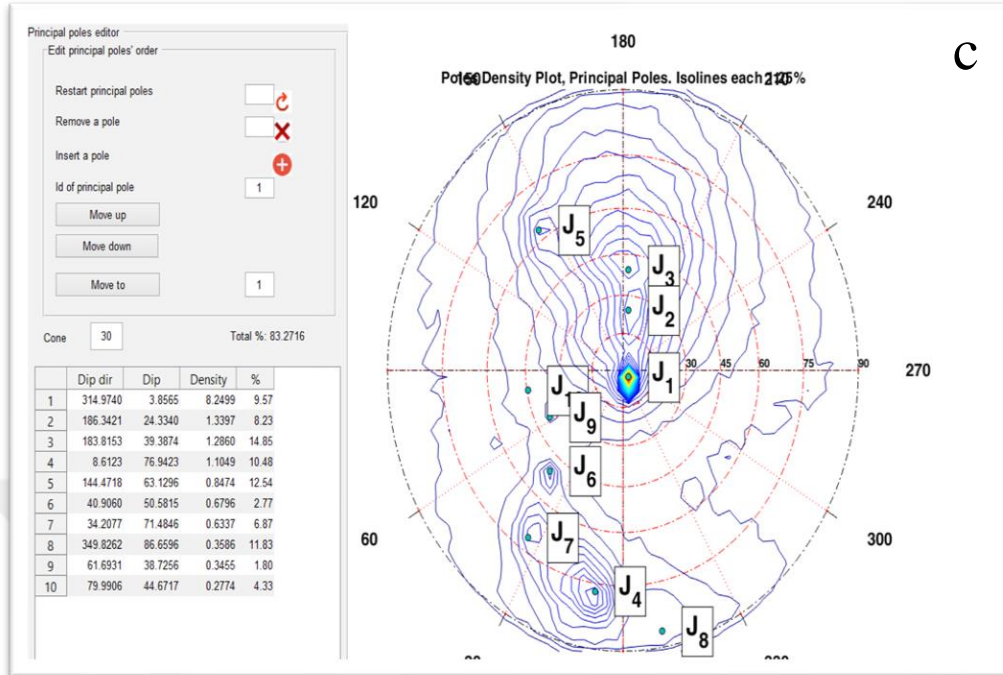
### 2.5.2. Süreksizlik Takımların Belirlenmesi

Tekrardan elde edilmiş noktaları kullanarak Discontinuity Set Extractor (DSE) ortamında yüzeydeki süreksizlik takımları tespit edilmiştir.

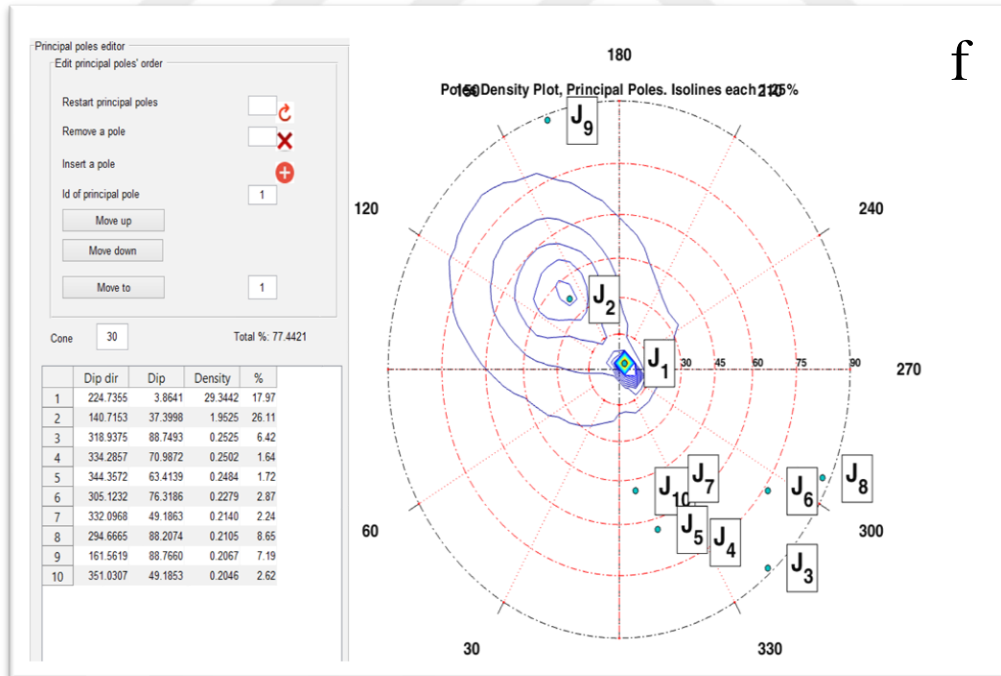
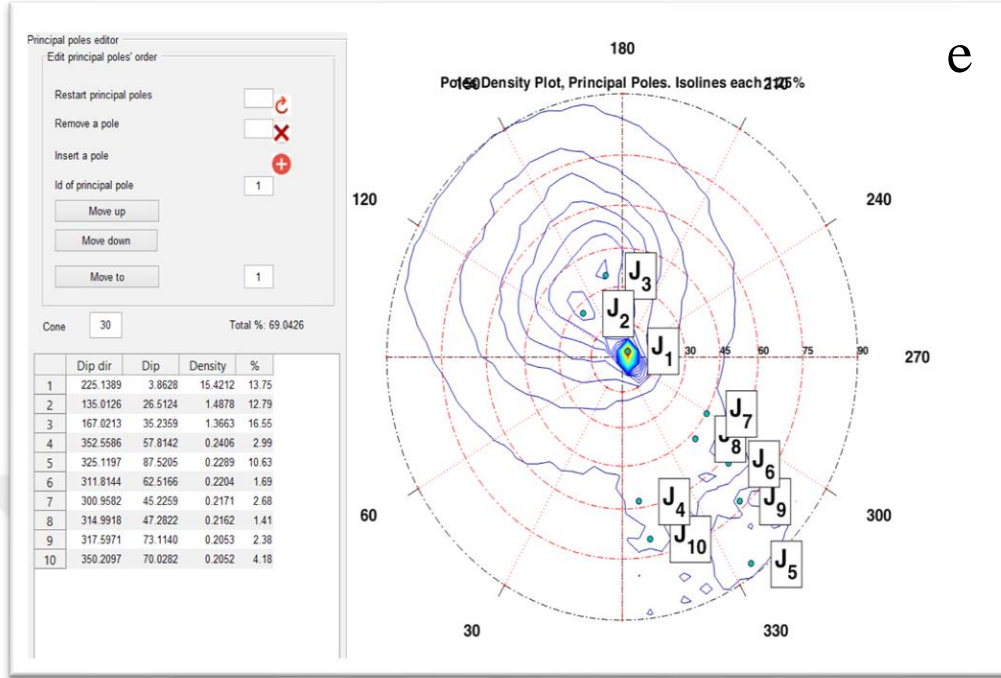


Şekil 27. a) 1. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. b) 2. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. c) 3. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. d) 4. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. e) 5. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. f) 6. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. g) 7. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. h) 8. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. i) 9. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. j) 10. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı. k) 11. alanın süreksizlik takımları, eğimi ve eğim yönü açısı

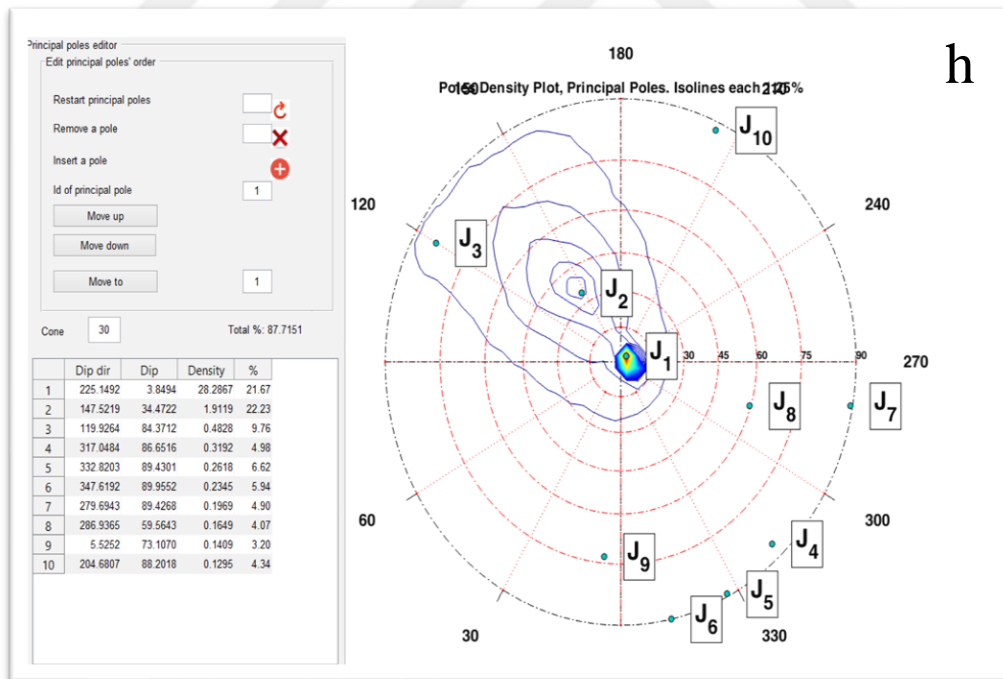
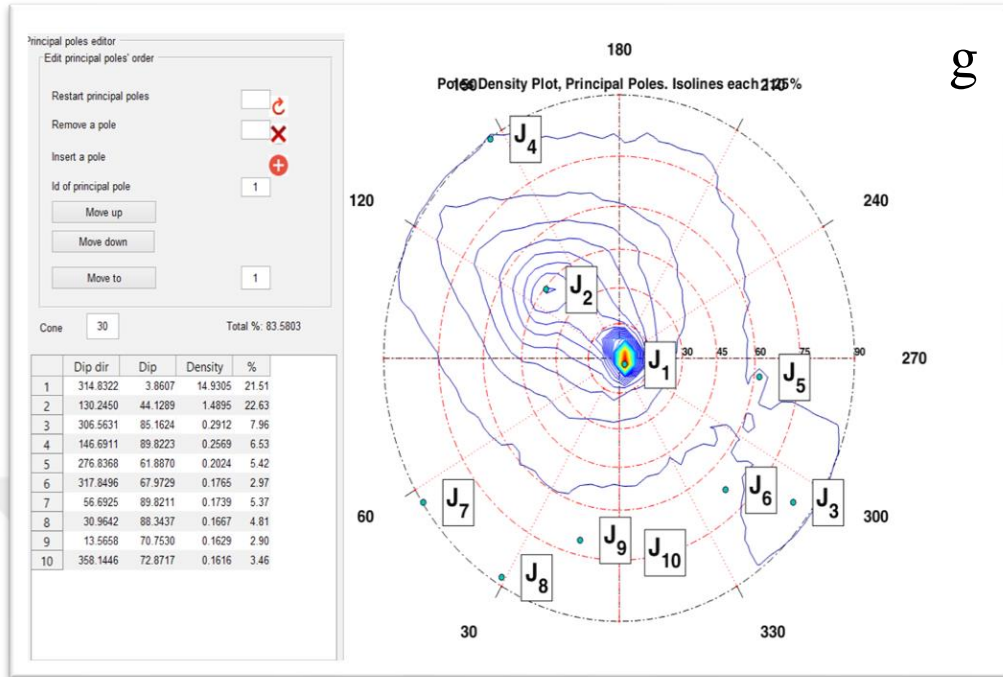
Şekil 27'nin devamı



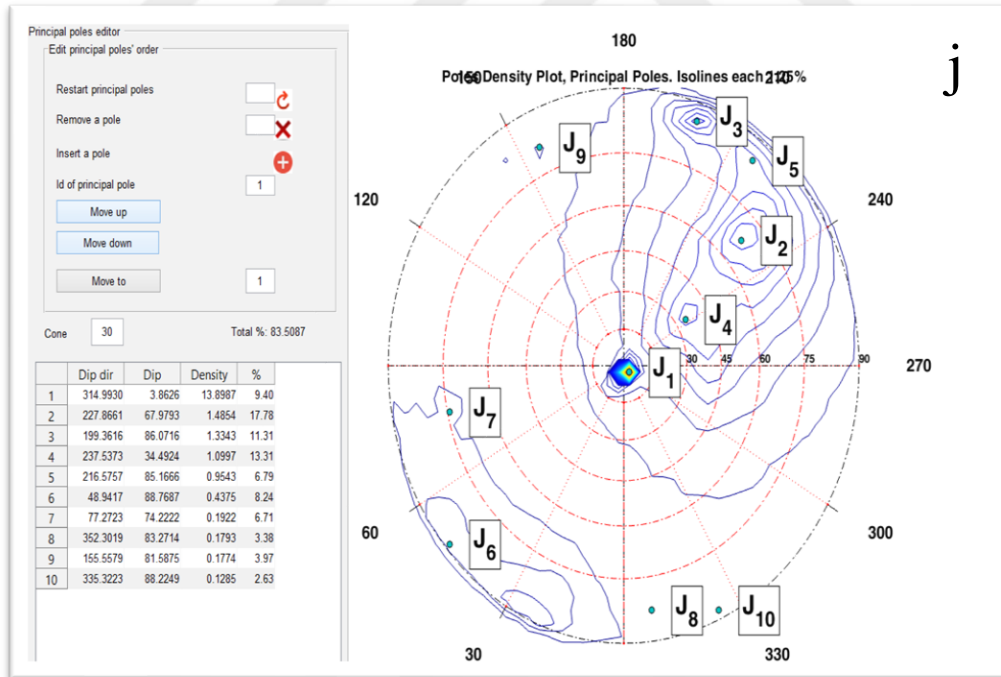
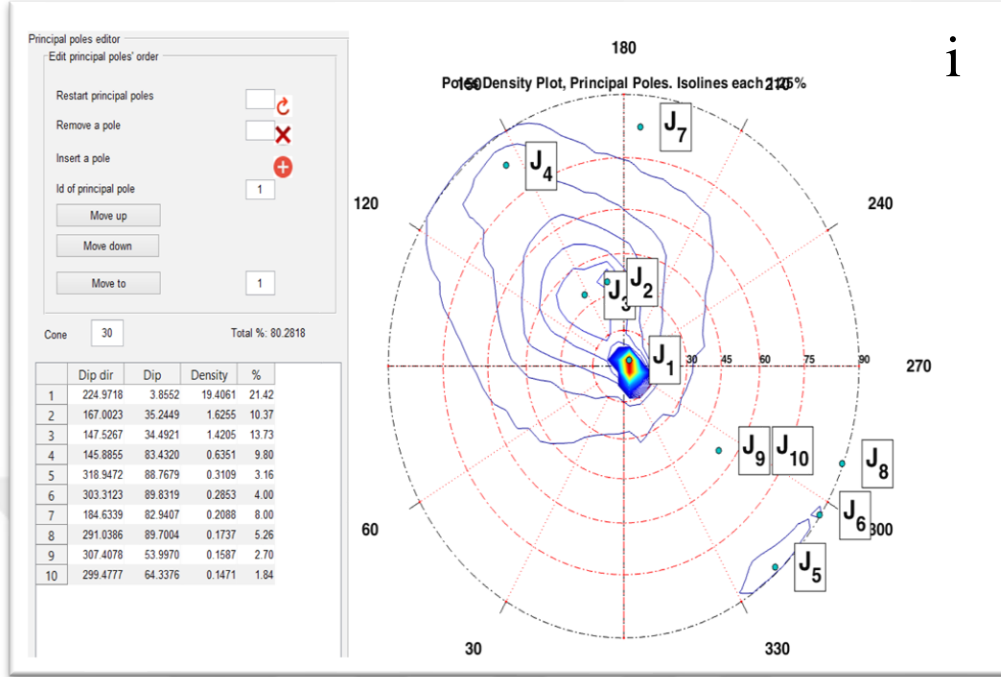
Şekil 27'nin devamı



Şekil 27'nin devamı

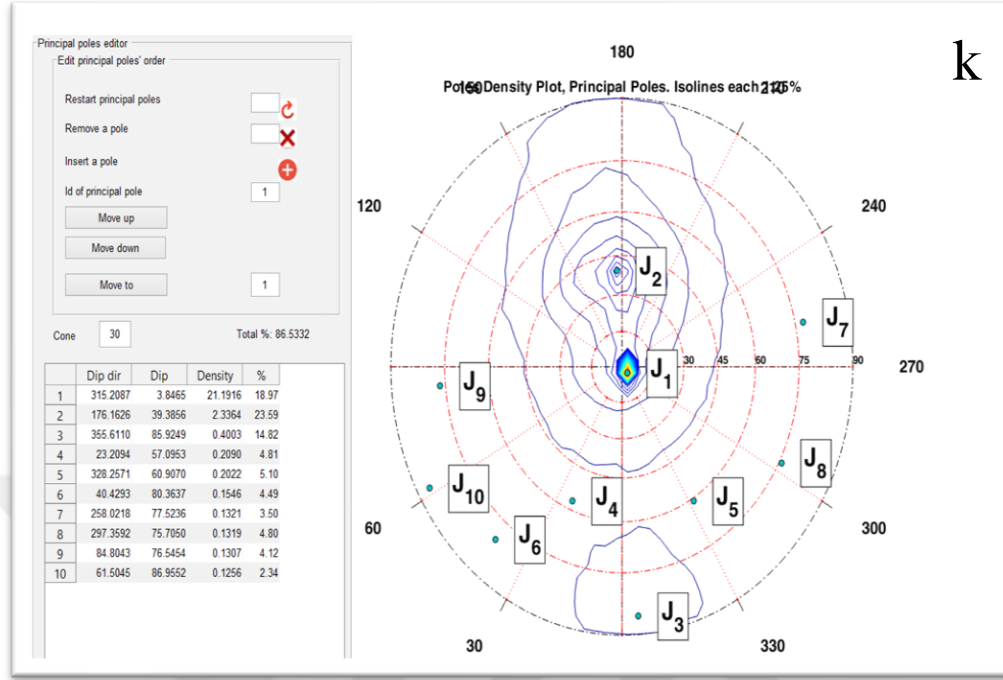


Şekil 27'nin devamı





## Şekil 27'nin devamı

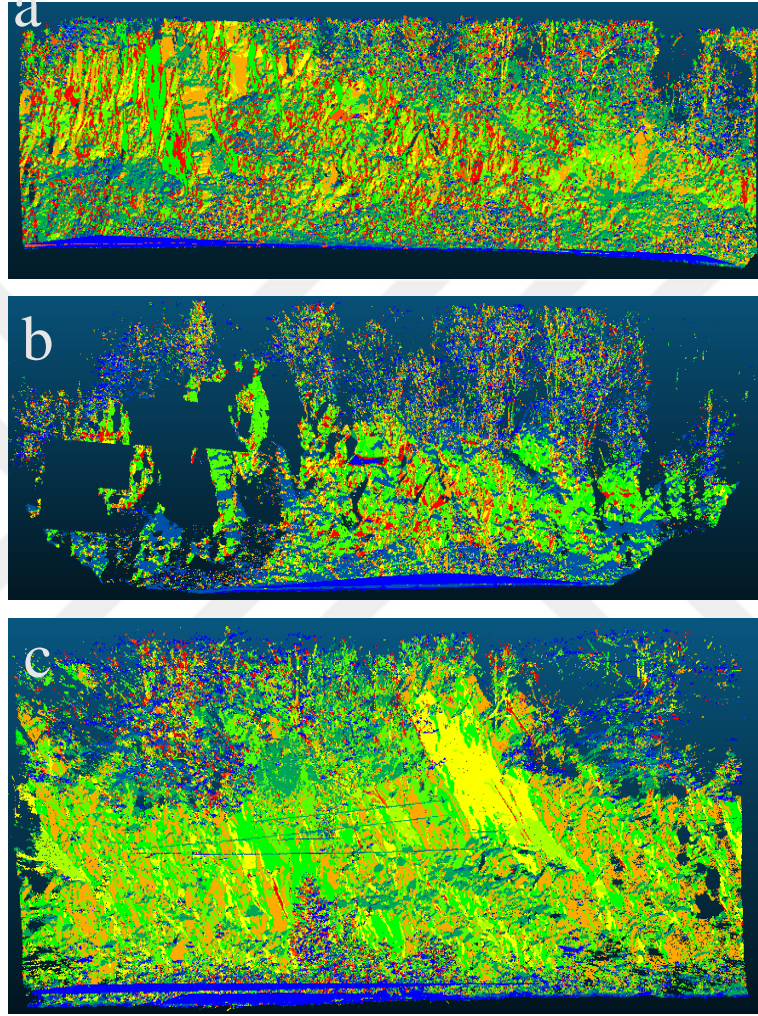


Bu çalışma sonucunda yoğunluğu yüksek olan süreksizlik takımları tespit edilmiştir. Alanlara ait süreksizlik takımları aşağıdaki tabloda getirilmiştir (Tablo 11).

Tablo 11. Alanlara ait yoğunluğu yüksek olan süreksizlik takımları

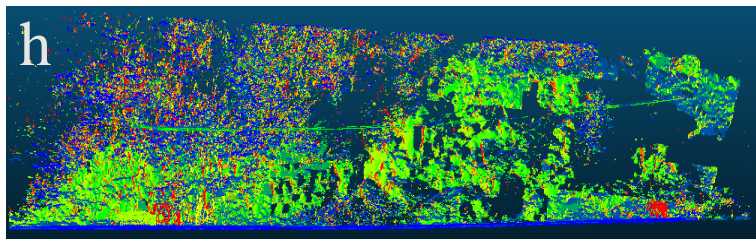
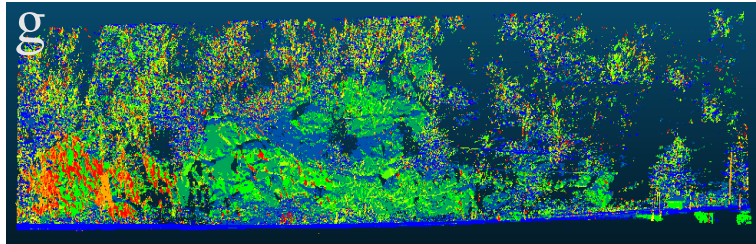
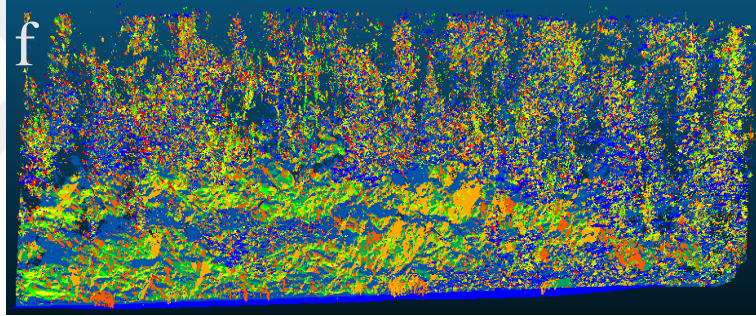
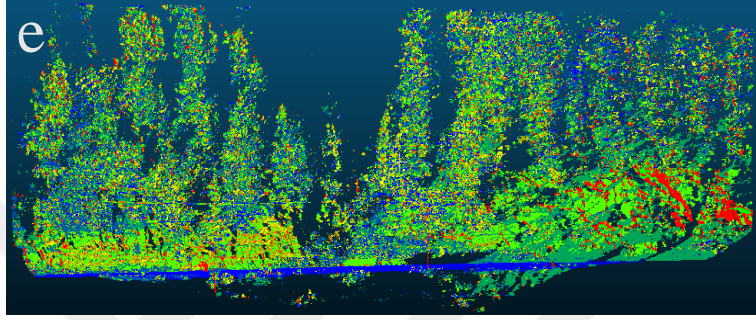
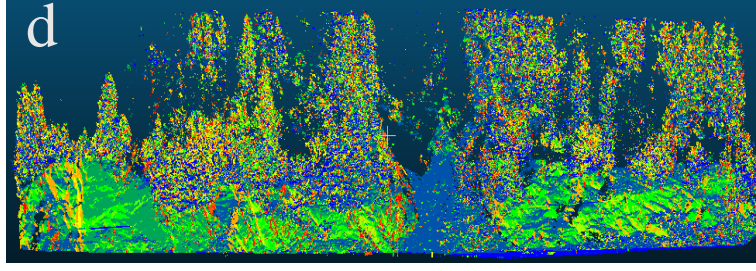
Çalışma alanı	Takım Sayısı	Eğim/ Eğim yönü açısı
1. Lokasyon	5 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> , J <sub>6</sub> )	8°/251° - 30°/142° - 45°/121° - 76°/2° - 82°/287°
2. Lokasyon	4 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> ,)	8°/251° - 41°/124° - 76°/2° - 83°/301°
3. Lokasyon	6 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> , J <sub>6</sub> , J <sub>7</sub> )	4°/315° - 24°/186° - 39°/184° - 77°/9° - 51°/41° - 71°/34°
4. Lokasyon	3 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> )	4°/225° - 41°/145° - 78°/133°
5. Lokasyon	4 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>5</sub> )	4°/225° - 26°/135° - 35°/167° - 87°/325°
6. Lokasyon	2 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> )	4°/225° - 37°/141°
7. Lokasyon	2 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> )	4°/315° - 44°/130°
8. Lokasyon	2 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> )	4°/225° - 34°/147°
9. Lokasyon	4 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> )	4°/225° - 35°/167° - 34°/148° - 83°/146°
10. Lokasyon	5 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> , J <sub>4</sub> , J <sub>6</sub> )	4°/315° - 68°/228° - 86°/199° - 34°/237° - 89°/49°
11. Lokasyon	3 (J <sub>1</sub> , J <sub>2</sub> , J <sub>3</sub> )	4°/315° - 39°/176° - 86°/355°

Belirlenmiş olan süreksizlik takımları Cloud Compare ortamına aktarılıp ilerleyen çalışmalarda incelenecektir. Ayrıca, Çalışmaların devamında her alandaki şev'in genel eğim ve eğim yönü açısı Cloud Compare programı yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 28 ve 29).

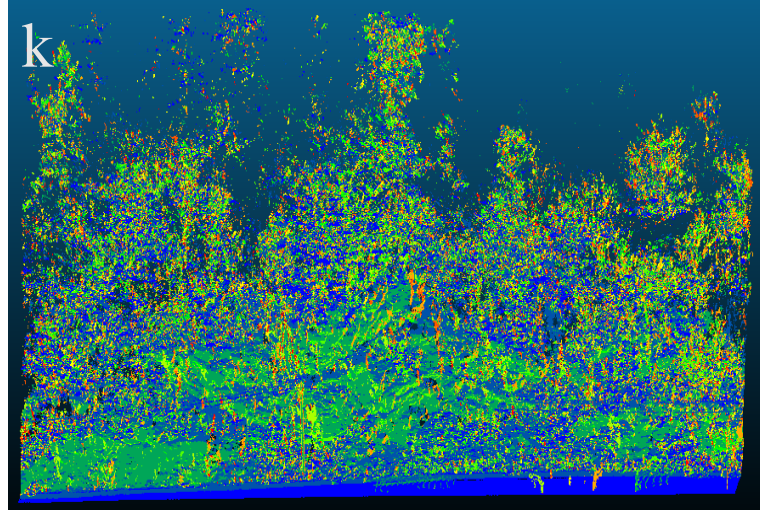
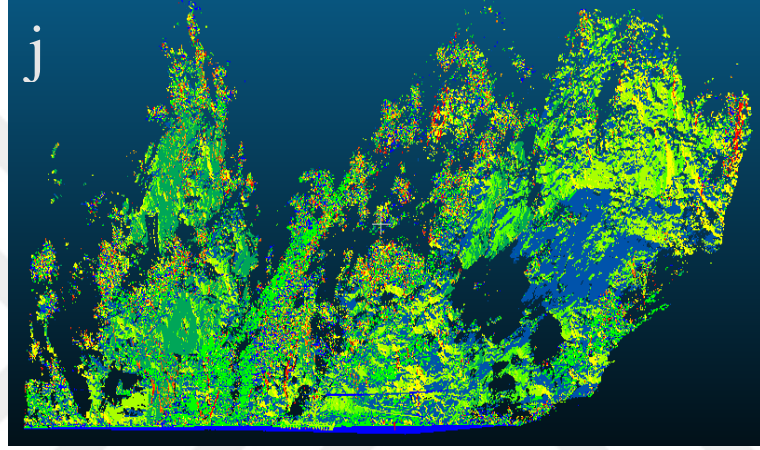
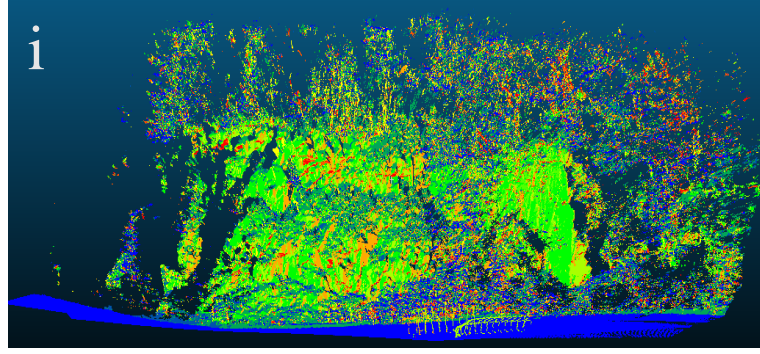


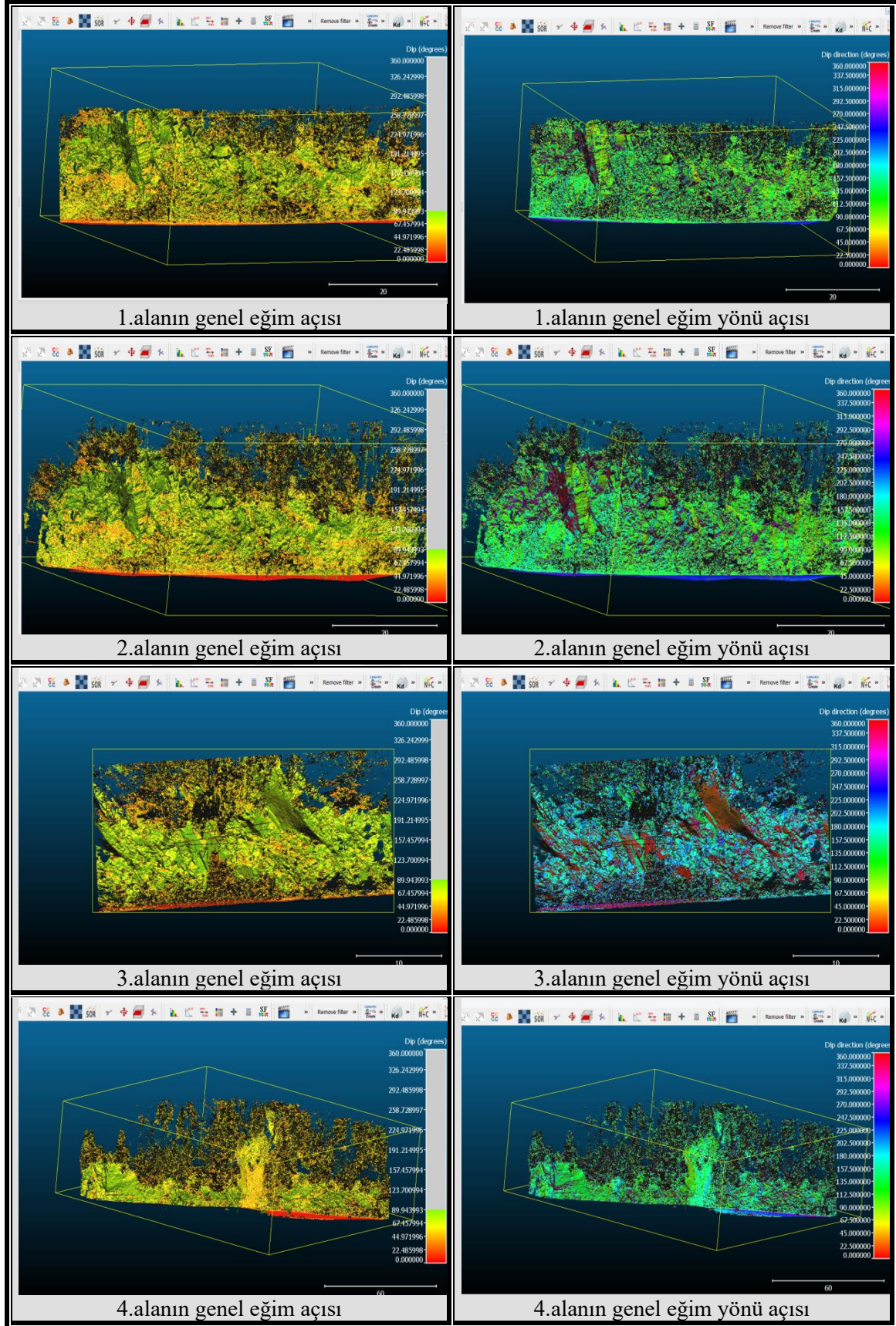
Şekil 28. a) DSE programından elde edilen 1. alandaki süreksizlik takımları. b) DSE programından elde edilen 2. alandaki süreksizlik takımları. c) DSE programından elde edilen 3. alandaki süreksizlik takımları. d) DSE programından elde edilen 4. alandaki süreksizlik takımları. e) DSE programından elde edilen 5. alandaki süreksizlik takımları. f) DSE programından elde edilen 6. alandaki süreksizlik takımları. g) DSE programından elde edilen 7. alandaki süreksizlik takımları. h) DSE programından elde edilen 8. alandaki süreksizlik takımları. i) DSE programından elde edilen 9. alandaki süreksizlik takımları. j) DSE programından elde edilen 10. alandaki süreksizlik takımları. k) DSE programından elde edilen 11. alandaki süreksizlik takımları.

Şekil 28'in devamı



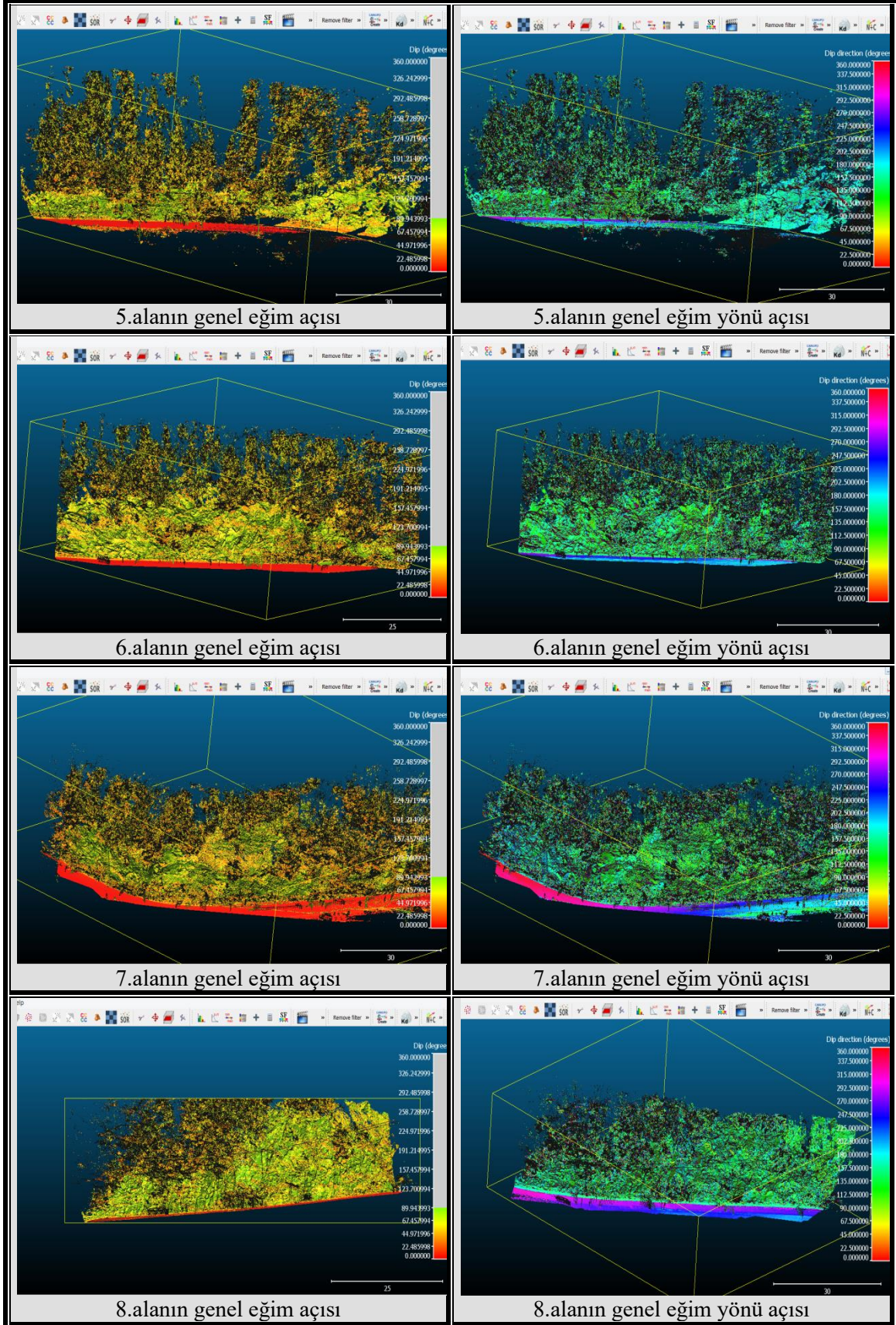
Şekil 28'in devamı



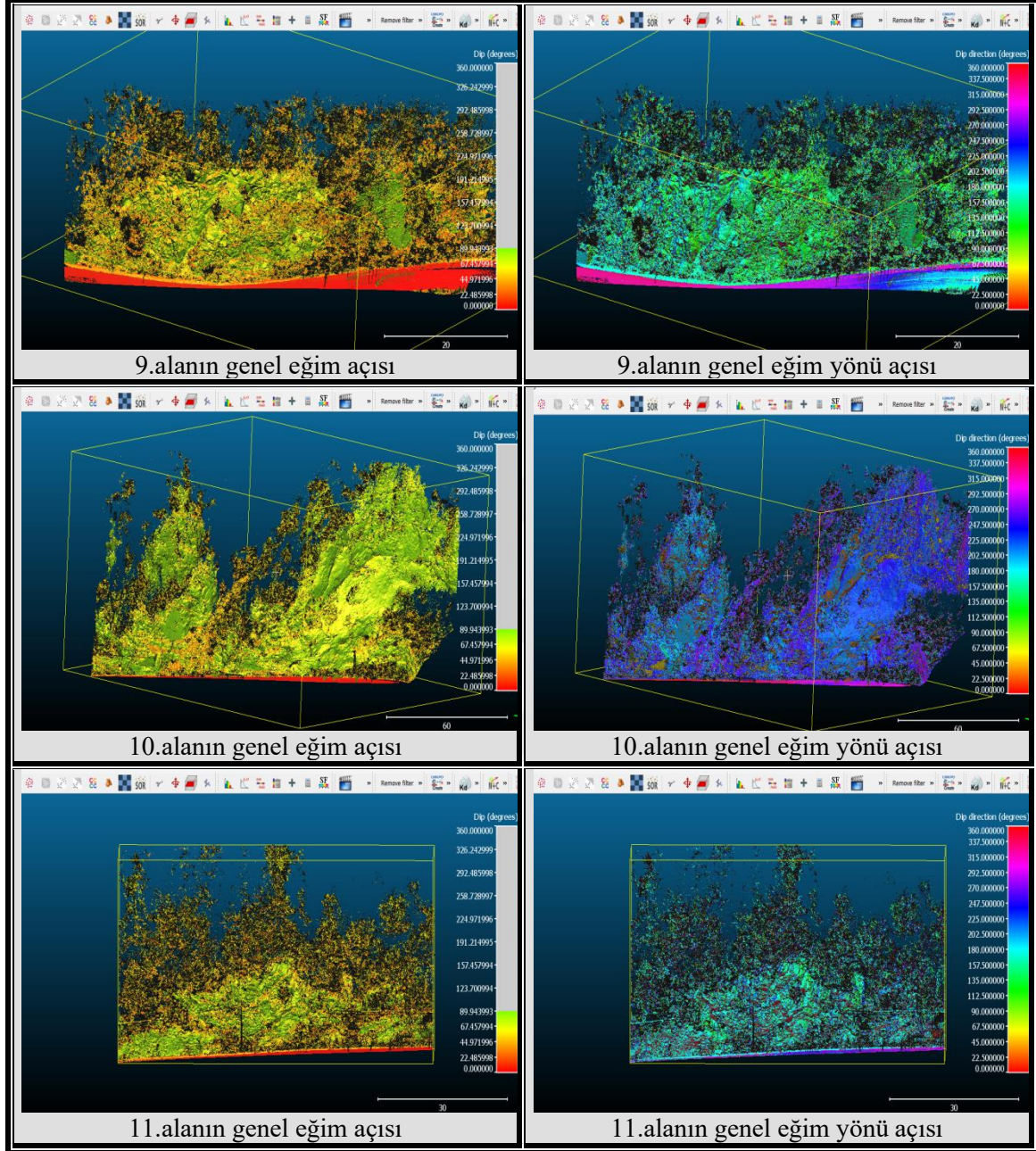


Şekil 29. Cloud Compare programından elde edilen alanlara ait genel eğim ve eğim yönü açısı

Şekil 29'un devamı



## Şekil 29'in devamı



## 2.6. Kinematik Analizi

Yapısal süreksizlikler, jeolojik özellikler ve uygulanan iç ve yüzey kuvvetleri kaya şev stabilitesini kontrol eden başlıca faktörlerdir. Süreksizlikler, parçalanma ve zayıflık düzlemleri ile kaya kütesinin gücünü azaltır ve kesişme ve yönelimiyle potansiyel yenilme tiplerini yönetir. Anizotropiler ve bunların karşılıklı etkileşimleri, kaya düşmesi tehlikesi, yenilme mekanizmaları ve kontrol faktörlerinin değerlendirilmesi için haritalandırmaya ihtiyaç duyar. Geleneksel olarak bu, “süreksizliklerin sistematik ve kantitatif tanımı” için jeolojik bir pusula kullanılarak gerçekleştirilir (Danzi vd., 2012).

Kaya şev stabilitesinin araştırılması için kinematik analiz, limit denge analizi, kaya kütle sınıflandırma sistemi (SSPC sistemi) ve olasılık analizi de dahil olmak üzere çeşitli teknikler mevcuttur (Ulusay vd., 2001; Park vd., 2005; Pantelidis, 2009; Alejano vd., 2009). Genellikle stereografik projeksiyon yöntemi kullanılarak kinematik analizi hemen hemen tüm kaya şev stabilitesi analizlerinde ayrıntılı çalışma yapılmadan önce yapılır (Kulatilake vd., 2011; Aksoy vd., 2007). Kinematik analizi, eklemli kaya kütesindeki olasılık ve yenilme tiplerini belirlemek için süreksizlik düzlemleri arasında açısız etkileşimler kullanan geometrik bir yöntemdir (Kliche, 1999; Yoon vd., 2002; Kim vd., 2002; Iqbal vd., 2013).

Geçmişte yapılan çalışmalar çeşitli şev stabilitesi araştırma teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Aydan ve Kawamoto, 1992; Bobet, 1999; Yoon vd., 2008; Kentli ve Topal, 2004; Yang ve Zou, 2006; Kulatilake vd., 2011; Iqbal vd., 2013; Abu Bakar vd., 2015) arasında, kaya eğimi yenilme analizi için geleneksel kinematik ve sınırlayıcı denge yaklaşımlarını kabul etmişlerdir.

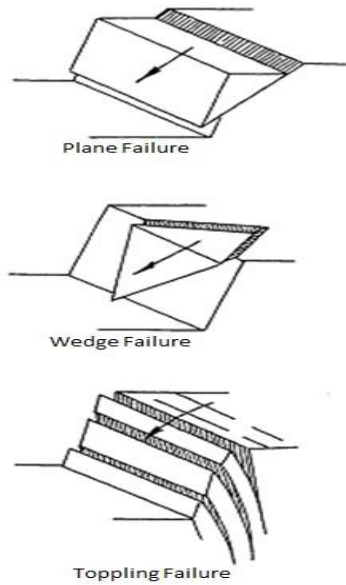
Kinematik analizi, kaya şevlerini stabilitesini analiz etmek için kullanılmaktadır. En sık görülen ve iyi tanımlanmış üç yenilme türler şunlardır: düzlemsel, kama tipi ve devrilme (Davis ve Reynolds, 1996; Dorren vd., 2013; Goodman, 1989; Hoek, 2006; Hudson ve Harrison, 2005; Lambert ve Nicot, 2013; Rocscience, 2018; Selby, 1993; Stead ve Wolter, 2015; Volkwein vd., 2011; Wyllie ve Mah, 2004). Süreksizlikler, şev yenilmelerini tetikleyen derzler, faylar, yatak düzlemleri, yapraklanma gibi jeolojik faktörlerdir.

Önceki çalışmalarda, genellikle testere ile kesilmiş düzlemsel yüzeylerde (Ulusay ve Karakul, 2016; Ruiz ve Li, 2014) bir eğim testi kullanılarak doğrudan ölçülür veya orijinal taze kaya yüzeylerindeki doğrudan kesme testlerinin (Hencher ve Richards, 2015; Aydan



vd., 2016) sonuçlarına dayalı olarak analiz edilir. Bir eğim testinden belirlenen biçilmiş yüzey veya diğer yapay olarak düzleştirilmiş yüzeyler için mukavemetin, doğal eklemler üzerinde doğrudan kesme testlerinden ölçülen  $\phi$ 'den daha düşük olduğu bildirilmesine rağmen (Hencher, 1995; Hencher ve Richards, 1989) tilt testi, doğrudan kesme testlerine kıyasla çok daha ucuz ve daha pratik bir yöntemdir. Bu sebeple, arazide ve laboratuvarında gerçekleştirilebilen tilt testi genellikle farklı kayaların temel sürtünme açısını belirlemek için kullanılır. Tilt testinin sonuçlarını birçok faktör etkiler. Çeşitli faktörlerden etkilenen ve hatta düzlemsel yüzeyler için bile oldukça değişken olabilen test sonuçları, farklı yüzey dokuları, hava koşulları, nem, boyut ve yüzeyin mineral kaplaması için büyük farklılıklar göstermektedir (Hencher, 2012, 2015; Hencher vd., 2011).

Dips programı Facet sonuçlarının kinematik analizleri için Stereonet ile birlikte yönlendirilmiş yapısal jeolojik verilerin görselleştirilmesi, sınıflandırılması, araştırılması ve şekillendirilmesi için kullanılmıştır (Allmendinger, 2017; Rocscience, 2017). Dips, yenilme mekanizmaları ile ilgili jeolojik odaklı verilerin analizini yapmaktadır. Tüm yönlerde eklem setlerini kümelendirip sınıflandırılabilir ve kama tipi, devrilme ve düzlemsel yenilme açısından analiz edilebilir (Rocscience, 2018; Wyllie ve Mah, 2004). Eğimlerde ana blok yenilme tipleri: a) Düzlemsel Yenilme b) Kama Tipi Yenilme c) Devrilme (Wyllie ve Mah, 2005).



Şekil 30. Süreksizliklerin yenilmeleri (Hoek ve Bray, 1981'den sonra değiştirilmiştir)

### 2.6.1. Düzlemsel Yenilme

Bir düzlemsel yenilme, süreksizlik eğim yüzeyi ile aynı yönde ( $20^\circ$  içinde) olduğunda, eğim açısından daha düşük ancak yenilme düzlemi boyunca sürtünme açısından daha büyük bir açıda (Hoek ve Bray, 1981) olması muhtemeldir. Düzlem duraysızlığın kinematik fizibilitesini dikkate almak için, gerekli dört ancak basit kriter tanımlanır:

- (a) Eğim, potansiyel kayma düzleminin eğimini aşmalıdır;
- (b) Potansiyel kayma düzlemi, eğim düzlemi ile aynı yönde olmalıdır;
- (c) Potansiyel kayma düzleminin eğimi, düzlemin gücüne erişilecek şekilde olmalıdır;
- (d) Kayan düzlemin eğim yönü, eğim yönünün yaklaşık  $\pm 20^\circ$  'sinde olmalıdır.

### 2.6.2. Kama Tipi Yenilme

İki süreksizliğin kesişme çizgisinde, kama şeklindeki bloğu oluşturan bir kama tipi yenilme oluşabilir (Hoek ve Bray, 1981). Kama tipi duraysızlığın kinematik fizibilitesini dikkate almak için, gerekli üç ancak basit kriter tanımlanır:

- (a) Eğim, iki kamayı oluşturan süreksizlik düzleminin kesişme çizgisinin eğimini aşmalıdır;
- (b) Kesişme çizgisi, eğim düzlemi ile aynı yönde olmalıdır;
- (c) Kesişme çizgisinin eğimi, düzlemlerin gücüne erişilecek şekilde olmalıdır.

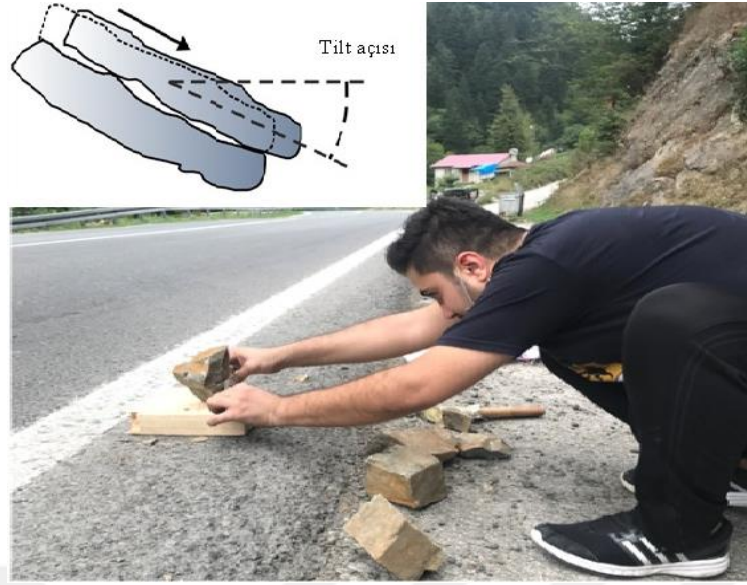
### 2.6.3. Devrilme

Yapısal olarak kontrol edilen eğim duraysızlığının nihai temel mekanik modu, devrilme yenilmesi olarak adlandırılır. Dik bir süreksizlik eğim yüzeyine paralel olduğunda ( $30^\circ$  içinde) ve içine düştüğünde bir devrilme yenilmesi ortaya çıkabilir (Hoek ve Bray, 1981). Goodman'a (1989) göre, devrilme yenilmesi katmanlar arası kayma hareketini içerir. Goodman'a (1989) göre bir devrilme yenilmesi meydana gelme şartı şöyledir: Katmanların sürtünme açısı  $\Phi_j$  ise, kayma ancak uygulanan kompresyonun yönü, katmanlara normal olan sürtünme açısından daha büyük bir açı yaparsa gerçekleşir. Bu nedenle, tabakalar arası

kaymanın ön koşulu, normallerin eğim düzleminin üzerinde  $\Phi_j$  eğimli bir çizgiden daha az eğimli olmasıdır. Katmanların eğimi  $\sigma$  ise, eğimli bir yamacın yatay ile  $\alpha$  derece,  $(90 - \sigma)$   $\Phi_j < \alpha$  "olması durumunda devrilme yenilmesi oluşabilir. Devrilme genellikle iki şekilde gerçekleşir:

- 1) Direk (direkt) devrilme- bir bloğun ağırlık merkezi, bloğun tabanının ana hattının dışında kaldığında ortaya çıkar ve sonuçta kritik bir devrilme momenti gelişir.
- 2) Eğilme (esnekli) devrilme- tabakalı bir kaya kütlesi bir kaya eğiminde üst üste geldiğinde ve eğim yüzeyine paralel olan ana gerilim, bozulmamış kayanın kırılmasına ve ortaya çıkan blokların devrilmesine neden olan katmanlar arası kaymayı indüklediğinde belirli koşullar altında ortaya çıkar.

Wyllie ve Mah (2004), üç kaya eğimi için süreksizlik yönelim verisini analiz etmek için belirtildiği gibi birleşik kinematik analiz yaklaşımı kullanılmıştır. Her eğim için ölçülen değerler (bu süreksizlik yüzeylerinin eğimi ve eğim yönü açısı), DIPS (5.1) yazılım paketi (DIPS User's guide) kullanılarak stabilite (duraylılık) açısından analiz edilmiştir. Bu stabilite analizi için sürtünme açısının belirlenmesi için Tilt testi uygulanmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için süreksizlik içeren iki kaya parçası üst üste koyulup bir taraftan yavaşça kaldırılmıştır. Üsteki kaya parçası kaymaya başladığı an yatay ile oluşturduğu açı tespit edilmiştir. Araziye gerçekleştirilen (laboratuvara ortamında da yapılabilen) boyutları 10-20 cm arasında olan kaya blokları bu test için seçilmiştir. Kaya bloklarının yüzey pürüzlülüğü ile değişen kayma açısı her bir şev yüzeyi için 10 kere tekrarlanıp ortalaması alınarak sürtünme açısı belirlenmiştir. Akgün ve Alizadeh arazi çalışmalarına dayalı tüm lokasyonlar için Tilt testi kullanarak sürtünme açısı belirlenmiştir (Şekil 31).

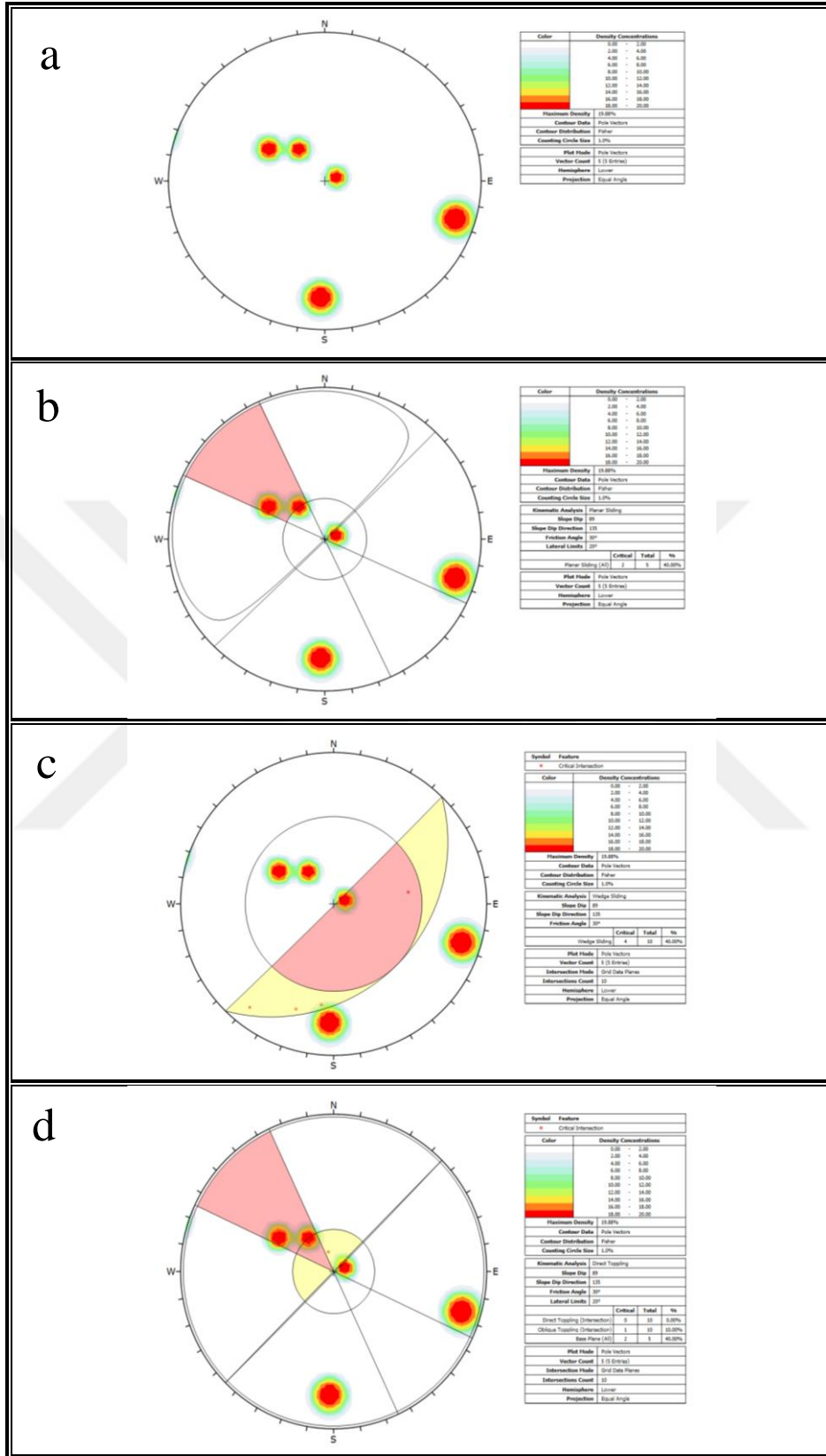


Şekil 31. Arazide uygulanan Tilt testi

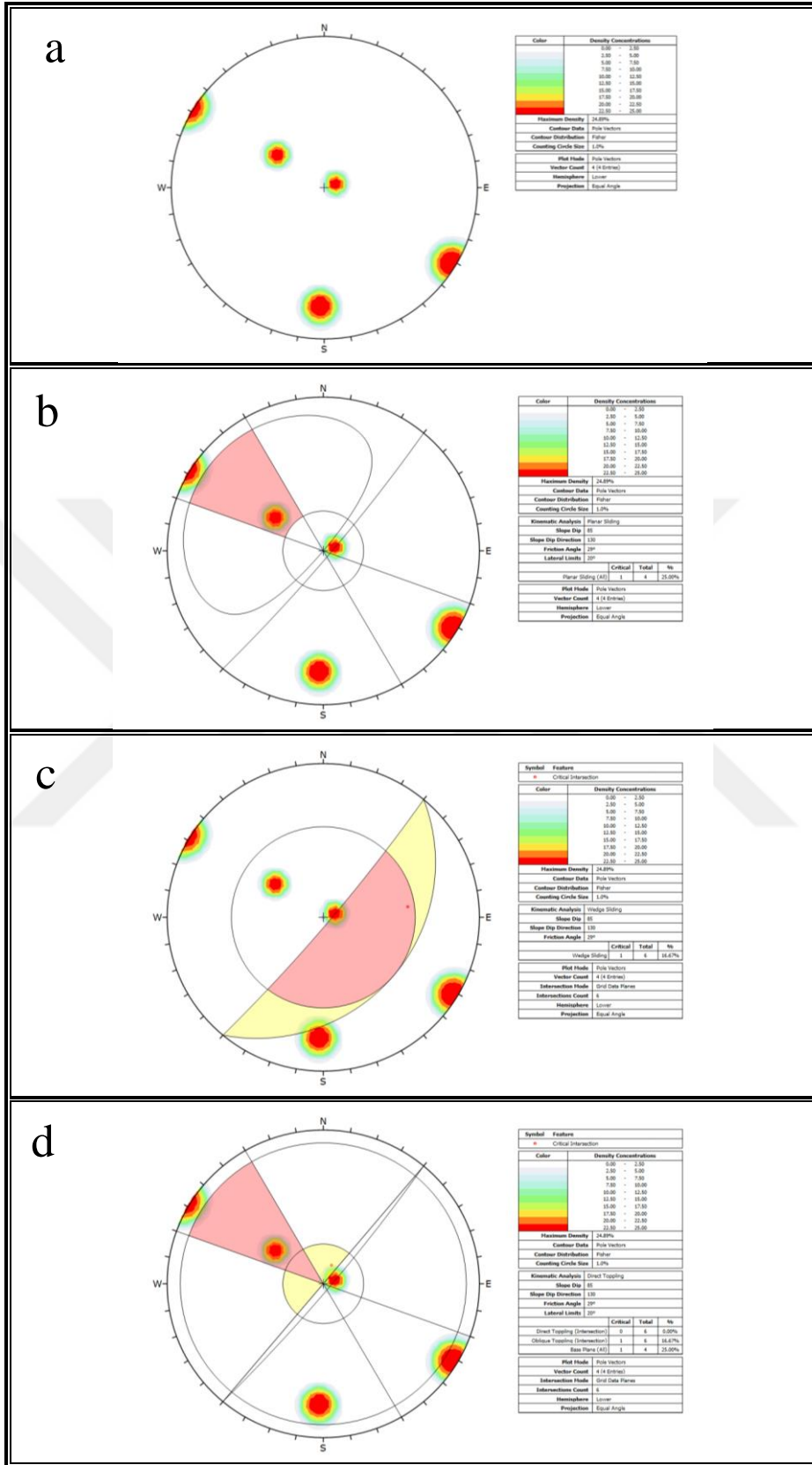
Çalışmanın devamında kinematik analizinde kullanılacak her alana ait genel eğim ve eğim yönü açısı ve Tilt testi sonucu belirlenen içsel sürtünme açısı aşağıdaki tabloda getirilmiştir. Altındere güzergahı boyunca gözlenen kaya düşmesi potansiyeli olan alanlar üzerinde kinematik analizi uygulanmış ve lokasyonlara ait düzlemsel, kama tipi ve dvrilme türü yenilme sonuçları aşağıya getirilmiştir (Tablo 12).

Tablo 12. Kinematik analizinde kullanılacak genel eğim, eğim yönü ve sürtünme açısı

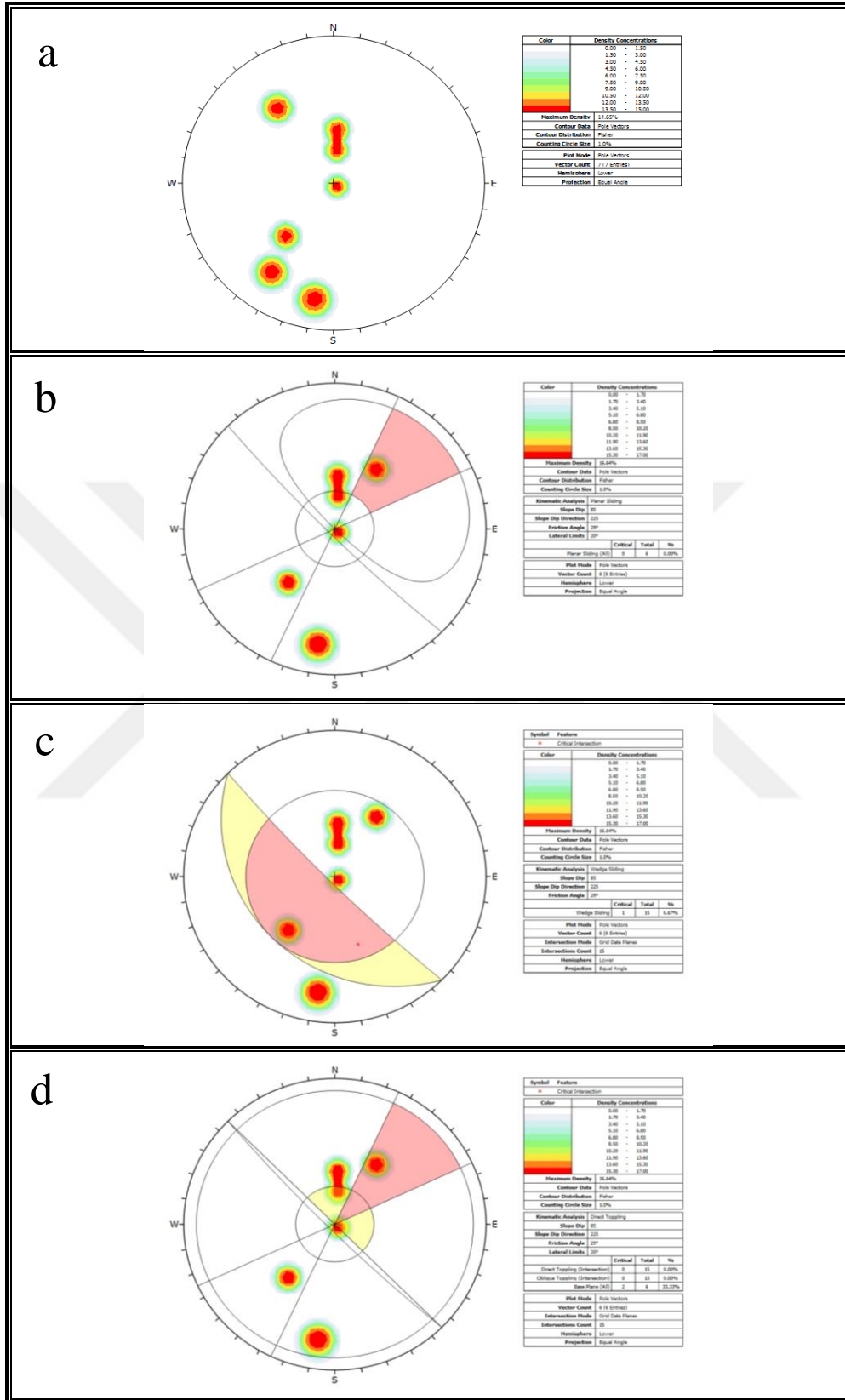
Çalışma alanı	Genel eğim açısı	Genel eğim yönü açısı	Sürtünme açısı
1. Lokasyon	89°	135°	30°
2. Lokasyon	85°	130°	29°
3. Lokasyon	85°	225°	29°
4. Lokasyon	85°	145°	29°
5. Lokasyon	75°	170°	30°
6. Lokasyon	90°	150°	29°
7. Lokasyon	85°	120°	30°
8. Lokasyon	80°	130°	28°
9. Lokasyon	85°	145°	29°
10. Lokasyon	70°	235°	29°
11. Lokasyon	85°	185°	30°



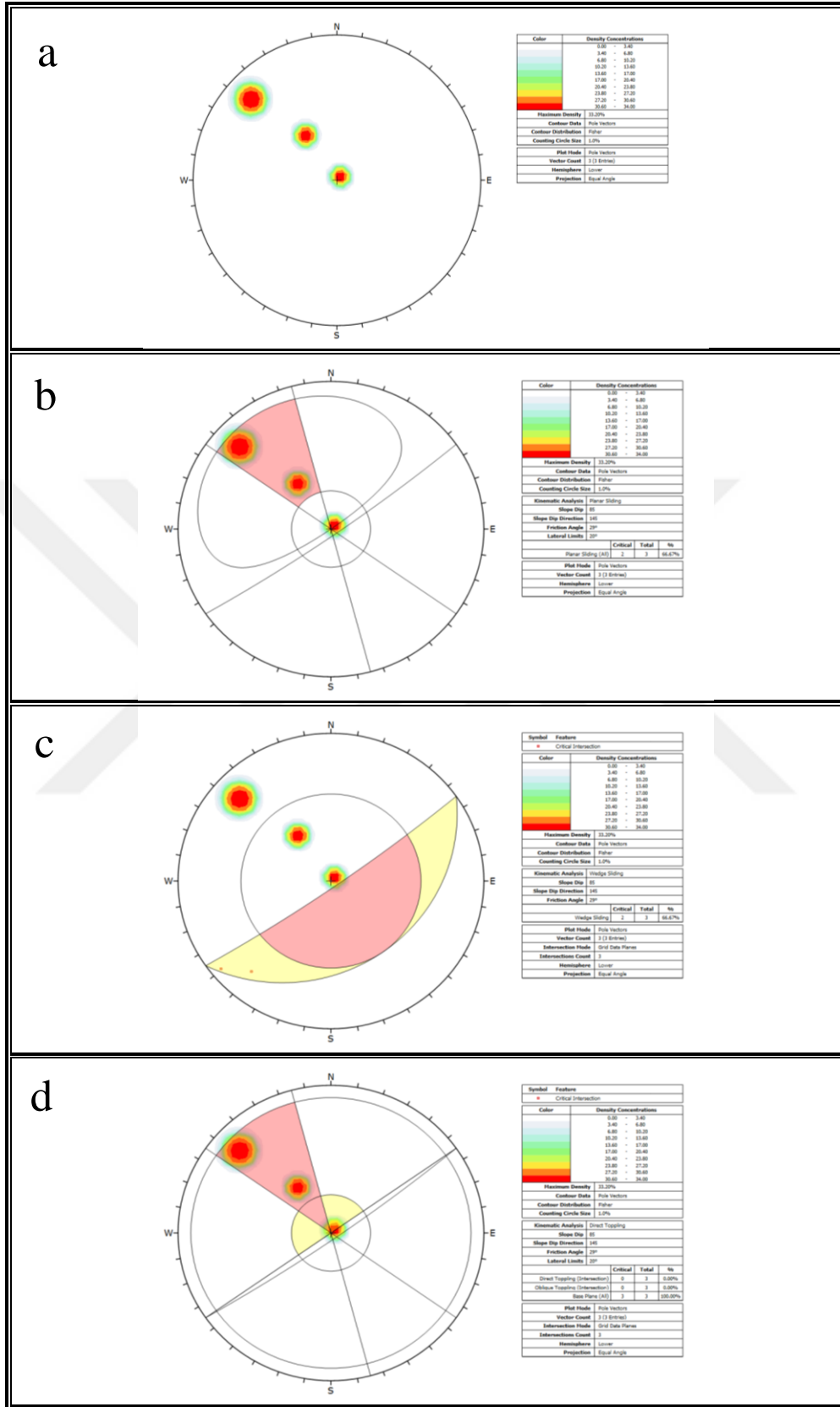
Şekil 32. a) 1. alan süreksizlik takımları için contour. b) 1. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 1. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 1. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



Şekil 33. a) 2. alan süreksizlik takımları için contour. b) 2. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 2. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 2. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme

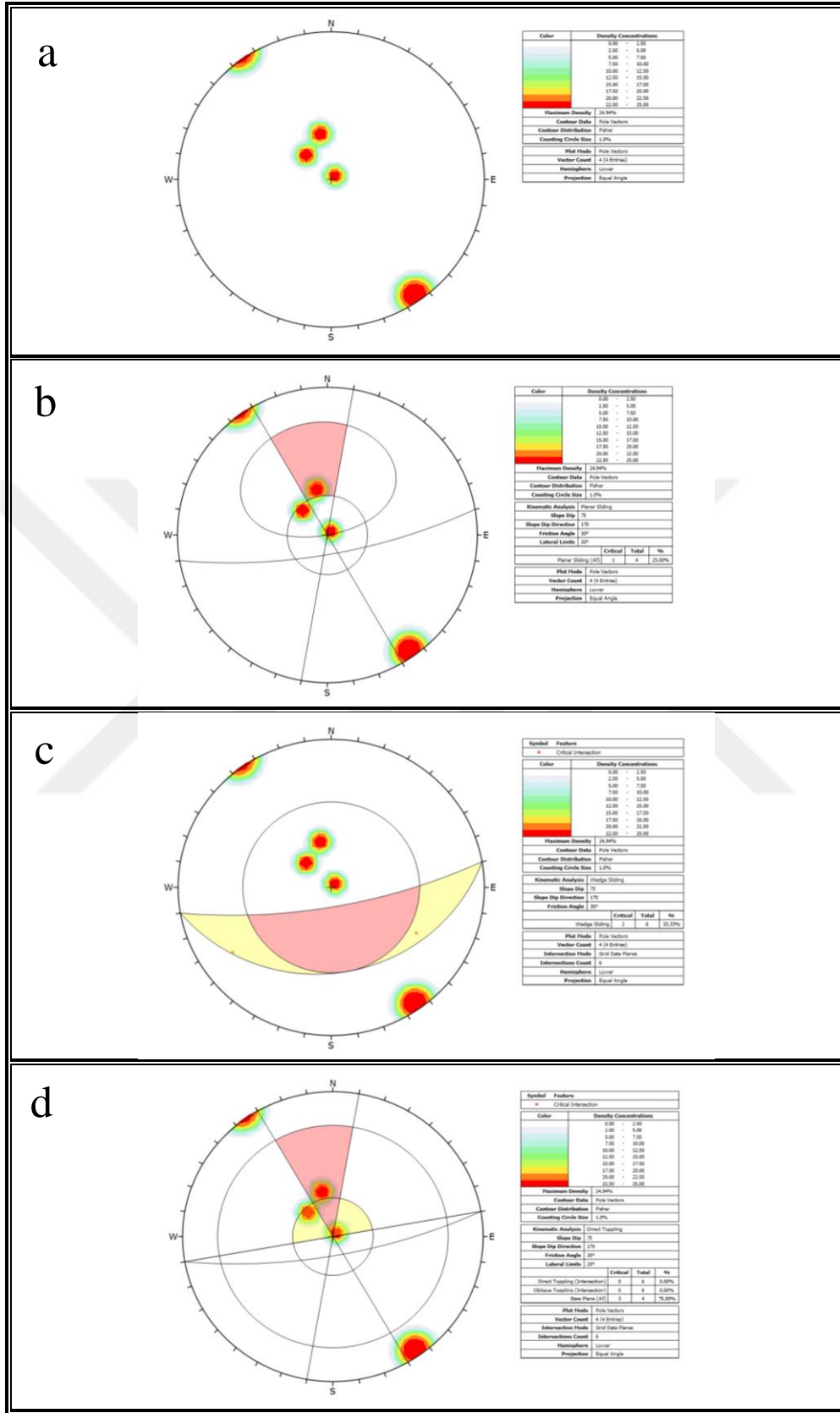


Şekil 34. a) 3. alan süreksizlik takımları için contour. b) 3. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 3. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 3. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme

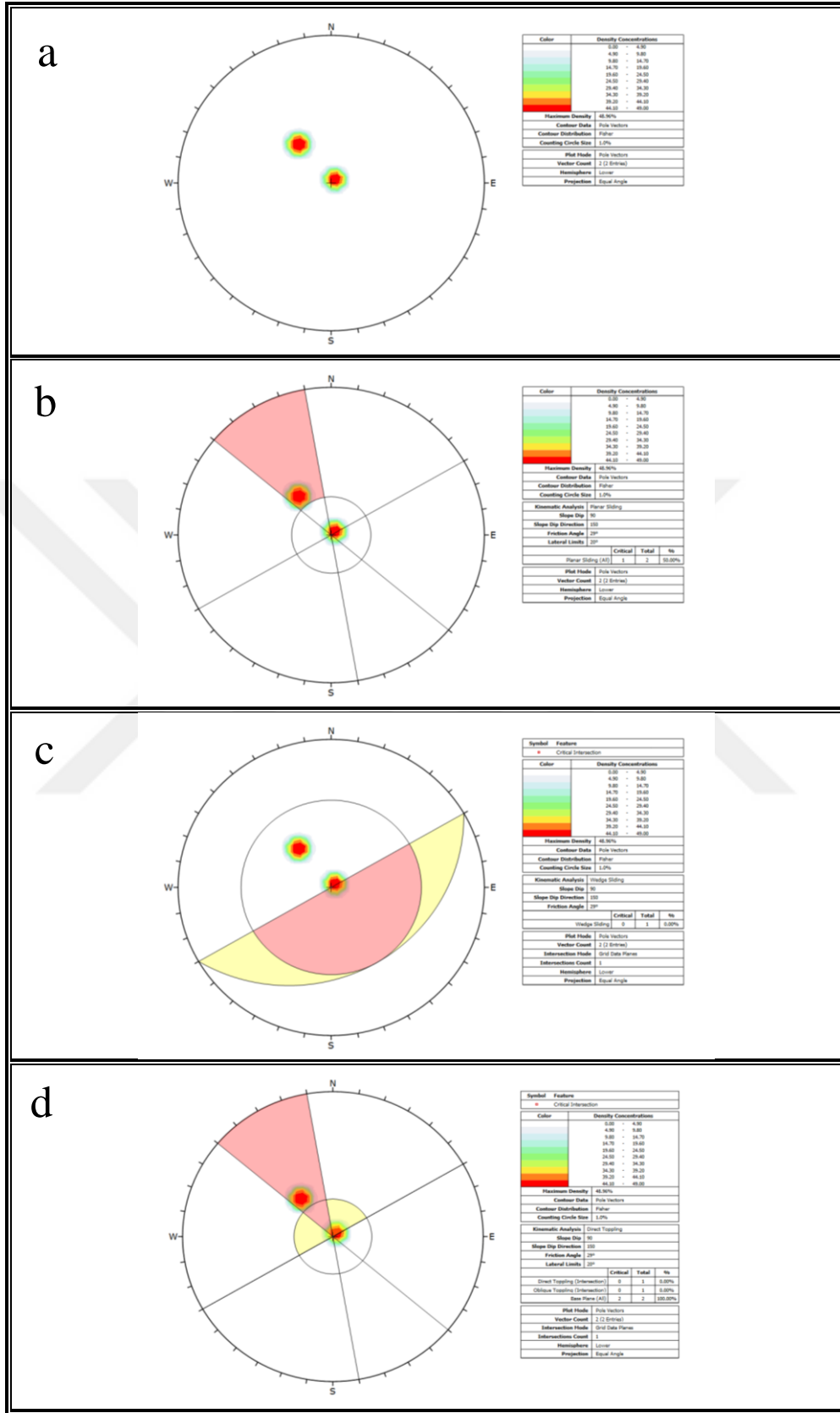


Şekil 35. a) 4. alan süreksizlik takımları için contour. b) 4. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 4. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 4. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme

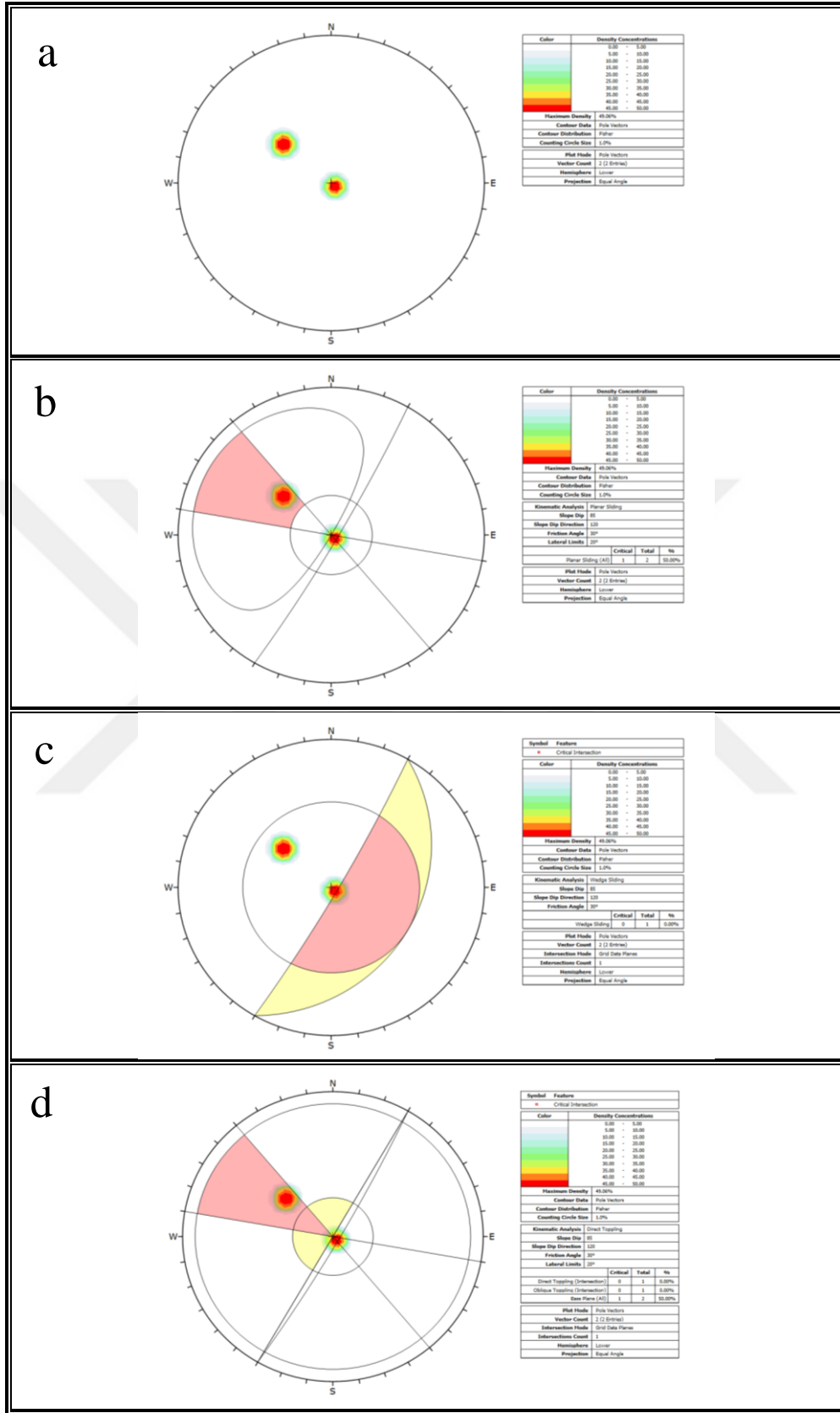




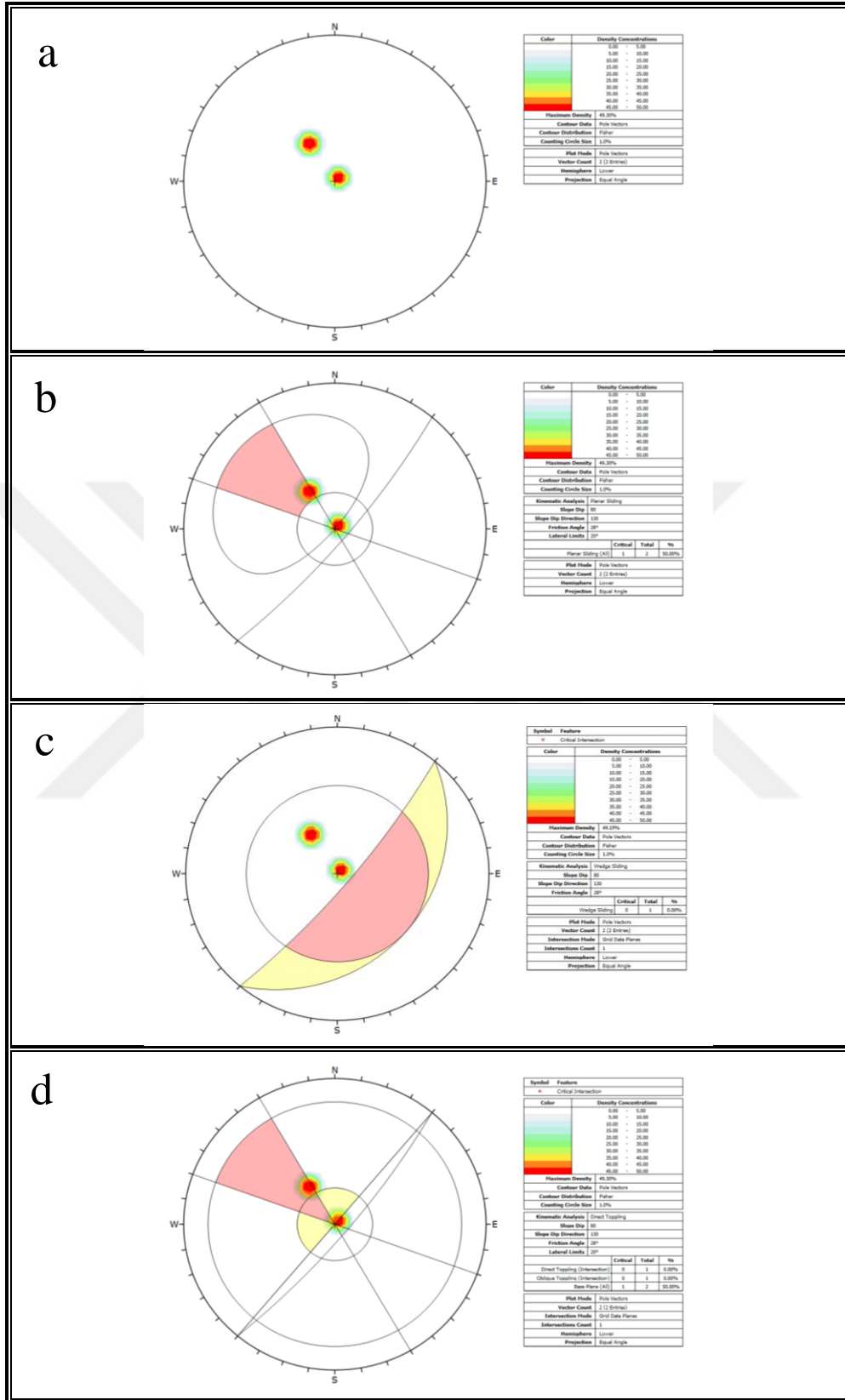
Şekil 36. a) 5. alan süreksizlik takımları için contour. b) 5. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 5. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 5. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



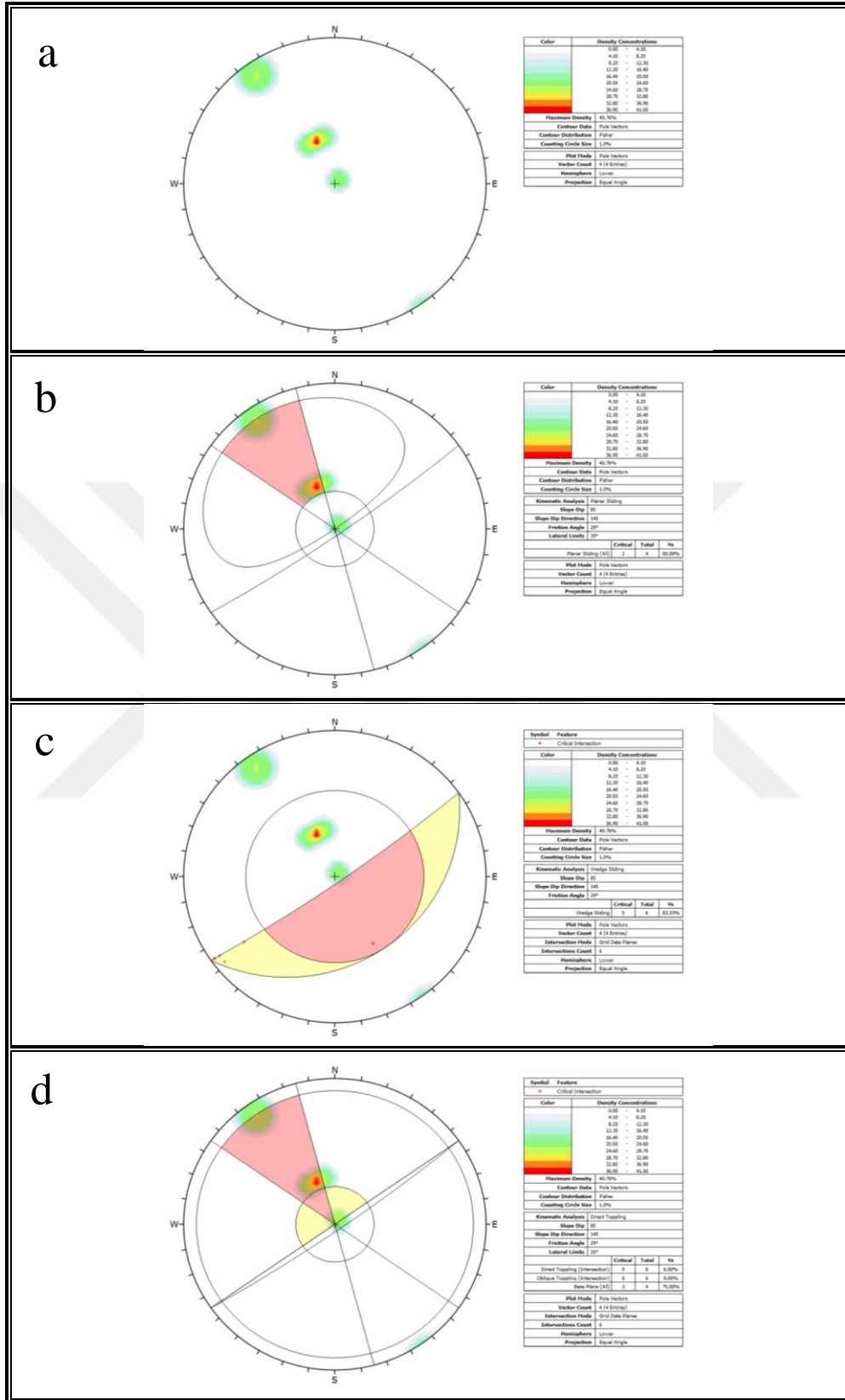
Şekil 37. a) 6. alan süreksizlik takımları için contour. b) 6. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 6. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 6. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



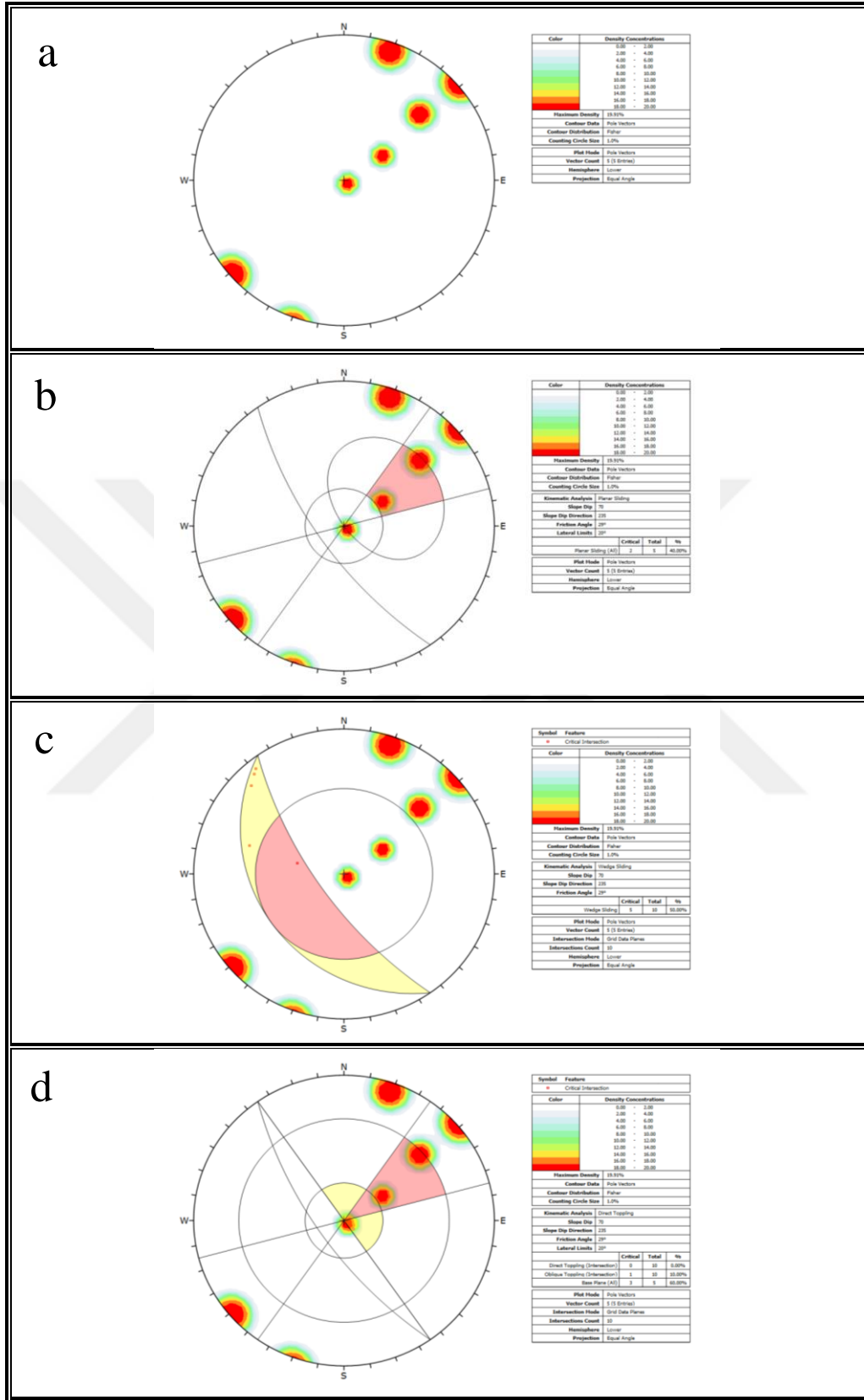
Şekil 38. a) 7. alan süreksizlik takımları için contour. b) 7. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 7. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 7. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



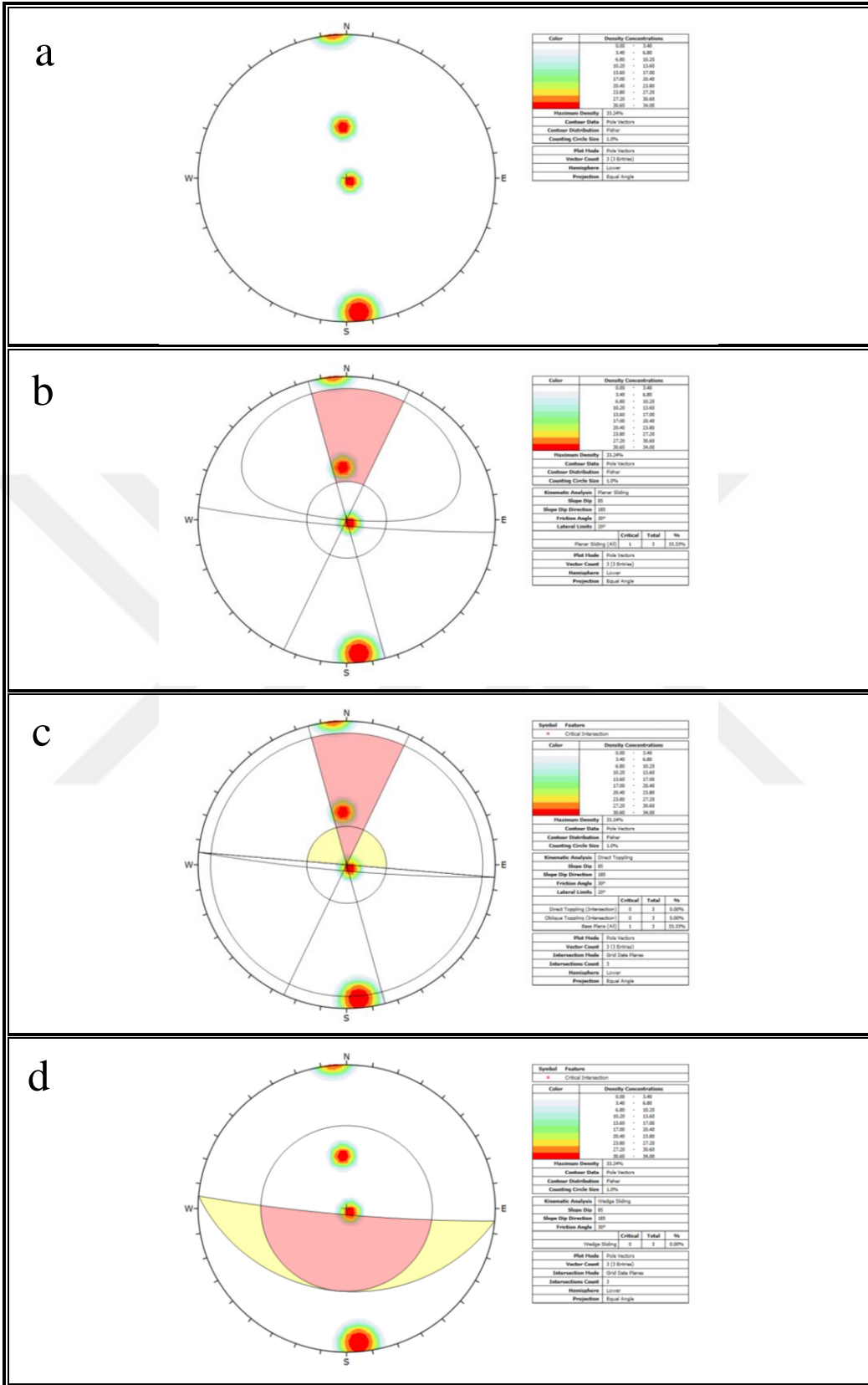
Şekil 39. a) 8. alan süreksizlik takımları için contour. b) 8. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 8. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 8. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



Şekil 40. a) 9. alan süreksizlik takımları için contour. b) 9. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 9. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 9. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



Şekil 41. a) 10. alan süreksizlik takımları için contour. b) 10. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 10. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 10. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme



Şekil 42. a) 11. alan süreksizlik takımları için contour. b) 11. alan süreksizlik takımları için düzlemsel yenilme. c) 11. alan süreksizlik takımları için kama tipi yenilme. d) 11. alan süreksizlik takımları için devrilme türü yenilme.

#### 2.6.4. Kinematik Analizi Sonuçları

Çalışma alanları ve çevresindeki yüksek kaya eğimleri genellikle dik topoğrafya sahiptir ve süreksizlik kontrollü yenilmeler sık sık meydana gelmektedir. Gerekli olan süreksizlik verilerini elde edilmesi için pahalı ve zaman alan arazi çalışmalarıyla birlikte, yol boyunca yer alan bu tür eğimli lokasyonlara erişim oldukça zor olduğundan, gerekli verileri etkili eğim izleme olanağı tanıyan yersel lazer tarama cihazı sonuçları DSE ortamında işlenerek elde edilmiştir.

Kinematik analizi sonuçları değerlendirilmesiyle, Altındere vadisi boyunca her bir konumdaki önemli süreksizlik sistemlerinin kaya bloklarının duraysız koşullarına yakın olduğunu belirlediğini ve bu süreksizlikler nedeniyle yenilme riski taşıdığını göstermektedir. İncelenen eğimler ve çalışma alanların çevresi, yoğun araç trafiğine sürekli bir tehdit oluşturan bir yol boyunca yer almaktadır. Bu nedenle, bu alanların beklenen kazaları ve bunlarla ilişkili hasarları azaltmak için stabilitesini değerlendirmek gerekli görülmüştür. Alanlara ait analiz sonuç tablosu aşağıda getirilmiştir (Tablo 13).



Tablo 13. Çalışma alanlarına ait kinematik analizi sonuçları

Çalışma alanı	Düzlemsel	Kama tipi	Devrilme	Süreksizlik takımı (eğim/eğim yönü açısı)
1. Lokasyon			•	j2 (30°/142°) j3 (45°/121°)
2. Lokasyon			•	j1 (8°/251°) j2 (41°/124°)
3. Lokasyon			•	j1 (4°/315°) j2 (24°/186°)
4. Lokasyon			•	j1 (4°/225°) j2 (41°/145°) j3(78°/133°)
5. Lokasyon			•	j1 (4°/225°) j2 (26°/135°) j3 (35°/167°)
6. Lokasyon			•	j1 (4°/225°) j2 (37°/141°)
7. Lokasyon			•	j1 (4°/ 315°) j2 (44°/130°)
8. Lokasyon			•	j1 (4°/225°) j2 (34°/147°)
9. Lokasyon		•		j3 (34°/148°)
10. Lokasyon			•	j1 (4°/315°) j2 (68°/228°) j4 (34°/237°)
11. Lokasyon			•	j1 (4°/315°) j2 (39°/176°)

## 2.7. RMR Kaya Kütle Sınıflandırması (Rock Mass Rating)

Kaya Kütle Sınıflandırması (RMR), bir kaya kütesini tanımlanmış ilişkilerdeki gruplara veya sınıflara yerleştirme (Bieniawski, 1989) ve kaya kütesinin davranışının tahmin edilebileceği şekilde benzer özelliklere/karakteristiklere dayanarak kendisine benzersiz bir tanım (veya sayı) verilmesi sürecidir. RMR sistemi ayrıca:

- Destek yükünün tahmin edilmesinde,
- Kaya kütesinin deformasyon modülünün (EM) tahmininde,
- Kaya kütlelerinin dayanımlarının tahmini için kullanılan ampirik Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya malzemesi sabitlerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Kaya kütlesinin karakterizasyonu ve sınıflandırılmasının amaçları Bieniawski'ye (1993) göre aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i) bir kaya kütlesinin davranışını etkileyen en önemli parametreleri belirlemek;
- ii) belirli bir kaya kütlesi oluşumunu, çeşitli kalitede birkaç kaya kütlesi sınıfına bölmek;
- iii) Her bir kaya kütlesi sınıfının özelliklerini anlamak için bir temel oluşturmak;
- iv) mühendislik tasarımı için nicel veri elde etmek;
- v) tüneller ve madenler için destek kurallarını önermek;
- vi) Mühendisler ve jeologlar arasındaki iletişim için ortak bir temel sağlamak
- vii) Bir bölgedeki kaya koşulları ile ilgili deneyimleri karşılaşılan koşullar ve diğerlerinde edinilen deneyim ile ilişkilendirmek

Kaya kütlesi sınıflandırmalarına dayanarak, kuvvet (örneğin, Bieniawski 1993) ve deformasyon (örneğin, Hoek ve Diederichs, 2006) parametreleri özel kurucu yasalara veya kaya kütlesine göre (örneğin, Mohr-Coulomb veya Hoek-Brown malzeme modelleri) stabilite, başarısızlık düzeni, güvenlik faktörü, deformasyonlar vb. için sayısal benzetimde çıkarılabilir ve uygulanabilir.

Kaya kütlesinin geometrisi ve mekanik koşullarına ilişkin sadece birkaç temel parametrenin kullanılması bu sınıflama sisteminin avantajı olarak bilinmektedir. Bir kaya kütlesini sınıflandırmak için, RMR sistemi aşağıdaki temel parametreleri içermektedir (Bieniawski, 1989).

- Sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_c$ ): orta ila yüksek dayanımlı kayalar için, nokta yük endeksi de kabul edilebilir (Bieniawski, 1989)
- Kaya Kalitesi Tanımlaması (RQD)
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik yüzeylerinin durumu
- Yeraltı suyu koşulları
- Tasarlanmış yapıya göre süreksizliklerin yönü

## 2.7.1. Kayaç Malzemesinin Dayanımı

### 2.7.1.1. Nokta Yüğü Dayanım İndeksi

Bu deney, kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılmasında kullanılan nokta-yüğü dayanım İndeksinin tayini amacıyla yapılır. Nokta yüğü dayanım indeksi, tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde ve bazı kaya kütle sınıflama sistemlerinde kayaç malzemesinin dayanım parametresi olarak kullanılır.

### 2.7.1.2. Yöntem

Bu deney için silindirik karot örneklerinin yanısıra, blok ve düzensiz şekilli örnekler de kullanılabilir. Nokta yükleme deneyi:

- Çapsal deney (karoteksenine dik yönde yükleme)
- Eksenel deney (karoteksenine paralel yönde yükleme)
- Blok ve düzensiz örneklerle deney

olmak üzere, üç farklı şekilde yapılabilmektedir.

Silindirik ve şekilsiz ya da düzensiz şekilli kayaçlar üzerinde nokta yüğü dayanım indeksi deneyi, örneklerin üzerine noktasal kuvvet uygulanarak gerçekleştirilir. Deney esasında örnekler üzerinde kuvvet uygulanır ve bu kuvvetin artması ile kayaç içerisinde çekme gerilmeleri oluşur ve kırılır. Nokta yüğü dayanım indeksi  $I_s = P / (De)^2$  formülü kullanarak hesaplanır ve elde edilen değerler kaya kütle sınıflandırma sistemlerinde kullanılır. Bu deney çalışma alanlarındaki düzensiz örnekler üzerinde uygulanmıştır. Kayaçların kalınlığı ve genişliği kumpas yardımıyla belirlenip  $A = W_{ort} \cdot D$  eşitliği ile kayacın ( $cm^2$ ) elde edilip ve  $De^2 = 4A / \pi$  kullanarak kayacın eş değer karot çapı hesaplanmıştır. Nokta yüğü dayanım indeksi deneyinde kaya örneklerinin kırılma noktasında elde edilen yenilme yüğü (P) birimi kN olarak elde edilmiştir ve bu değerler dönüştürülerek kg birimi elde edilmiştir. En son 11 lokasyon için  $I_s = P / De^2$  ( $kg/cm^2$ ) eşitliği yarımla nokta yüğü dayanım indeksi elde edilmiştir. Elde edilen değerler dönüştürülüp Mpa değerleri elde edilmiştir. Kaya örneklerinin farklı dayanıma sahip olma sebebiyle bu

deney her bir alan için 10 kere tekrarlanıp sonuçların ortalaması alınmıştır. Laboratuvar çalışmaları (Şekil 43) ve sonuçları (Tablo 14) aşağıda getirilmiştir.



Şekil 43. a) Kumpas kullanarak düzensiz şekilli kaya örneklerin genişlikleri ve kalınlık ölçümleri. b) Şekilsiz kaya blokların üzerinde uygulanan nokta yükü dayanım indeksi deneyi

Tablo 14. Nokta yükü dayanım indeksi deneyi sonuçları

Çalışma alanı	Ortalama nokta yükü dayanım indeksi (kg/cm <sup>2</sup> )	Ortalama nokta yükü dayanım indeksi (Mpa)
1. Lokasyon	25.6	2.51
2. Lokasyon	31.81	3.12
3. Lokasyon	19.27	1.89
4. Lokasyon	36.6	3.59
5. Lokasyon	18.15	1.78
6. Lokasyon	29.98	2.94
7. Lokasyon	43.64	4.28
8. Lokasyon	20.39	2
9. Lokasyon	28.65	2.81
10. Lokasyon	23.25	2.28
11. Lokasyon	25.29	2.48

### 2.7.2. Kaya Kalitesi Tanımı (RQD)

Deere (1968) sondaj karotlarındaki süreksizliklerin türü, sayısı ve ayrışmasını dikkate alarak temel kayaların kalitesini (RQD (Rock Quality Designation)) belirlemiştir (Tablo 15). % RQD, bir sondajda boyu 10 cm ve daha büyük olan ve silindirik şeklini koruyan karot parçalarının toplam uzunluğunun, ilerleme aralığının uzunluğuna oranıdır.

Tablo 15. Kayaç kalitesine (RQD'ye) göre sınıflandırması (Deree, 1968)

Kaya Sınıfı	RQD %
Çok İyi	100 – 90
İyi	90 – 75
Orta	75 – 50
Zayıf	50 – 25
Çok Zayıf	< 25

$$\% \text{ RQD} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L} \times 100 \quad (2)$$

Burada, n: ilerleme aralığındaki karot parçalarının sayısı; l: 10 cm ve daha büyük olan karot parçalarının boyları, L: ilerleme uzunluğudur.

Alanlara ait karotların mevcut olmaması nedeniyle süreksizlik sayısı kullanılarak 11 lokasyon için elde edilen sonuçlara göre RQD değeri aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Tüm çalışma alanlarına ait süreksizlik takımlarını belirlemek için DSE programı kullanılmıştır ve süreksizlik yoğunluğu yüksek olan alanlar tespit edilmiştir. Lokasyonların RQD değerini hesaplamak için kullanılacak süreksizlik takımları aşağıda getirilmiştir.

1. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3,4, 6
2. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3,4
3. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3,4,6, 7
4. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2, 3
5. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,5, 3
6. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2
7. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2
8. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2

9. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3, 4
10. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3,4, 6
11. Lokasyon için kullanılacak süreksizlik takımları: 1,2,3

Belirlenen takımların süreksizlik sayısını kullanarak  $\lambda$  değeri hesaplanmıştır.

Burada  $\lambda$ : 1 m uzunluktaki ölçüm hattını kesen ortalama çatlak sayısıdır.

Sondaj yapılamayan alanlarda ise RQD aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır (Priest ve Hudson, 1976). Çalışmadaki hesaplamalar aşağıdaki tabloda (Tablo 16) getirilmiştir.

$$RQD = 100 e^{(-0.1\lambda)} (0.1\lambda+1) \quad (3)$$

Tablo 16. Kaya kalitesi sınıflandırma sonuçları

Alan	$\lambda$	RQD
1	11.87	66.98
2	11.2	69.17
3	14.57	57.63
4	8.58	78.78
5	17.3	48.39
6	12.72	63.74
7	9.93	73.83
8	8.03	80.77
9	15.9	52.81
10	18.8	43.94
11	13.76	60.01

### 2.7.3. Süreksizlik Ara Uzaklığı

Kaya Bolkrarında gözlenen boyutları ve potansiyel yenilme türleri, komşu konumlu 2 süreksizlik veya birbirine paralel süreksizliklerden oluşmuş bir süreksizlik takımındaki iki süreksizlik arasındaki en kısa mesafe olarak tanımlanan süreksizlik ara uzaklığı ile kontrol edilir. Bu amaçla, tüm çalışma lokasyonlardaki yamaçlarda süreksizlik ara uzaklıkları hem arazi ölçümleri hemde süreksizlik analizlerinde kullanılan program yardımıyla incelenmiş ve kaya kütlelerin süreksizlik ara uzaklığı parametresini tanımlamak

için ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri kullanılmıştır (Tablo 17). Süreksizlik ara uzaklıkları değerleri (Tablo 18) de getirilmiştir.

Tablo 17. ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri

Aralık (mm)	Tanımlama
< 20	Çok dar ara uzaklıklı
20 – 60	Dar ara uzaklıklı
60 - 200	Yakın ara uzaklıklı
200 – 600	Orta derece ara uzaklıklı
600 - 2000	Geniş ara uzaklıklı

Tablo 18. Elde edilen süreksizlik ara uzaklıkları değerleri

Çalışma alanı	Süreksizlik ara uzaklığı (mm)
1. Lokasyon	80
2. Lokasyon	90
3. Lokasyon	70
4. Lokasyon	115
5. Lokasyon	60
6. Lokasyon	80
7. Lokasyon	100
8. Lokasyon	120
9. Lokasyon	60
10. Lokasyon	50
11. Lokasyon	70

#### 2.7.4. Süreksizlik Devamlılığı

Şev yüzeyi boyunca bulunan süreksizliklerin bir düzlemdeki alansal yayılımını gösteren ve şev duyarlılığında etkili bir faktör olarak ta bilinen devamlılık, RMR kaya kütle sınıflandırmasında kullanılan bir parametredir. Şev duyarsızlığı devamlılık arttıkça artar ve kaya mostrasında doğrudan şerit metre ile ölçülür. Devamlılığın sınıflandırılması ve tanımlanması amacıyla ISRM (2007) tarafından önerilen tablo aşağıda getirilmiştir (Tablo 19). Süreksizlik devamlılık değerleri (Tablo 20) de getirilmiştir.

Tablo 19. ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri

Süreksizlik izinin uzunluğu (m)	Tanımlama
< 1	Çok düşük devamlılık
1 - 3	Düşük derecede devamlılık
3 - 10	Orta derecede devamlılık
10 - 20	Yüksek devamlılık
> 20	Çok yüksek devamlılık

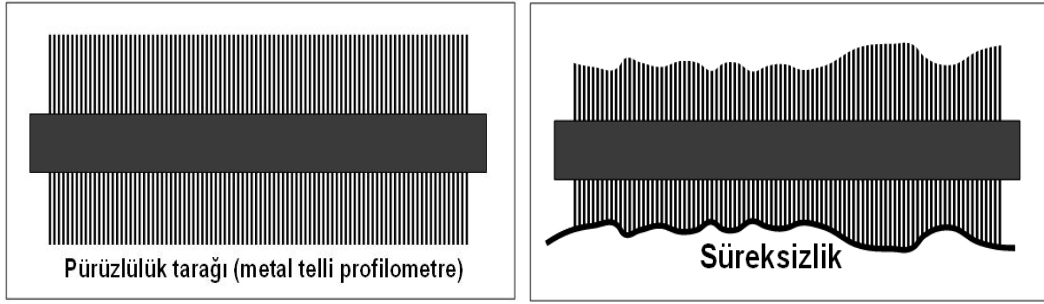
Tablo 20. Elde edilen süreksizlik devamlılık değerleri

Çalışma alanı	Süreksizlik devamlılığı (m)
1. Lokasyon	Düşük derece devamlı
2. Lokasyon	Orta derece devamlı
3. Lokasyon	Düşük derece devamlı
4. Lokasyon	Orta derece devamlı
5. Lokasyon	Düşük derece devamlı
6. Lokasyon	Orta derece devamlı
7. Lokasyon	Orta derece devamlı
8. Lokasyon	Orta derece devamlı
9. Lokasyon	Orta derece devamlı
10. Lokasyon	Orta derece devamlı
11. Lokasyon	Orta derece devamlı

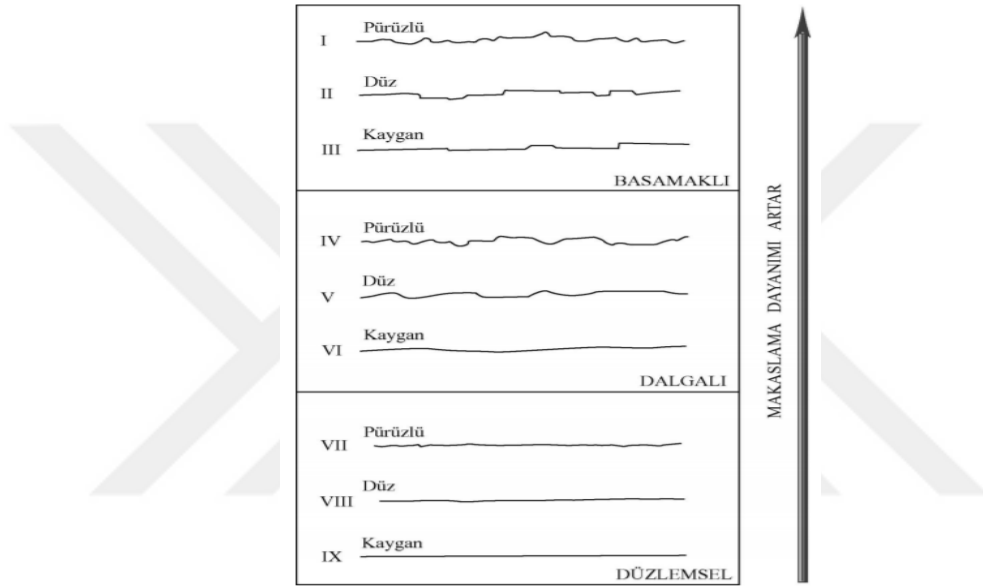
### 2.7.5. Süreksizlik Pürüzlülüğü ve Dalgallığı

Pürüzlülük bir süreksizlik yüzeyinin küçük ölçekte, dalgallık ise bir süreksizlik yüzeyinin büyük ölçekte düzlem sellikten sapması olarak tanımlanmakta ve makaslama dayanımının önemli bir bileşenidir. Süreksizliklerdeki pürüzlülük, uygulamada genellikle metal telli profilometre ile ölçülür (Şekil 44). Bu amaçla süreksizlik yüzeyinin üzerine elle bastırılarak pürüzlülük tarağı tellerinin süreksizlik yüzeyinin şeklini alması sağlanmıştır. Daha sonra süreksizlik yüzeyinin şekline göre dizilen tellerin konumundan ortaya çıkan kalemle bir kağıda çizilir ve gerekirse sayısallaştırılarak bilgisayar ortamında değerlendirilir. (ISRM, 2007)'e göre pürüzlülük profilleri ve bunlara karşılık gelen eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) değerleri (Şekil 45) ve sonuçları (Tablo 21) aşağıda getirilmiştir.





Şekil 44. Pürüzlülük tarağı (Profilometre)



Şekil 45. Pürüzlülük profilleri ve Bunlara karşılık gelen eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) değerleri (ISRM, 2007).

Tablo 21. Elde edilen pürüzlülük değerleri

Çalışma alanı	Pürüzlülük (JRC değerleri)
1. Lokasyon	8-10 Pürüzlü
2. Lokasyon	2-4 Düz
3. Lokasyon	4-6 Az pürüzlü
4. Lokasyon	4-6 Az pürüzlü
5. Lokasyon	4-6 Az pürüzlü
6. Lokasyon	8-10 pürüzlü
7. Lokasyon	8-10 pürüzlü
8. Lokasyon	8-10 pürüzlü
9. Lokasyon	4-6 Az pürüzlü
10. Lokasyon	6-8 Az pürüzlü
11. Lokasyon	8-10 pürüzlü

### 2.7.6. Süreksizlik Açıklığı

Süreksizlik açıklığı içerisindeki karşılıklı yüzeylerin arasındaki bulunan ve su veya çeşitli dolgu malzemesi ile doldurulabilen dik uzaklık olarak bilinmektedir. Açıklık, kaya kütlelerinin gevşemesi ve sıvıları iletme özelliği açısından önem taşır. Süreksizlik açıklığı mm'nin 1/10 hassasiyetli mikrometrelerle ölçülür. Süreksizlik açıklığı tanımlanması için ISRM (2007) tarafından önerilen aşağıdaki tablo (Tablo 22) ve sonuçları (Tablo 23) kullanılmıştır.

Tablo 22. ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri

Açıklık (mm)	Tanımlama
< 0.1	Çok sıkı
0.1 – 0.25	Sıkı
0.25 – 0.5	Kısmen açık
0.5 – 2.5	Açık
2.5 – 10	Orta derecede geniş
> 10	Geniş

Tablo 23. Elde edilen süreksizlik açıklığı değerleri

Çalışma alanı	Süreksizlik açıklığı (mm)
1. Lokasyon	20-30
2. Lokasyon	20-30
3. Lokasyon	10-20
4. Lokasyon	20-30
5. Lokasyon	10-20
6. Lokasyon	5-10
7. Lokasyon	5-10
8. Lokasyon	20-30
9. Lokasyon	10-20
10. Lokasyon	10-20
11. Lokasyon	20-30

### 2.7.7. Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi

Kaya kütleleri yüzeye yakın kesimlerde genellikle bozunmuş, daha derinlerde ise hidrotermal süreçlere bağlı olarak alterasyona uğramış olabilirler. Bu amaçla ISRM (2007) (Tablo 24) ve Gökçeoğlu, 1997 (Tablo 25) tarafından, arazi çalışması sırasında kullanılabilir bozunma sınıflaması ölçütleri önerilmiştir. Çalışmada bozunma derecesinin tayini için Schmith çekici geri tepme sayısından yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda (Tablo 26) getirilmiştir.

Tablo 24. Kaya kütlelerinin bozunma dereceleri ve tanımlanması (ISRM, 2007)

Tanım	Tanımlama ölçütü	Bozunma derecesi
Bozunmamış	Kayacın bozunduğuna ilişkin gözle ayırt edilebilir bir belirti olmamakla birlikte ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözünmektedir.	1
Az bozunmuş	Kayaç malzemesinde ve süreksizlik yüzeyünde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiştir. Kayaç taze halinden zayıf olabilir.	2
Orta derece 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.	3
İleri derecede bozunmuş	Kayacın yarısından fazla bir kısmı zemine dönüşerek ayrılmış/parçalanmıştır. Kaya renk değişimine uğramış olup ya bir süreksizlik kütle ya da çekirdek taşı halindedir.	4
Tamamen bozunmuş	Kayacın tümü toprak zemine dönüşerek ayrılmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orjinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	5
Artık zemin	Kayacın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmamakla beraber zemin taşınmamıştır.	6

Tablo 25. Süreksizliklerin bozunma dereceleri ile ilgili sınıflama (Gökçeoğlu, 1997)

$W_c (R_f/R_w)$	Sınıf	Tanım
<1.1	1	Bozunmamış (taze)
1.1 – 1.5	2	Az bozunmuş
1.5 - 2	3	Orta derece bozunmuş
>2	4	Tamamen bozunmuş

$$W_c = R_f/R_w \quad (3)$$

$W_c$ : bozunma katsayısı

$R_f$ : taze yüzeyin Schmidt geri tepme sayısı,

$R_w$ : bozunma sınıflaması yapılan süreksizlik yüzeyinin Schmidt geri tepme sayısıdır.

Tablo 26. Elde edilen bozunma derecesi değerleri

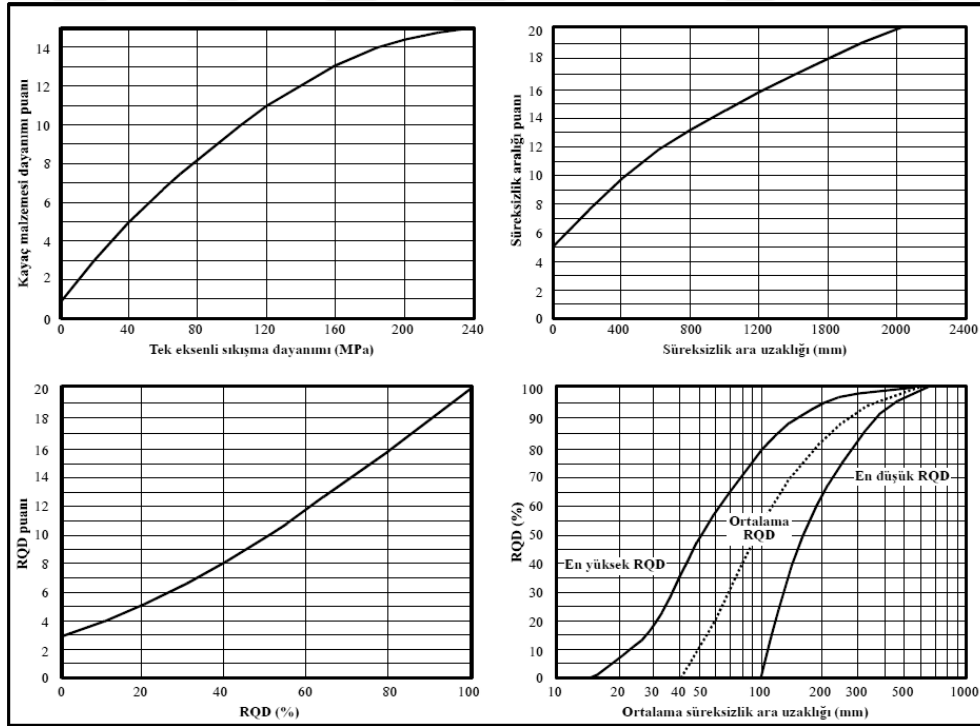
Çalışma alanı	Ortalama $R_f$ değeri	Ortalama $R_w$ değeri	$W_c$ ( $R_f / R_w$ )	Tanımlama (Gökçeoğlu, 1997'ye göre)
1. Lokasyon	63	38	1.65	3
2. Lokasyon	61.1	31.8	1.92	3
3. Lokasyon	59	33.4	1.76	3
4. Lokasyon	64.5	39.6	1.62	3
5. Lokasyon	51	35.4	1.44	2
6. Lokasyon	50.1	29.8	1.68	3
7. Lokasyon	45	30.7	1.46	2
8. Lokasyon	57	32	1.78	3
9. Lokasyon	56	30.9	1.81	3
10. Lokasyon	63	37	1.7	3
11. Lokasyon	58	34.8	1.66	3

### 2.7.8. Süreksizlik Yüzeylerinin Su Durumu

Çalışmamızda yamaçlardaki su durumunun tayini için hat etütlerinden yararlanılarak ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlamalardan yararlanmıştır. Arazi çalışması sonucunda kaya düşmesi potansiyeli olan alanlar “**nemli**” olarak tespit edilmiştir.

### 2.7.9. RMR Puanlaması

Arazi çalışmaları sırasında gerçekleştirilen süreksizlik değerlendirmelerinden elde edilen parametreler kullanılarak; kaya malzemesinin kalitesinin değerlendirilmesi için RMR (Rock Mass Rating- Kaya Kütle Sınıflama) hesaplanmıştır. RMR sınıflama sisteminde puanlamada kullanılan grafikleri Şekil 46’ te getirilmiştir. RMR puanlama tablosu (Tablo 27), sınıfları ve puanları (Tablo 28) aşağıda getirilmiştir. Buna göre çalışma alanları içerisinde yer alan kayalar orta ve zayıf dayanım sınıfında yer almaktadır (Bieniawski, 1989).



Şekil 46. a) Tek eksenli basınç dayanımı (Mpa), b) Süreksizlik ara uzaklığı puanı, c) RQD parametrelerine ait puanları bulmak için kullanılan grafikler (Bieniawski, 1989).

Tablo 27. RMR puan tablosu (Bieniawski ,1989)

Nokta yükü dayanım indeksi	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım
Puan	15	12	7	4	0 - 2
RQD (kayaç kalite göstergesi)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
Puan	20	17	13	8	3
Süreksizlik aralıklı uzaklığı (cm)	>200	60 - 200	20 - 60	6 - 20	< 6
Puan	20	15	10	8	5
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	Çopürüzlü	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 derece bozunmuş	Bozunmuş	Çok bozunmuş
Puan	6	5	3	1	0
YST	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı
Puan	15	10	7	4	0

Tablo 28. Kaya Sınıfları ve Puanları

Sınıf	1	2	3	4	5
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	81-100	61-80	41-60	21-40	<20

Elde edilen tüm parametrenin toplanmasıyla temel RMR değerleri hesaplanmıştır (Ek Tablo1) ve bu değerler süreksizlik yönelimine göre düzeltilerek nihai RMR elde edilmiştir. Kinematik analizi ve arazide jeoteknik birimlerin incelendiği tüm şevlerde olası tek yenilme modeli (düzlemsel, kama tipi veya devrilme türü yenilme türlerinden biri) söz konusu olduğundan RMR kaya kütle sınıflandırmasının nihai sınıf değerleri (temel RMR puanı -5) olarak elde edilmiştir. Süreksizlik yönelimi düzeltmelerinde Sing ve Gahroee

(1989) tarafından önerilen puan tablosu kullanılmıştır (Tablo 29). Toplamda 11 lokasyon için elde edilen final RMR puanları ve tanımlaması aşağıda getirilmiştir (Tablo 30).

Tablo 29. Kaya şevleri için (Singh ve Gahrooe,1989) tarafından önerilen süreksizlik yönelimi düzeltmesi puanları

Süreksizlik yönelimi	Duraysızlık yok	Olası tek duraysızlık modeli	Tek duraysızlık modeli	İki duraysızlık modeli	Çok sayıda duraysızlık modeli
Puan	0	-5	-25	-50	-60

Tablo 30. Elde edilen final RMR puanları ve tanımlamaları

Alan	RMR Final Puanı	Tanımlama
1	51	Orta kaya
2	45	Orta kaya
3	46	Orta kaya
4	50	Orta kaya
5	48	Orta kaya
6	49	Orta kaya
7	56	Orta kaya
8	53	Orta kaya
9	47	Orta kaya
10	39	Zayıf kaya
11	49	Orta kaya

## 2.8. Kaya Düşmesi Modellemesi

Kaya düşmeleri ile ilgili erken araştırmalar çoğunlukla yüksek maliyet ve risk içeren yerinde testlerle gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanlarında testler ve fiziksel modelleme yoluyla kaya düşmesi davranışını daha iyi anlayarak, araştırmacılar bir bilgisayarla kaya düşmelerini simüle etmek için matematiksel modeller geliştirmeye çalıştılar. Piteau ve Clayton (1977) tarafından kaya düşmesi analizi için ilk bilgisayar programı tanıtılmıştır.

Kaya düşmeleri analizi için ilk olarak Piteau ve Clayton (1977) tarafından tanıtılan program, kayanın zemini nerede etkileyeceğini belirlemek için hücre adı verilen düz çizgi parçalara bölünmüş bir eğim profili ve hareket kurallarını ve modellerinde bir geri sıçrama katsayısı ve eğim pürüzlülüğü kullanılmıştır. Program, eğim için hız ve sıçrama yüksekliği dağılımları üretir. Günümüzde bilgisayar tabanlı simülasyonlar verimli olduğundan ve tutarlı sonuç verme sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kaya düşmelerinin bilgisayar modellemesinde iki yöntem kullanılmıştır: katı cisim (rigorous) yöntemi ve toplu kütle (lump mass) yöntemi (Hungry ve Evens, 1988).

- 1) Katı cisim yöntemi: Kaya bloklarının hem gerçek şekilleri (örneğin silindir, disk, küp ve elipsoid) ve boyutları hemde tüm hareketleri dikkate alan bu yöntem ilk olarak (Cundall, 1971) tarafından geliştirilmiş ve Descoeders ve Zimmermann (1987) tarafından üç boyuta genişletilmiştir. Tüm koşulların modellenmesindeki zorluklar nedeniyle, çeşitli basitleştirici varsayımlar yapılmalıdır.
- 2) toplu kütle yöntemi: Kaya bloklarının şekilleri ve boyutları tek bir nokta olarak belirlenen bu yöntem, kaya belirli bir kütleyle sahip tek bir nokta olarak kabul edilir. Normal ve teğetsel geri sıçrama katsayıları, çarpma anında öteleme hızını hesaplamak için kullanılır; dönme momentumunu takip etmek için hiçbir girişimde bulunulmaz. Artık kaya şekli ve boyutu çoğu program tarafından dikkate alınmaktadır.

### **2.8.1. Kaya Düşmelerinde Etkili olan Eğim Geometrisi:**

- Geri sıçrama katsayısı: Eğim yüzeyinin geciktirme kapasitesi, kaya düşmesi davranışını etkileyen en önemli parametredir. Kaya düşmesi analizlerinde normal ve tanjant (teğet) (yüzeysel) Geri sıçrama katsayıları kullanılır.
- Yüzey pürüzlülüğü: Kaya düşmesi sırasında gözlenen değişkenliğin çoğunu oluşturan eğim yüzeyindeki düzensizlikler, bir kayanın yüzeye etki ettiği açıyı değiştirir. Bir eğimin yüzey pürüzlülüğü, eğim açısının ortalama açısından değişimi veya kaya kütlelerinin yarıçapına eşit bir eğim mesafesi içindeki maksimum dikey değişiklik olarak tanımlanır.



- Yuvarlanma sürtünme katsayısı: Eğimin, kayanın açısız hızına direnci, başlangıçta hareketsiz bir kayanın yuvarlanmaya başladığı açının tanjantı olarak tanımlanır.
- Sürtünme katsayısı: Eğimin kayaların kaymasına karşı direnci, başlangıçta hareketsiz bir kayanın kaymaya başladığı açının tanjantı olarak tanımlanır.

### 2.8.2. Geri sıçrama Katsayısı

Geri sıçrama Katsayısı (COR), kaya şevlerinden düşen bir kaya bloğu yüzeye çarptığı anda göstermiş olduğu hareket özellikleri ve kinematik davranışını tanımlayan bir parametredir. Bir kaya eğim yüzeyine çarptığında, hareket ederken özellikleri değişir. Şev yüzeyleri ve düşen kaya blokları değişen özelliklere sahip olma sebebiyle, geri sıçrama katsayısını karakterize etmek çok zordur, çünkü her bir durumun kendine has özellikleri vardır.

Geri sıçrama, en çok, eğim yüzeyine hem normal hem de teğet (tanjant) yönlerde hız kaybı olarak tanımlanmaktadır (Richards vd., 2001, s149). Bu tanımdan normal geri sıçrama katsayısı formülü açıklanabilir:

$$R_n = V_{nr} / V_{ni}$$

$R_n$  = normal geri sıçrama katsayısı

$V_{nr}$  and  $V_{ni}$  = normal component of velocity for rebound/impact

$$R_t = V_{tr} / V_{ti}$$

Teğetsel COR ayrıca böyle tanımlanabilir:

$$R_t = \text{Teğetsel COR}$$

$V_{tr}$  ve  $V_{ti}$  = Geri tepme / etki için hızın teğetsel bileşeni

Normal geri sıçrama katsayısı kaya düşmesi analizleri için birçok kez tahmin edilmiştir. Geri sıçrama katsayısı değerleri, varsayımlar, yörünge analiz kalibrasyonları ve hem laboratuvar hem de arazi analizlerinde kullanılan programlardan yararlanarak elde edilir.

Geri sıçrama katsayısı, gerçek olayların geriye dönük analizi ile arazi testleri (örneğin Wu 1985, Evans ve Hunr 1993, Robotham vd., 1995, Azzoni vd., 1995) (örneğin Budetta ve Santo 1994, Fornaro vd., 1990, Pfeiffer ve Bowen, 1989) veya laboratuvar testleri (Auberger ve Rinehart 1960, Bowman 1995, Chau vd., 1998) ile bulunabilir. Bu çalışmada

geri sıçrama katsayısı değerleri Rocscience geri sıçrama katsayısı tablosundan elde edilmiştir.

### **2.8.3. 2 Boyutlu Modelleme (Rocfall)**

İlk olarak 1998 yılında Stevens tarafından geliştirilen ve piyasadaki en son versiyonu 8.0 olan Rocfall istatistik tabanlı bir yazılımdır ve neredeyse tüm girdi parametrelerini rasgele değiştirme potansiyeline sahiptir. Kaya, bir hat boyunca yerleştirilen seederlar şeklinde rastgele seçilen bir konumdan serbest bırakılabilir. Atılan kayanın kütlesi ve yoğunluğu, normal, düzgün, üçgen, beta, üstel, lognormal ve gama dağılımları dahil olmak üzere önceden tanımlanmış dağılımlardan rastgele örneklenebilir.

#### **2.8.3.1. Genel Bakış**

Son derece sağlam ve kullanımlı olan RocFall, 2 boyutlu kaya düşme simülasyonu programı olarak kullanılmaktadır. Bu program düşen kaya bloklarının hareketinin hesaplanmasında bir parçacık analizi kullanmanın yansısına alınabilecek iyileştirici önlemlerin tasarımında ve etkilerinin test edilmesinde kullanılmaktadır.

(Topal vd., 2007) Afyon kalesi ve civarında meydana gelen kaya düşmesi tehlikesini değerlendirdikleri çalışmalarında iki boyutlu kaya düşmesi analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu analizler ile elde edilen sonuçlar kaya düşmesi riski altında bulunan alanlara uygulanmış ve Afyon kalesi ve çevresinde mümkün olabilecek iyileştirme çalışmaları değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Tunusluoglu ve Zorlu (2009) yapmış oldukları çalışma ile Kapadokya bölgesinde yer alan önemli kültürel miraslardan olan Ortahisar Kalesi'nin tehlike potansiyelini değerlendirmeyi, bölgede meydana gelen kaya düşmelerini analiz etmeyi ve sonuçlarını tartışmayı amaçlamışlardır.

RocFall, tüm eğim profilinin uzunluğu boyunca (programda “envelopes” olarak anılır), kayaların maksimum hızını, kinetik enerjisini ve sıçrama yüksekliğini gösteren grafikler üretir. Bu örtüler (envelopes), iyileştirici önlemlerin nereye yerleştirileceğine karar verirken kullanışlıdır.

#### 2.8.4. Rocfall Simülasyonu

Mevcut kaya düşmesi simülasyon programlarının çoğu, düşen kayayı, topaklanmış kütle (stereo mekanik) modelleri adı verilen, kütleli küçük bir parçacık olarak kabul eden parçacık modellerine dayanmaktadır. Diğer modeller, basitleştirilmiş varsayımlara dayanan hibrit yöntemleri içerir. En yaygın hibrit yöntemler, boyutsuz bir nesnenin hareketini aramak için temas aramaya ve sıçrama için katı gövde darbe mekaniğinin bazı yönlerini birleştirmeye dayanır. Literatür ayrıca basitleştirilmiş katı gövde modellerini kullanan simülasyonları da açıklamaktadır.

- Katı (sert) cisim analiz metodu (Rigid Body)

Sert cisim etki mekaniği (RBIM), ilk olarak Stronge (1994a'dan 2000'e) tarafından önerilmiştir. Katı cisim etkisi, nispeten sert iki nesnenin, nesnelere boyutuna göre küçük bir alan üzerinde çarpışmasından kaynaklanır.

- Toplu Kütle analizi yöntemi (Lump Mass)

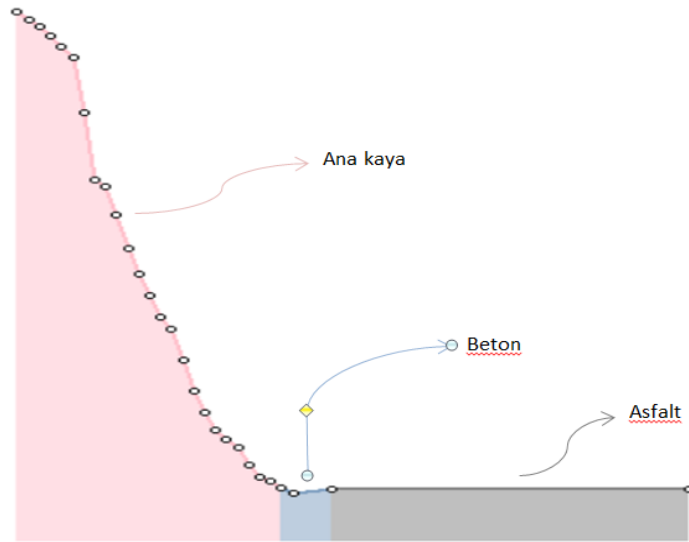
Toplu kütle yöntemi Piteau ve Clayton (1976) tarafından önerilmiştir. Altındere vadisi boyunca gözlenen kaya düşmesi potansiyeli olan alanlara ait 2 boyutlu modellemesi için Lump mass yöntemi uygulanmıştır. Rocfall programında, eğim iki şekilde elde edilebilir:

- 1) Eğimi ekranda elle çizilmesi veya
- 2) Sınır koordinatlarını düzenle penceresinde köşe koordinatlarını girin kısmından eğimi elde edebiliriz. İlk köşe eğimin tepesini temsil eder. Standart sapma eğimin olasılıksal değişimi için kullanılır, bu nedenle tüm köşeler için standart sapma sıfıra ayarlanır (Şekil 47).

Point	X	X stdv	Y
1	0		837.4064
2	0.249695861113		836.3699
3	0.499507357412		836.0612
4	0.74915109247		835.8523
5	0.998962588769		835.5779
6	1.24866985543		835.3559
7	1.49841784664		835.1291
8	1.74812511331		833.9568
9	1.99776884836		832.8185

Şekil 47. Eğim profilinin elde edilmesi

Bu çalışmada kaya düşmesi potansiyeli olan alanlarda Sayısal Yükseklik Modeli kullanılarak alanlara ait kesitler elde edilip ve CSV formatıyla önce excel ortamına ve daha sonra Rocfall programına aktarılmıştır. Gerçekleştirilen arazi çalışmalarına göre kaya düşmelerinin potansiyeli olan alanlar arazi kullanımı açısından ana kaya, beton ve asfalt alan olmak üzere üç farklı özelliğe malzemeden oluşmaktadır. Şekil 48’de bu üç farklı arazi kullanımı görülmektedir.



Şekil 48. Modellemelerde kullanılan üç farklı malzeme

### 2.8.5. 2 Boyutlu Modelleme Aşaması

Binal ve Ercanoğlu (2010) Kula, Manisa jeopark alanındaki kaya düşmesi potansiyelini değerlendirdikleri çalışmalarında öncelikle arazi çalışmaları ile düşen blokların boyutlarını belirlemişler, hat etütleri ve örnekleme çalışmaları yapmışlardır. Araştırmacılar kaya düşmesi analizleri kapsamında iki boyutlu kaya düşmesi analizi yapan Rocfall V.4.0 programını kullanmışlardır. Bu program yardımıyla düşen bloklara ait ilerleme mesafeleri, kinetik enerji değerleri, blok hızları belirlenmiştir.

Sadagah (2010) Saudi Arabistan'da kaya düşmelerini değerlendirdikleri çalışmalarında Rocfall yazılımını kullanmışlardır. Kaya düşmelerine ait ilerleme mesafesi, blokların enerjisi, sıçrama yüksekliği gibi veriler elde edilmiş ve bölge için kaya düşmelerinden korunmaya yönelik güvenli tasarımlar değerlendirilmiştir. Duzgun vd., (2011) Amasya'daki Harşena Dağı'nın kaya düşmesi ve kaya şevi kayması probleminin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kaya şevi kaymalarının güvenilirlik indeksini, olasılık ve nümerik analiz metodlarına dayalı yöntemlerle tahmin etmişler, ortaya çıkabilecek kayıpların belirlenmesine dayalı risk analizi gerçekleştirmişler ve alternatif mühendislik çözümleri önermişlerdir.

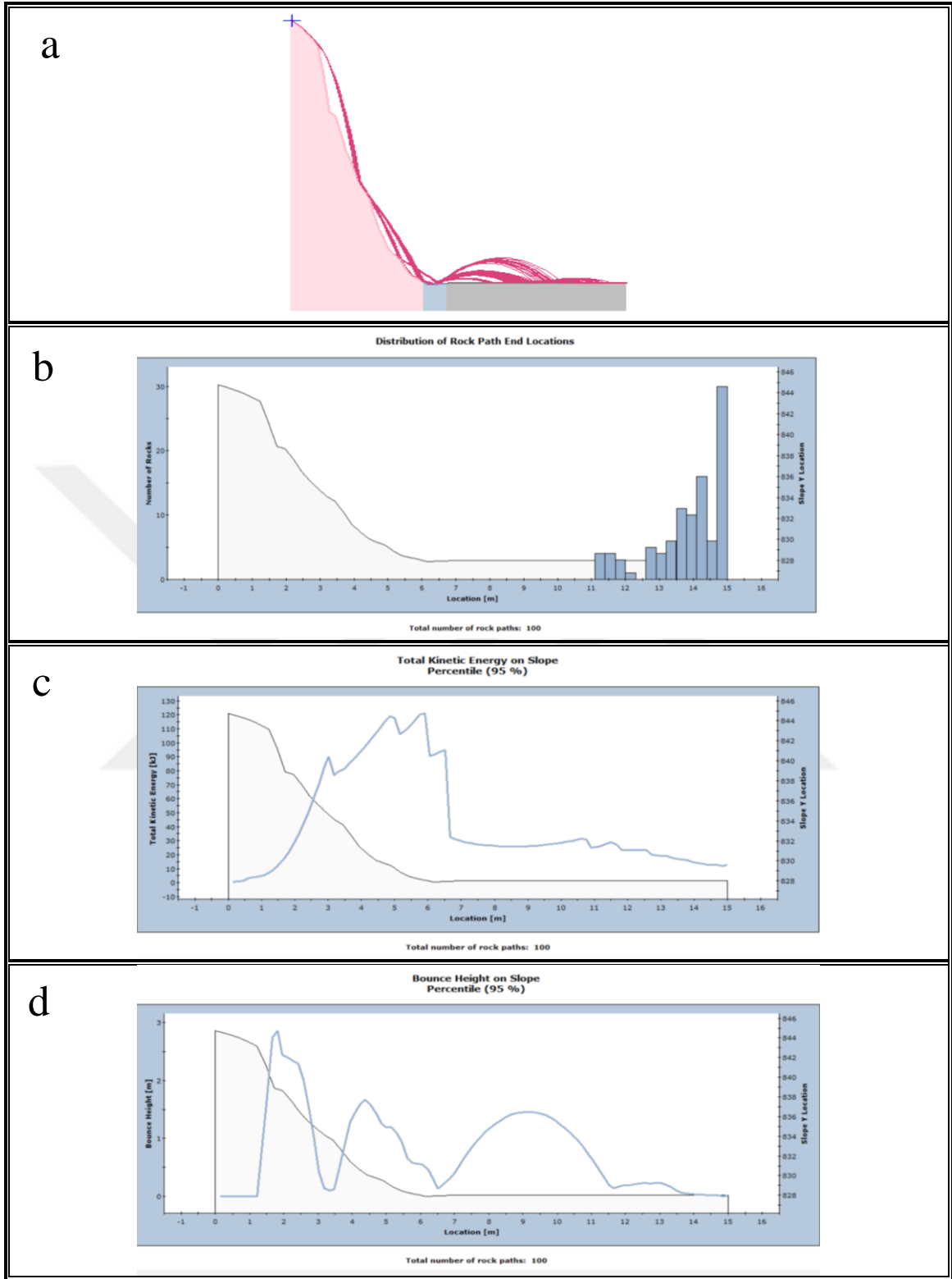
Altındere vadisi boyunca kaya düşmesi potansiyeli olan alanların modellenmesi aşamasında simülasyon yöntemleri uygulanmıştır. İki boyutlu kaya düşmesi analiz için en yaygın kullanılan Rocfall V.6 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım ile çok sayıda simülasyon uygulanarak blokların ilerleme mesafeleri ve yayılımları, sıçrama yükseklikleri ve enerjileri belirlenmiştir. Arazi gözlemleri ve Google Earth görüntülerinin değerlendirilmesi ile Coğrafi bilgi sistemi ortamında kaya düşmesi kaynak alanı oluşturulmuştur. Kullanılan programda (Rocfall) düşen kaya bloğunun yüzey ile temas ettiği noktalardaki enerji sönümlenmelerini kontrol eden normal ve tanjansiyel katsayıları (normal ( $R_n$ ) and tangential ( $R_t$ ) coefficient of restitution) girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Çalışma alanlarındaki malzeme türüne bağlı değişen bu değerler Rocscience geri sıçrama katsayıları tablosundan belirlenmiştir (Tablo 31), (Rocscience geri sıçrama katsayıları tablosu Ek Tablo 2).

Tablo 31. malzeme türüne bağlı değişen Rn ve Rt değerleri

Malzeme türü	Rn	Rt
Ana kaya	0.5	0.95
Beton	0.48	0.53
Asfalt	0.4	0.9

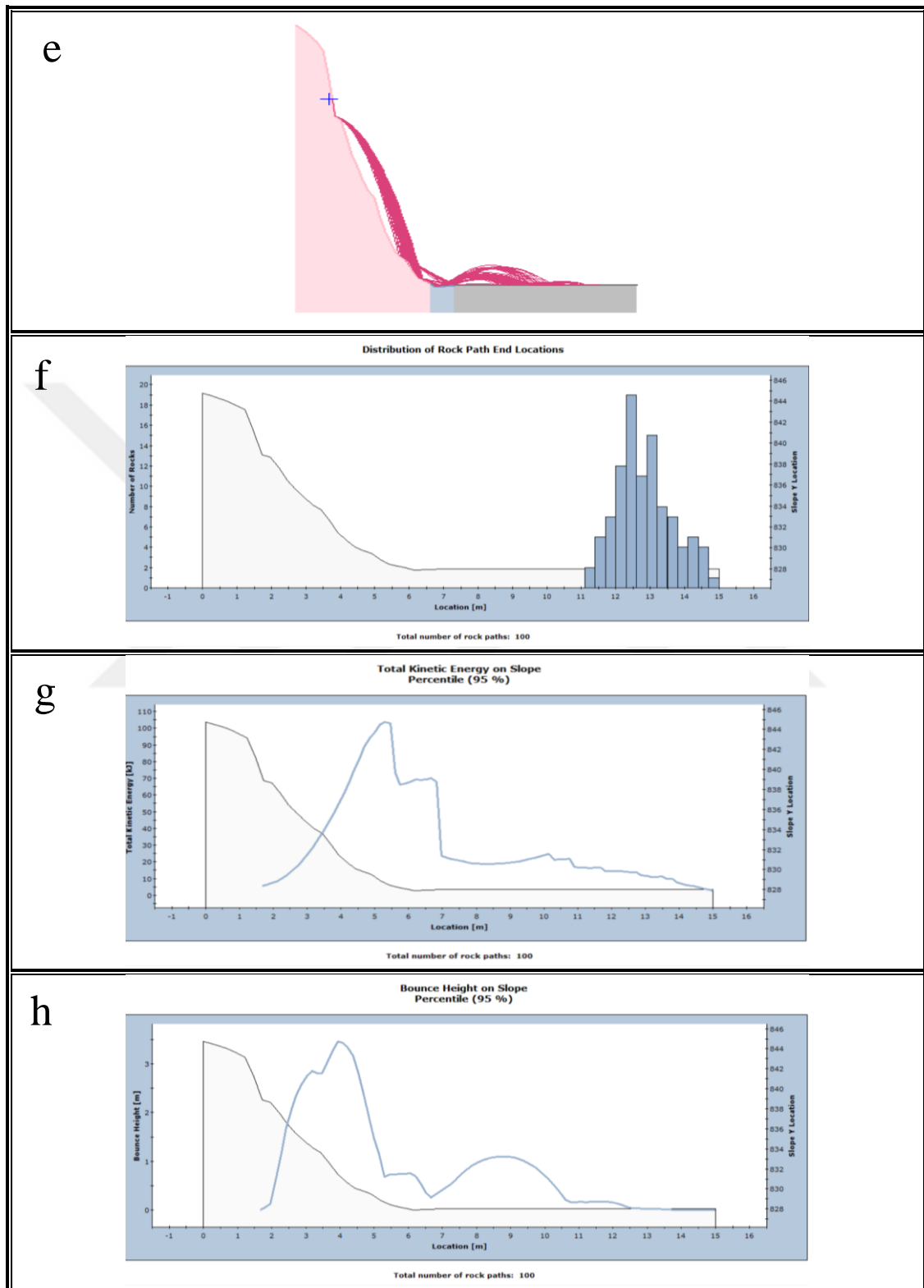
Her bir alandan elde edilen kesit için kaya düşmesi simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıda getirilmiştir.



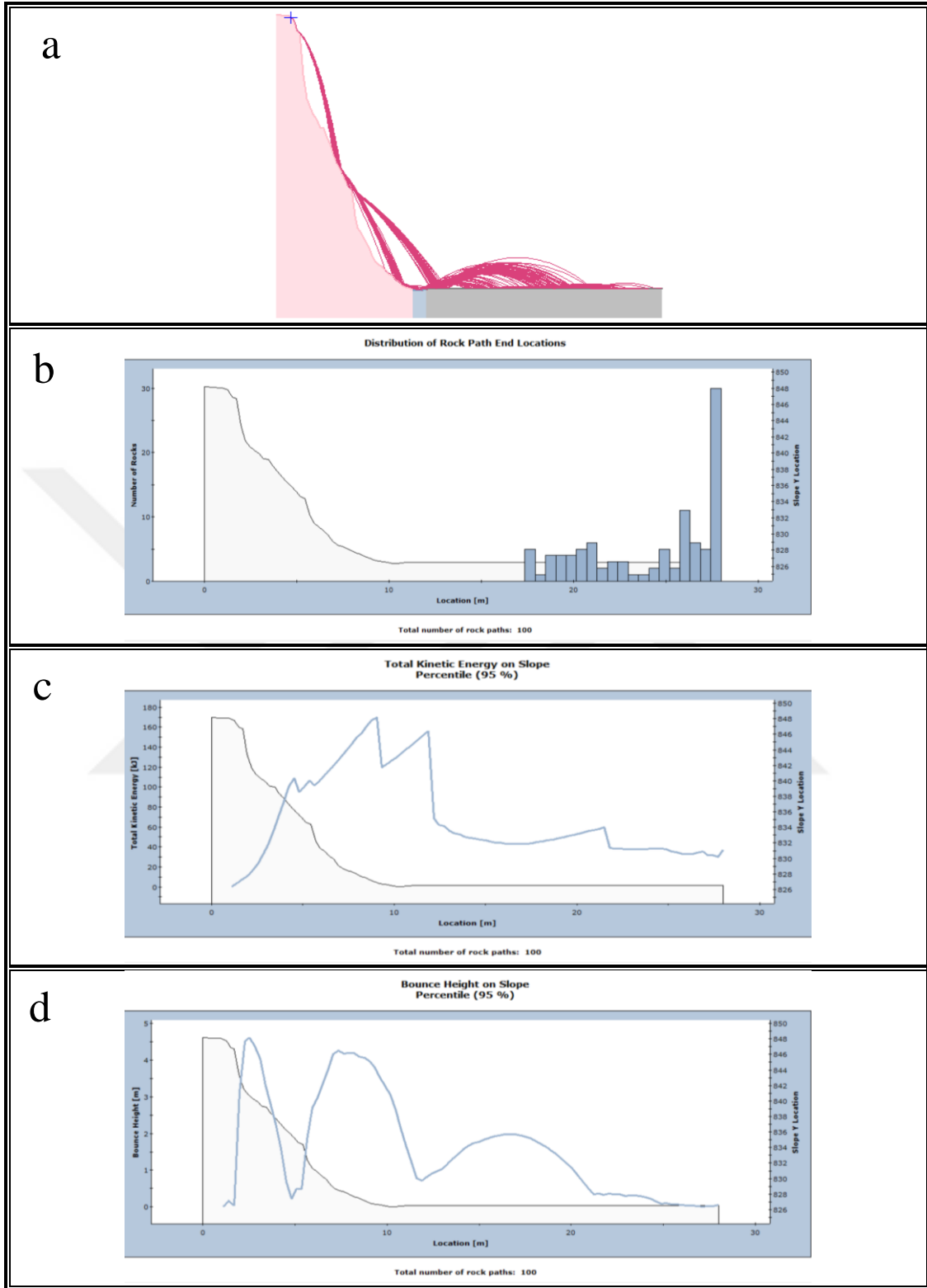


Şekil 49. 1. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

Şekil 49'un devamı

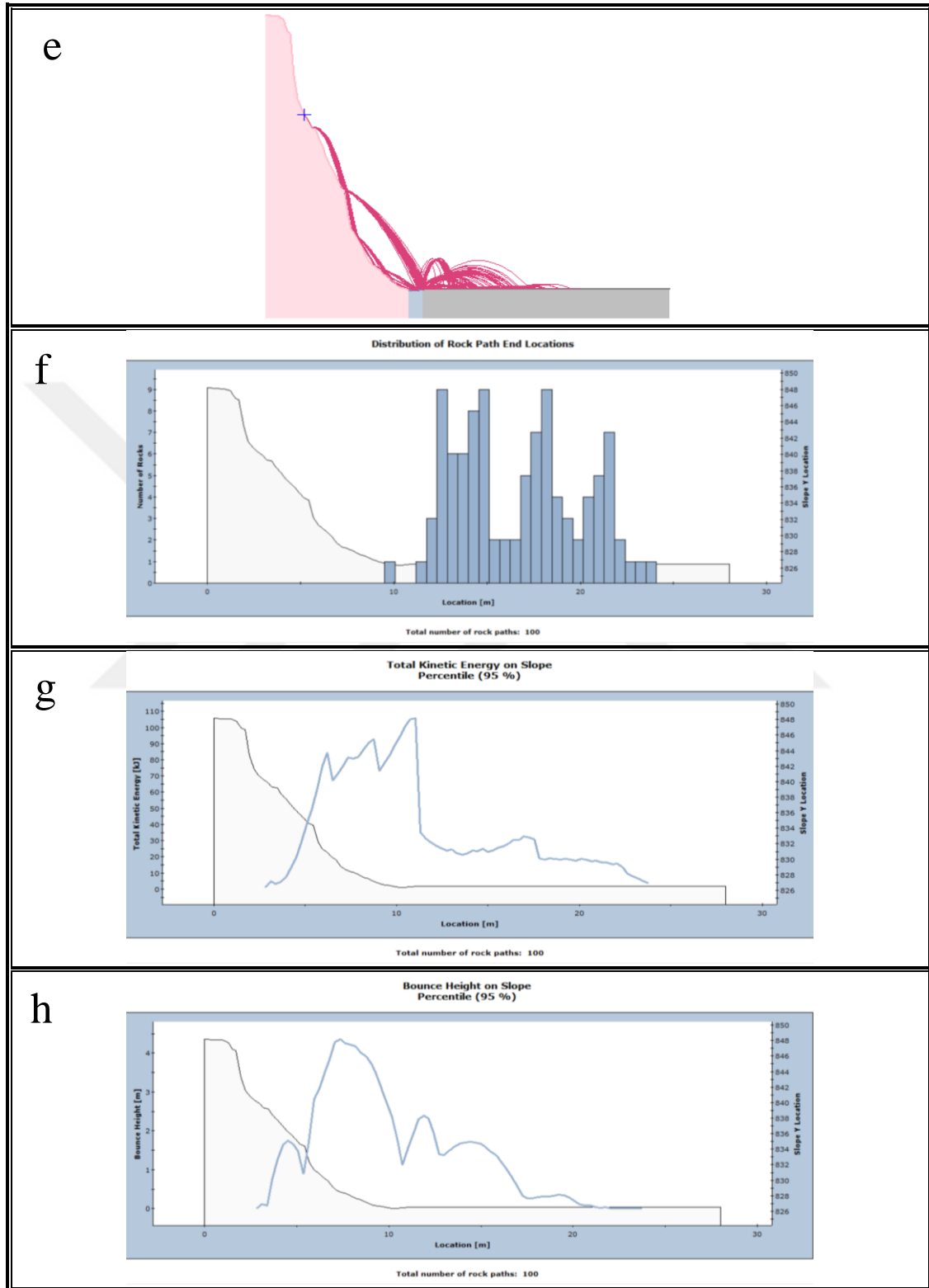


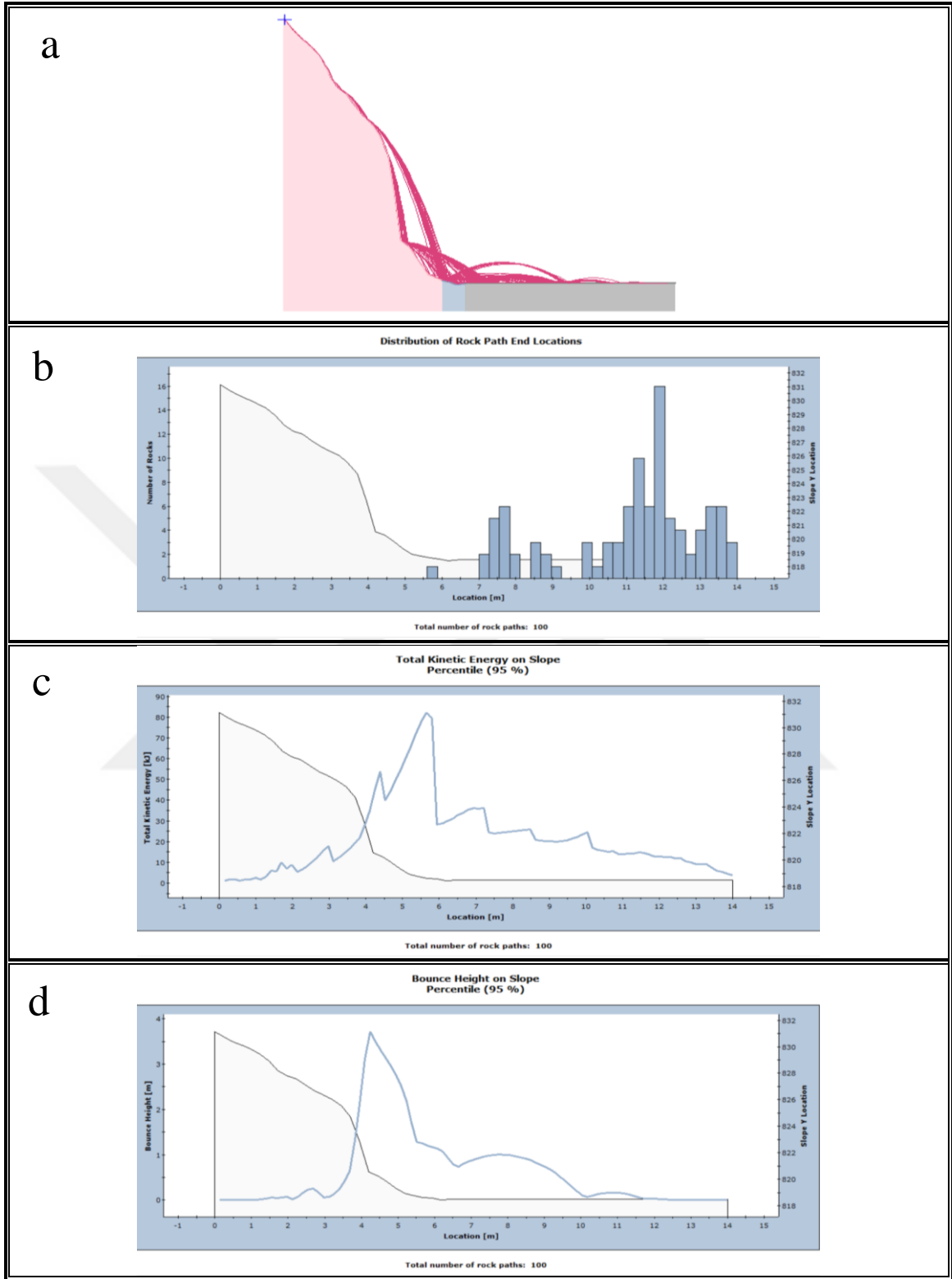




Şekil 50. 2. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

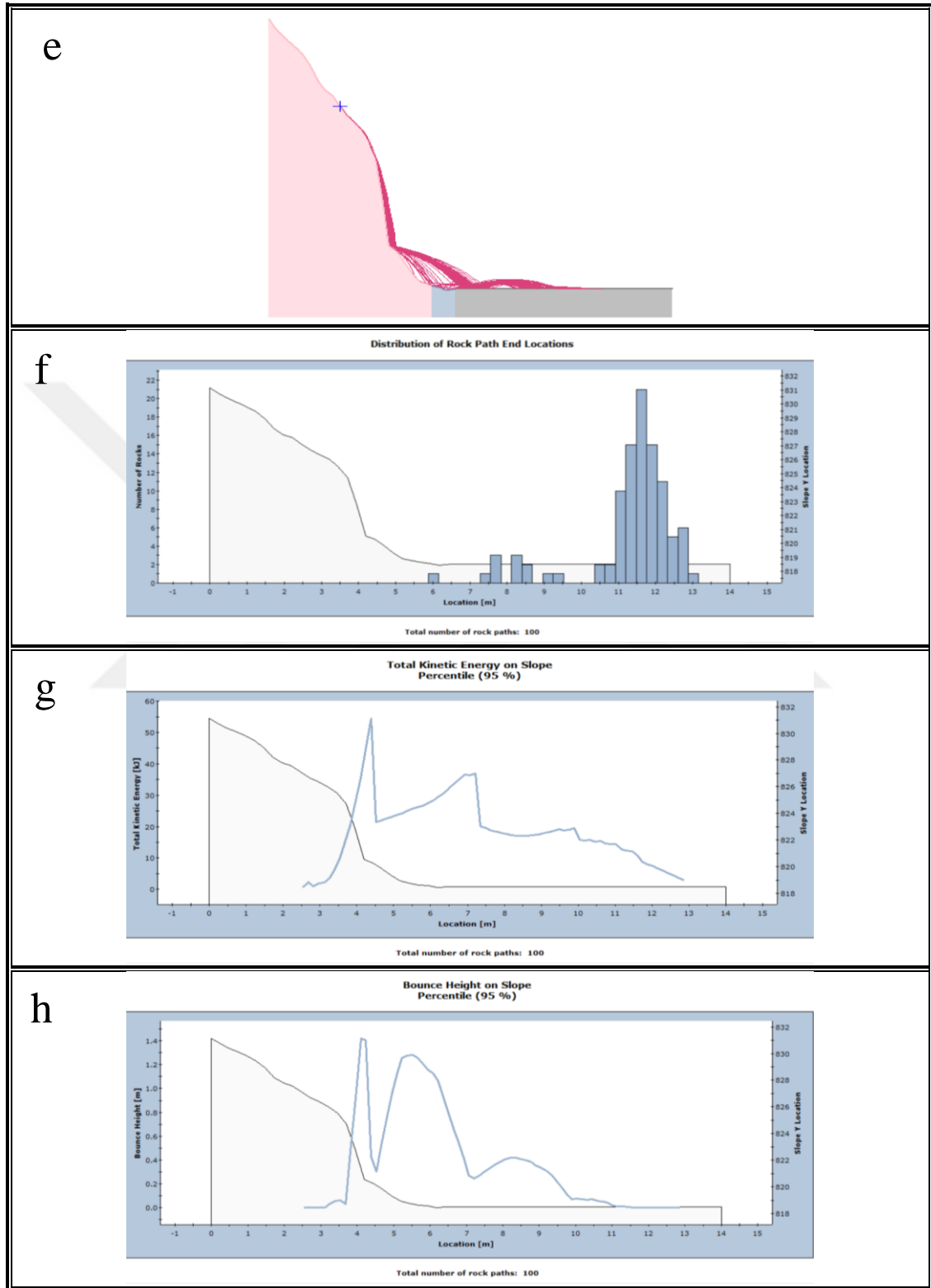
Şekil 50'nin devamı

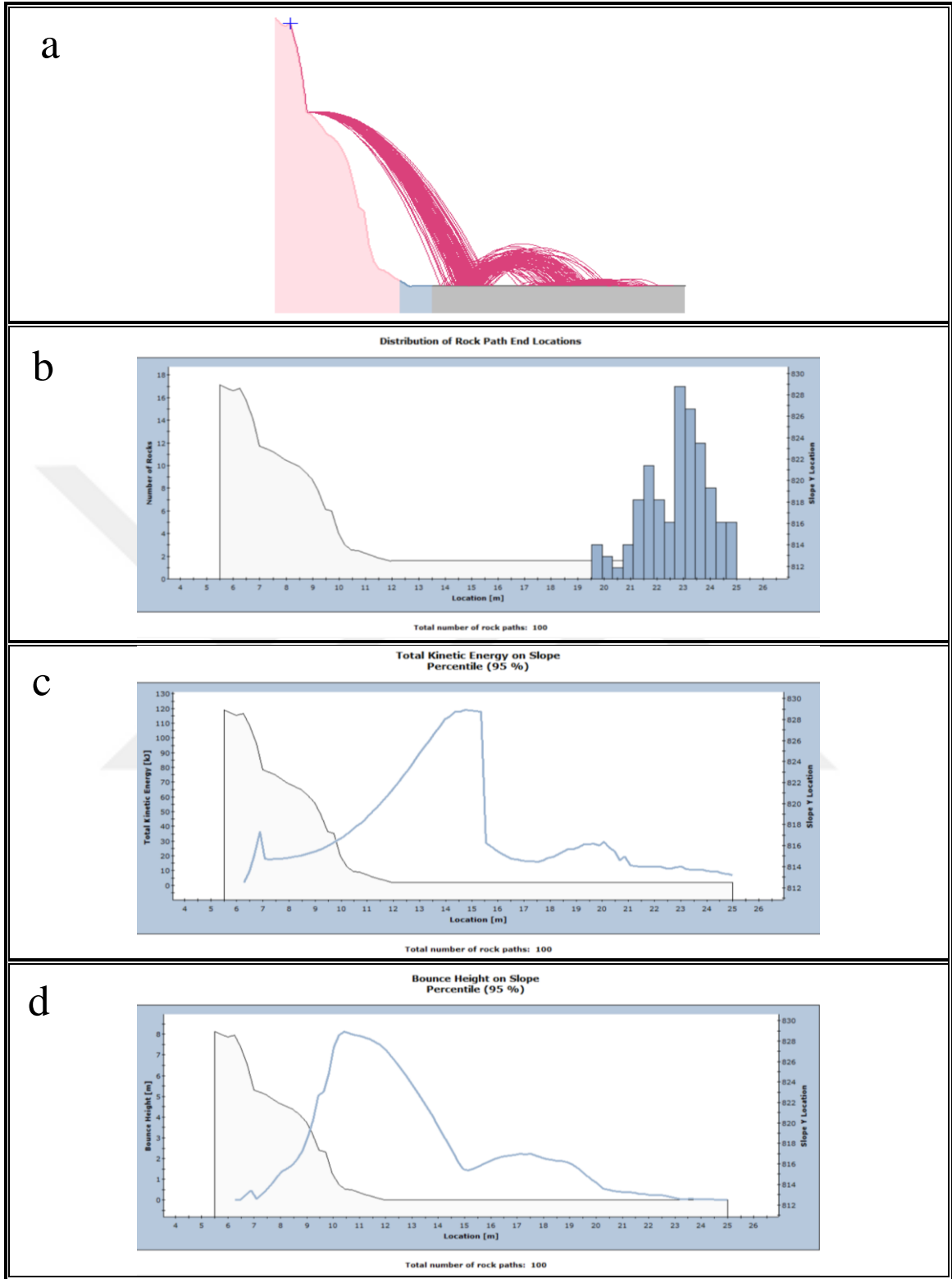




Şekil 51. 3. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

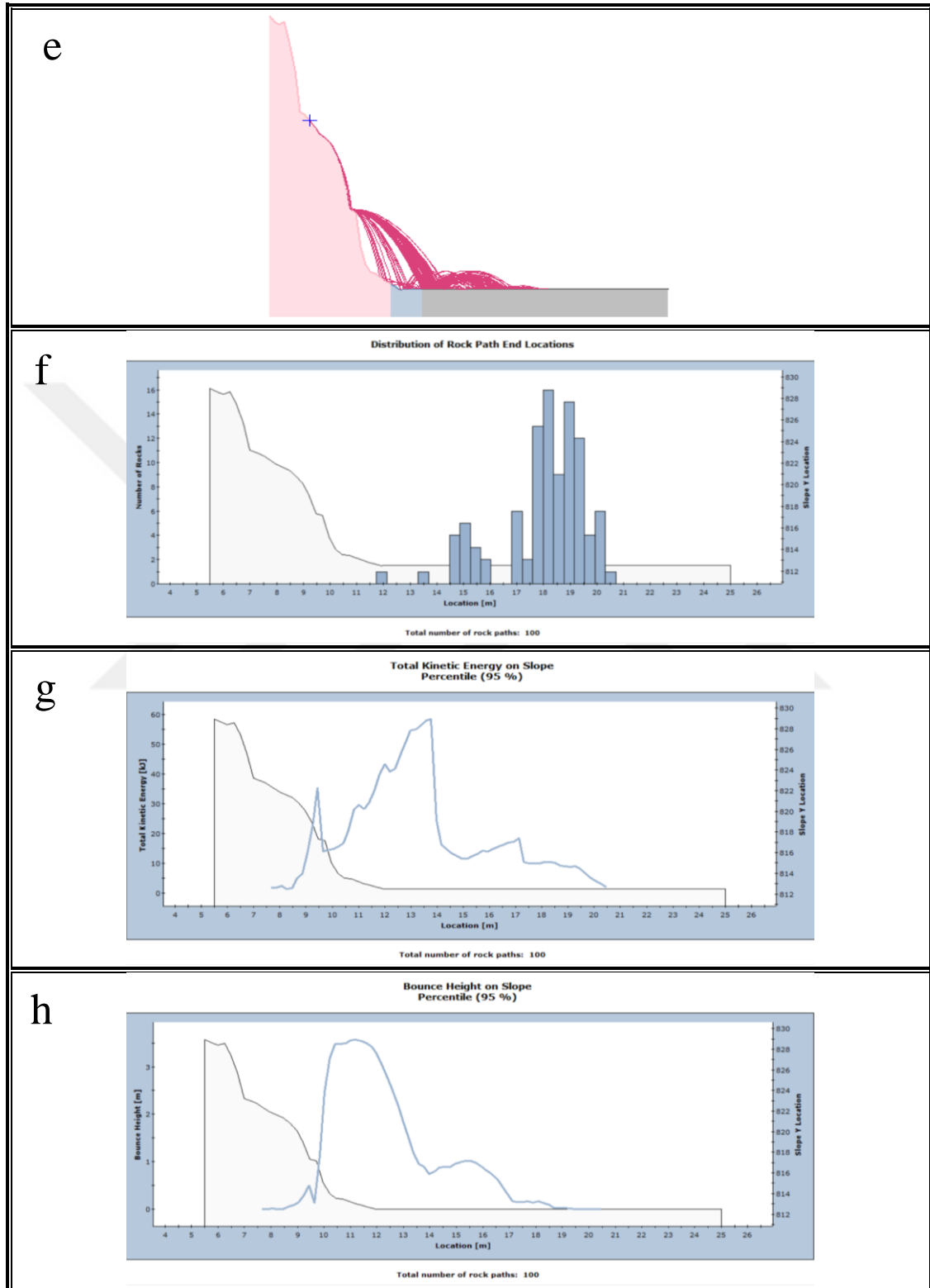
Şekil 51'in devamı

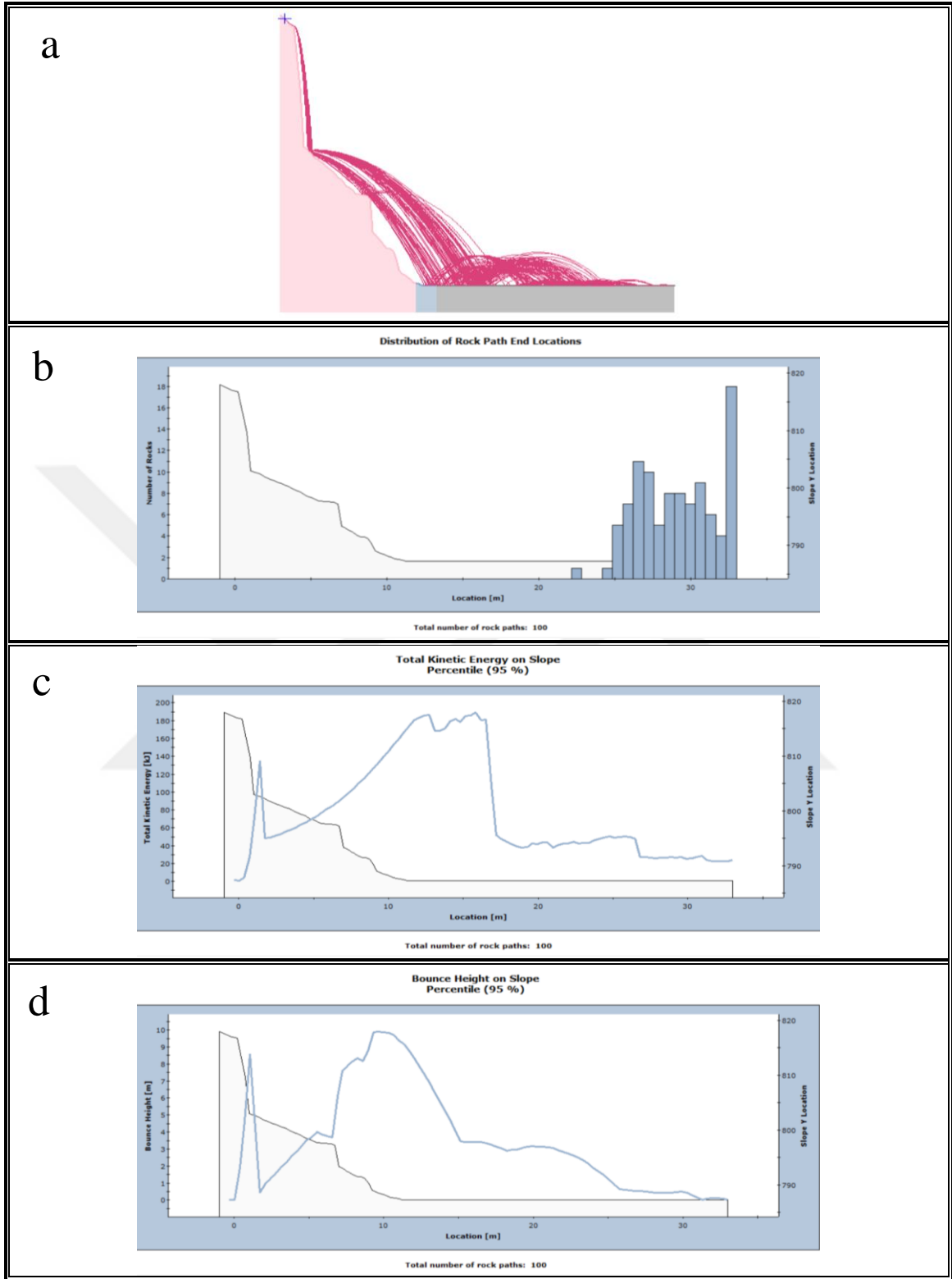




Şekil 52. 4. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

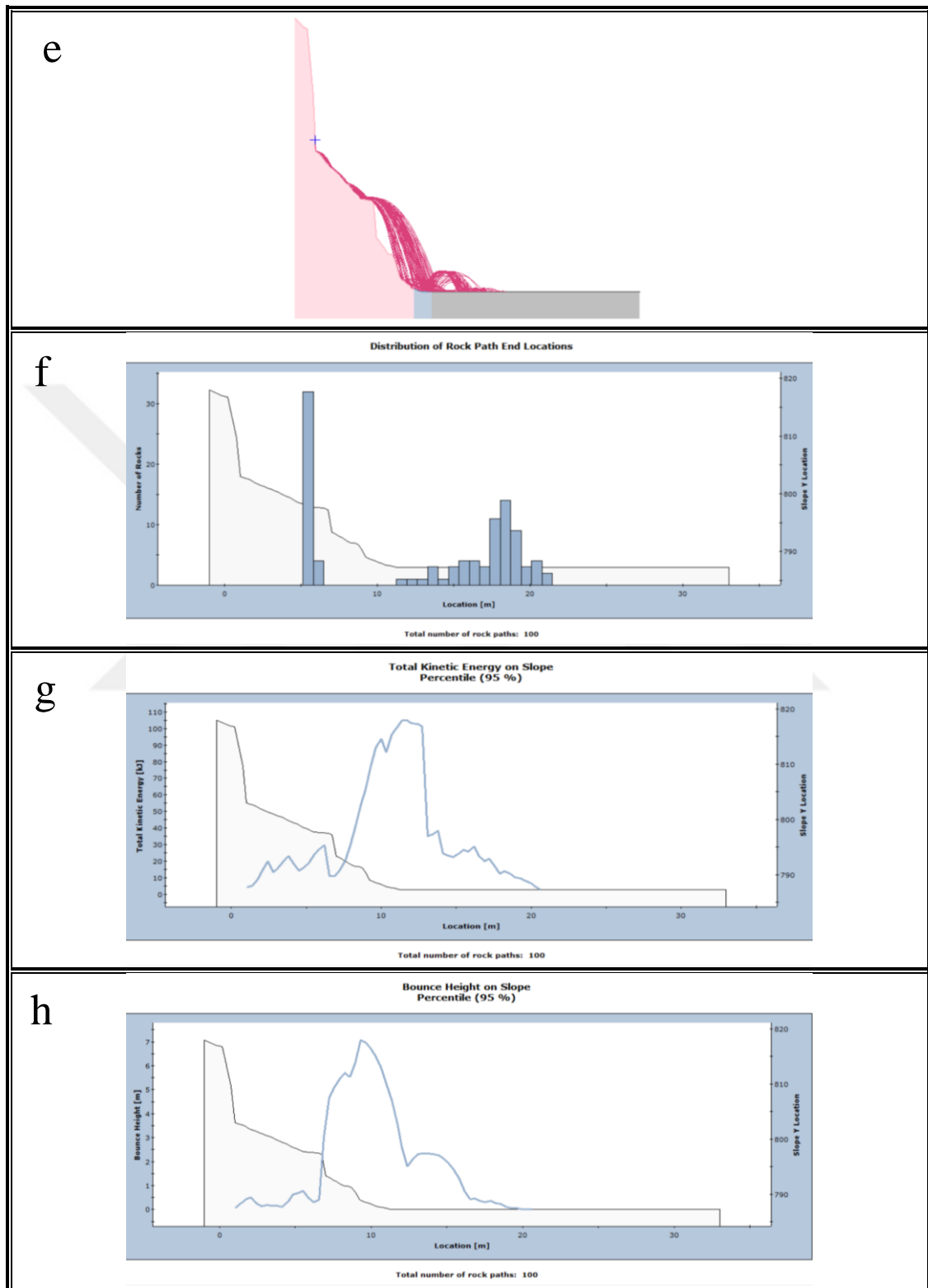
Şekil 52'nin devamı



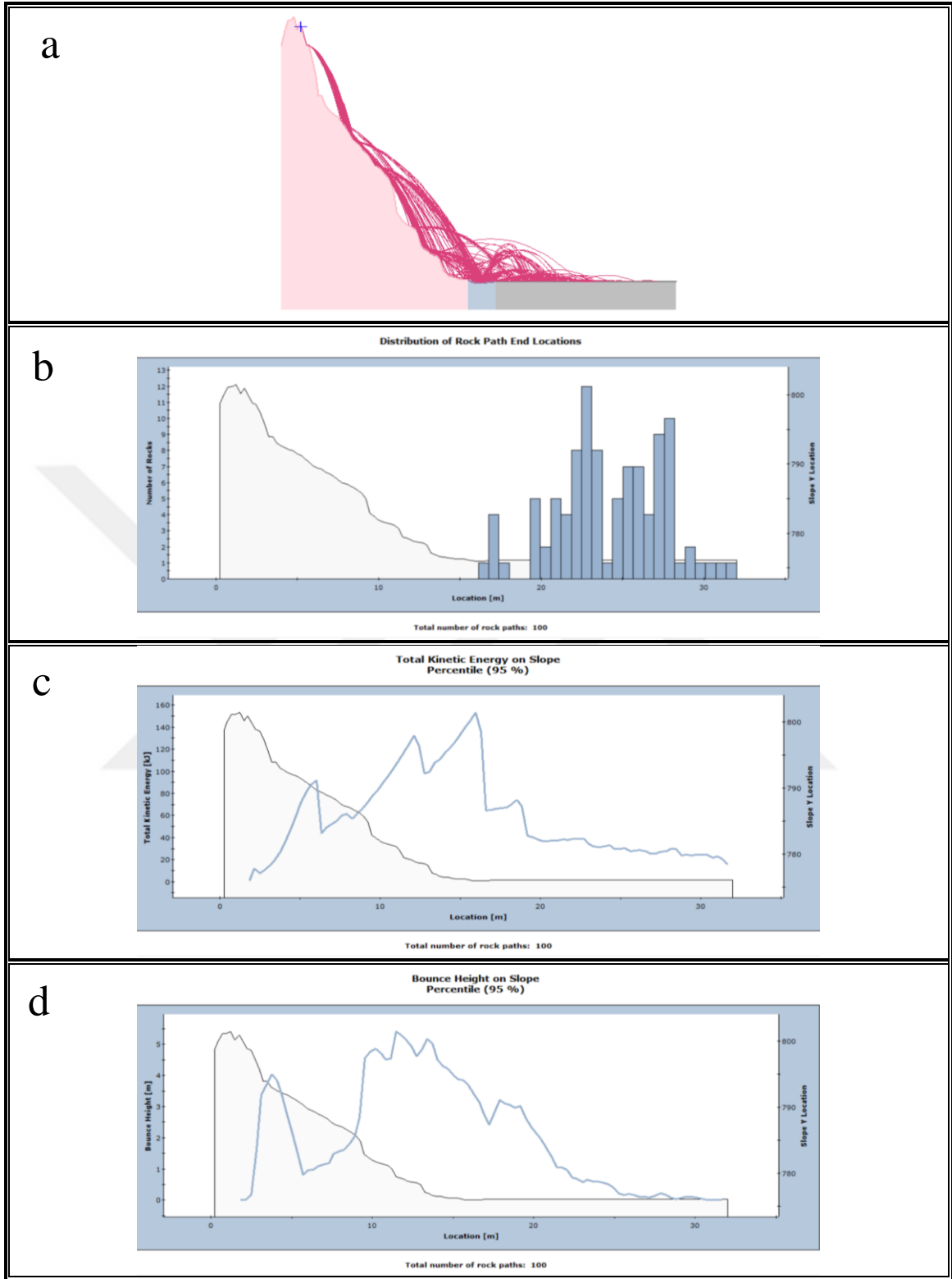


Şekil 53. 5. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

Şekil 53'un devamı

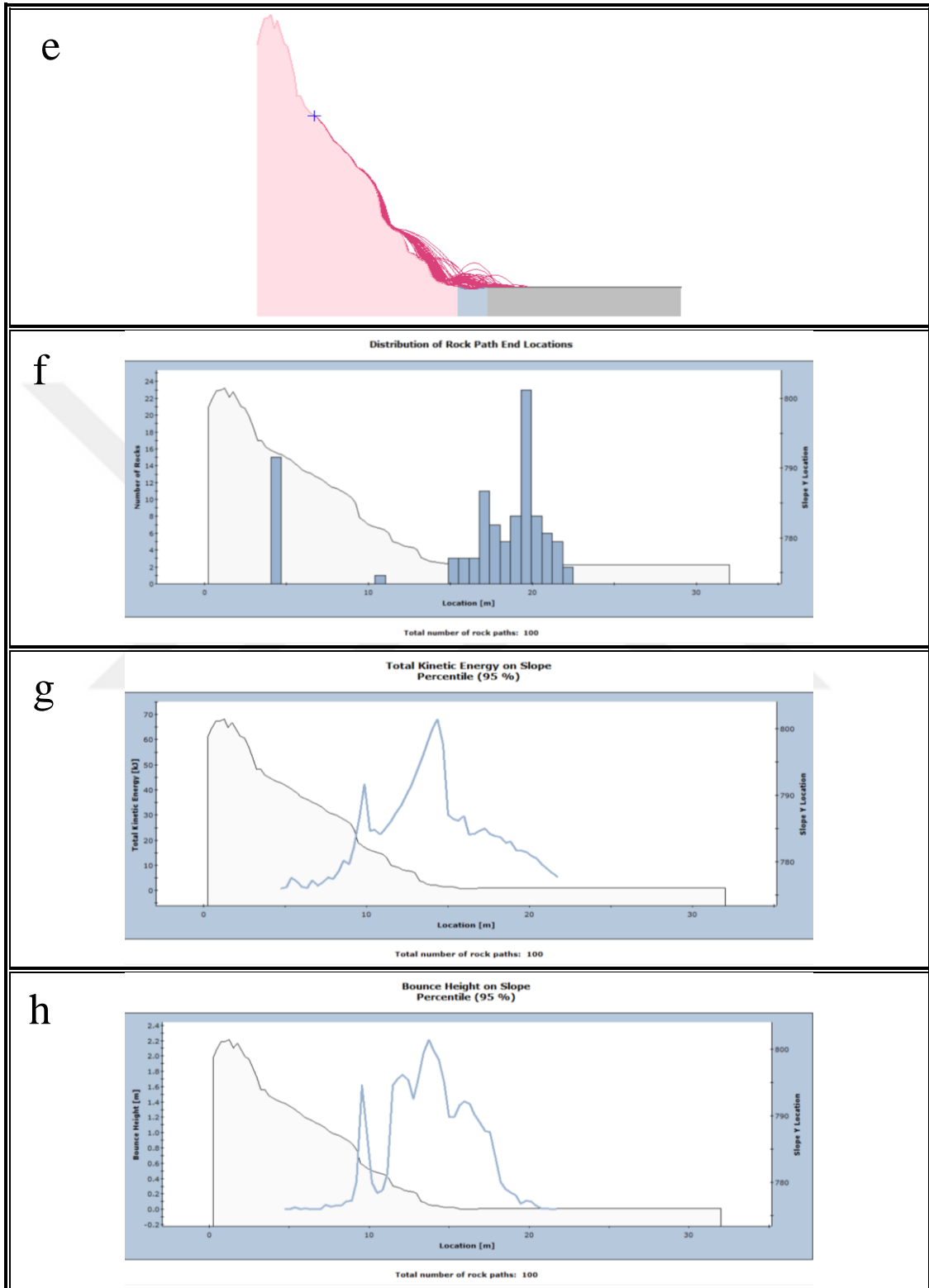


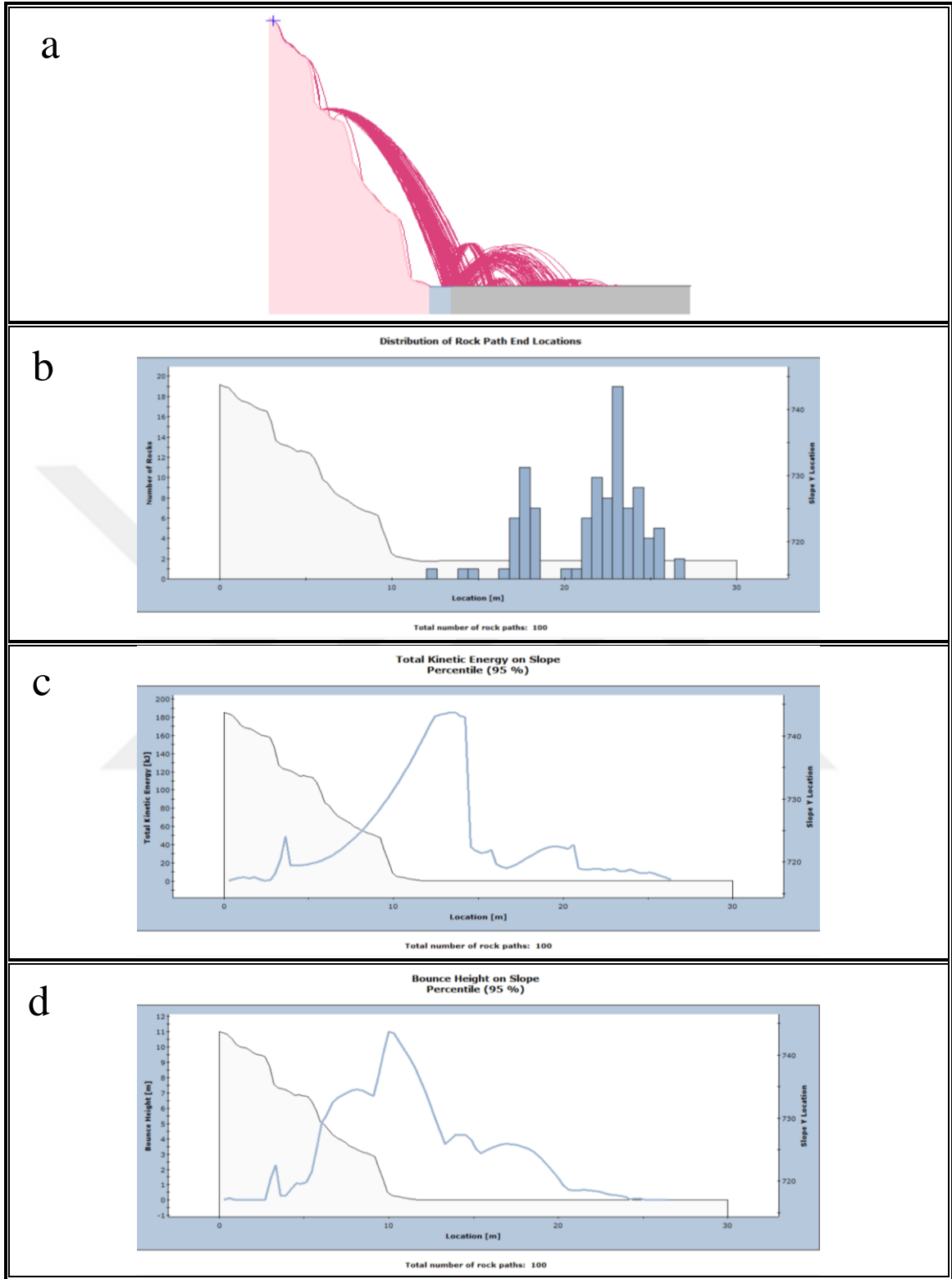




Şekil 54. 6. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

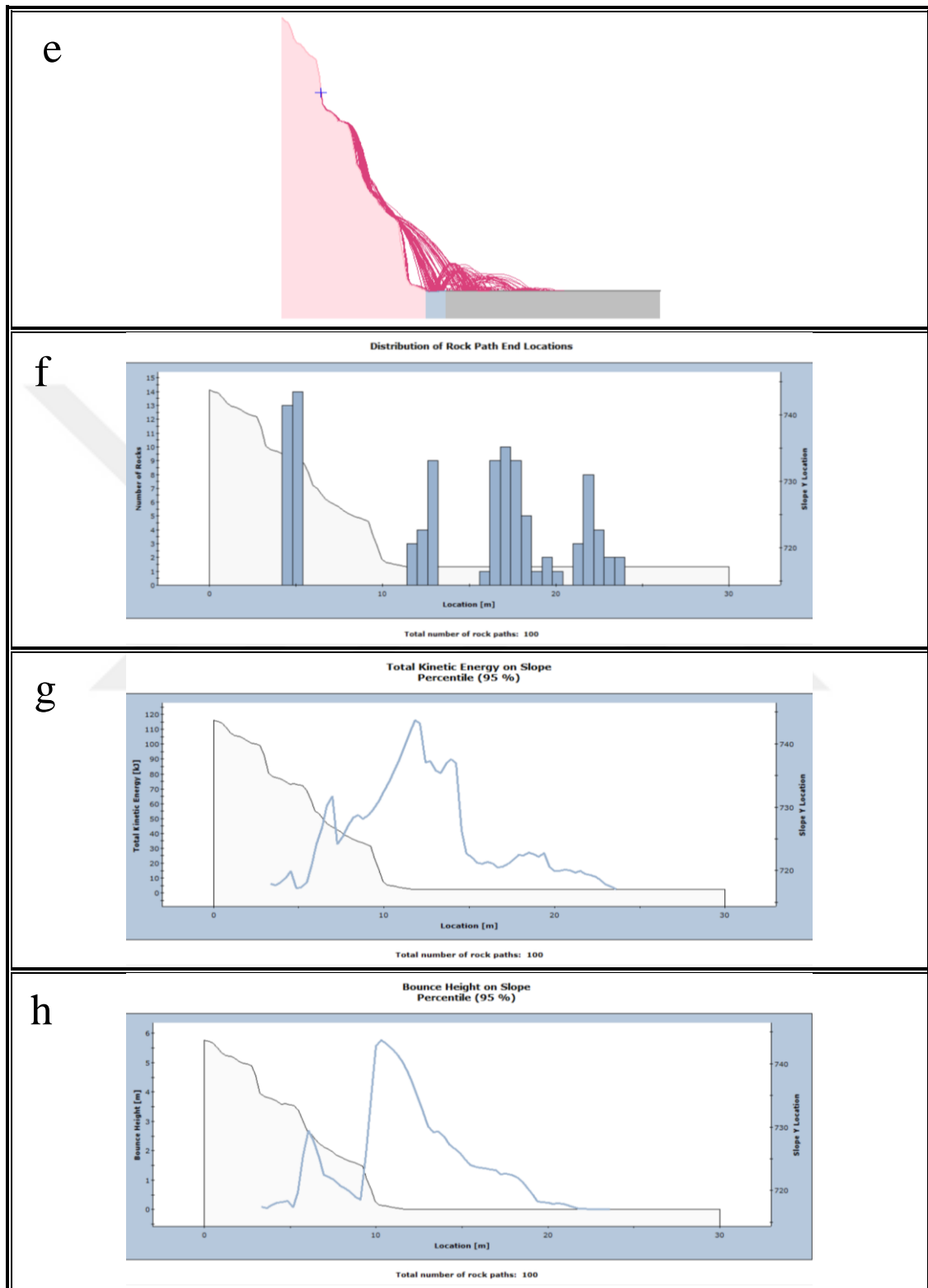
Şekil 54'ün devamı

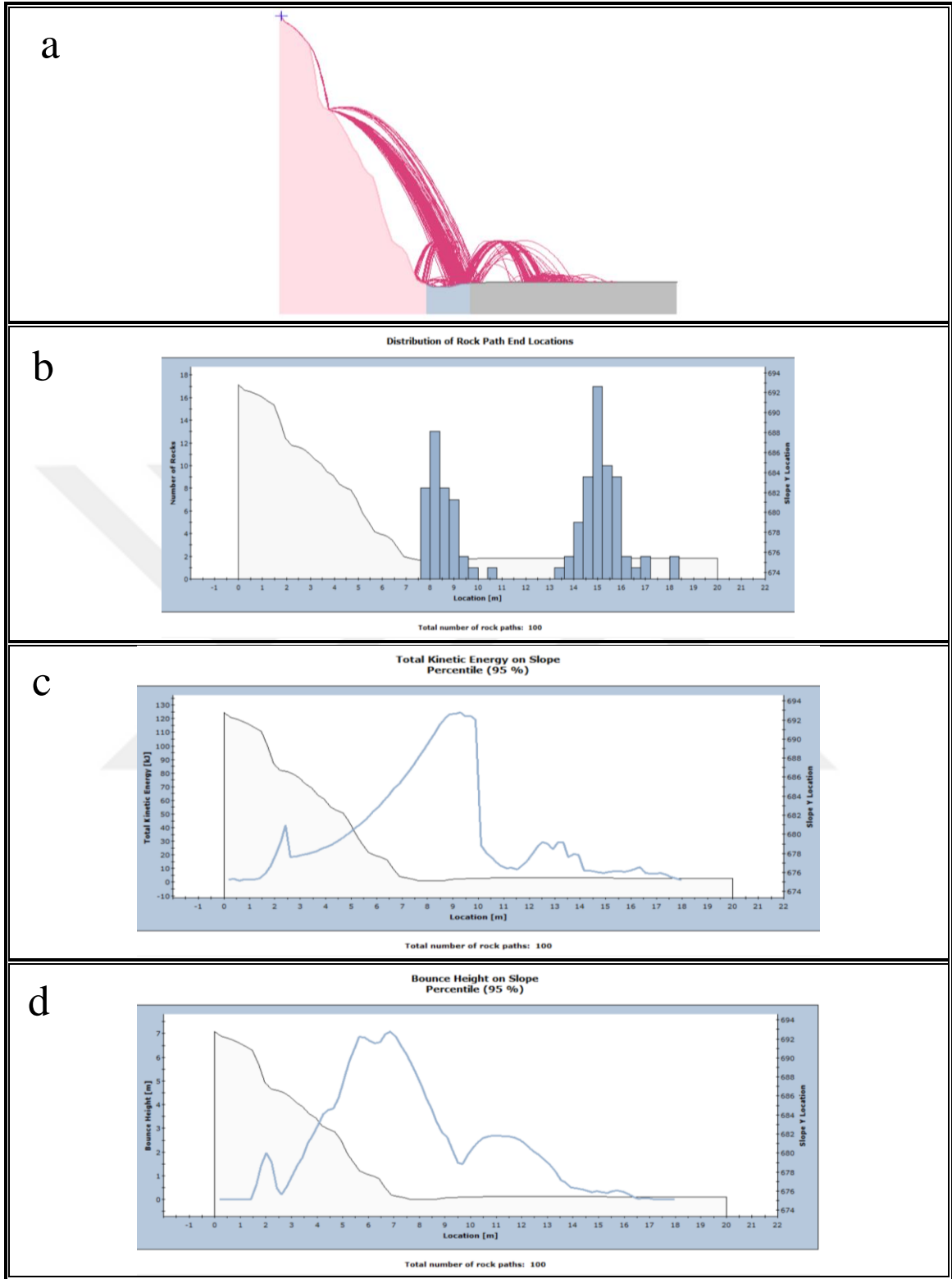




Şekil 55. 7. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

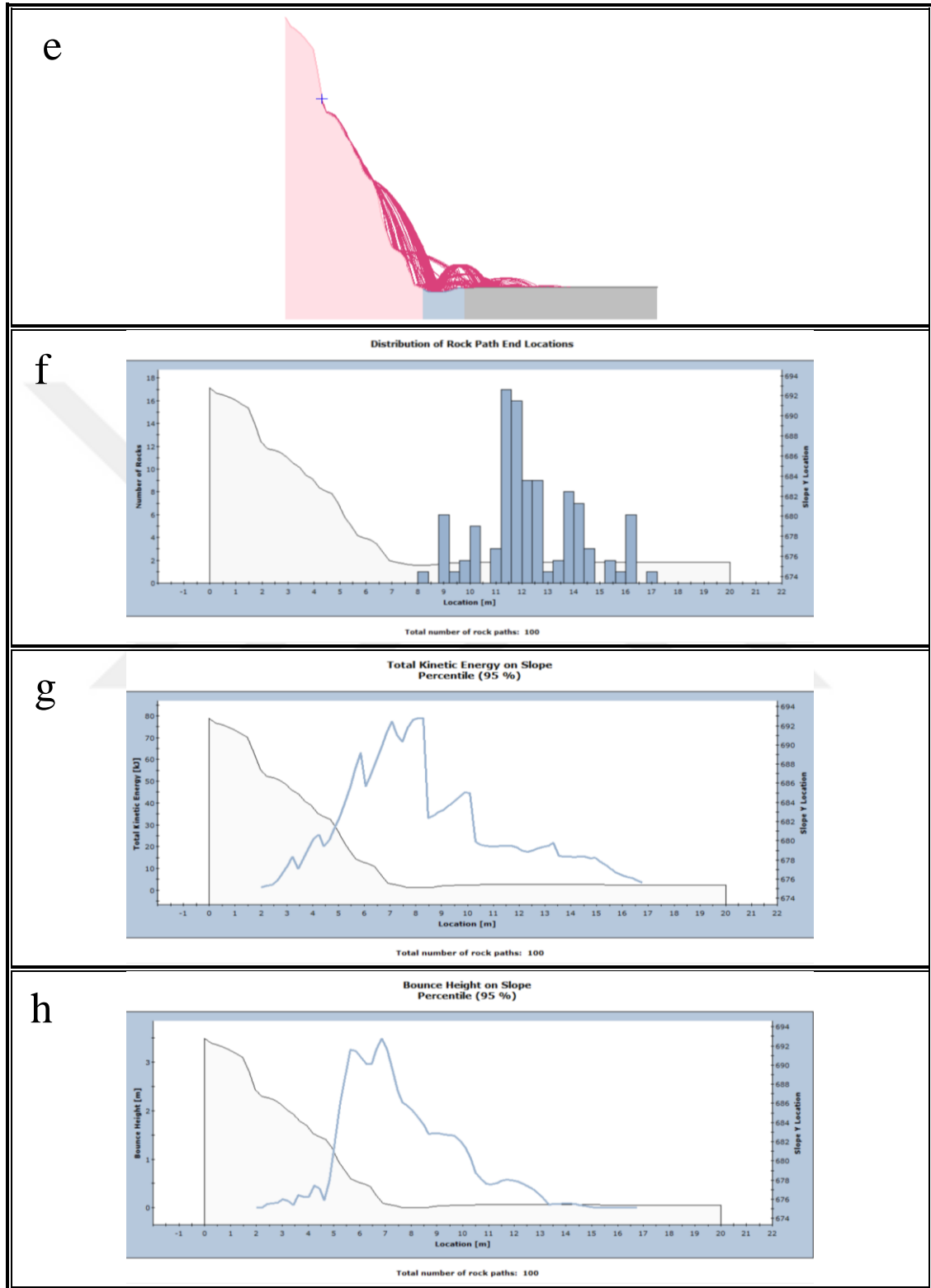
Şekil 55'in devamı

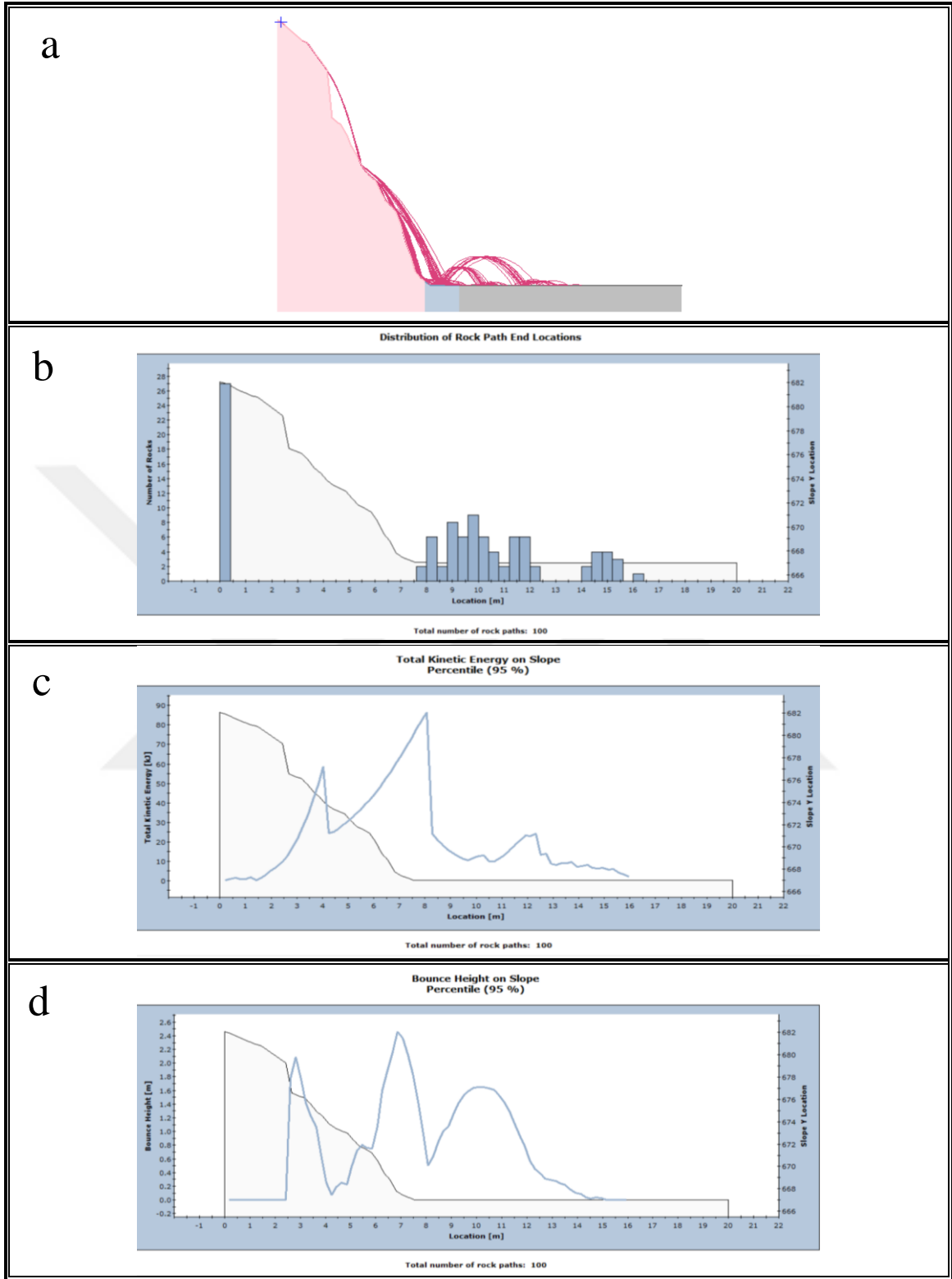




Şekil 56. 8. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

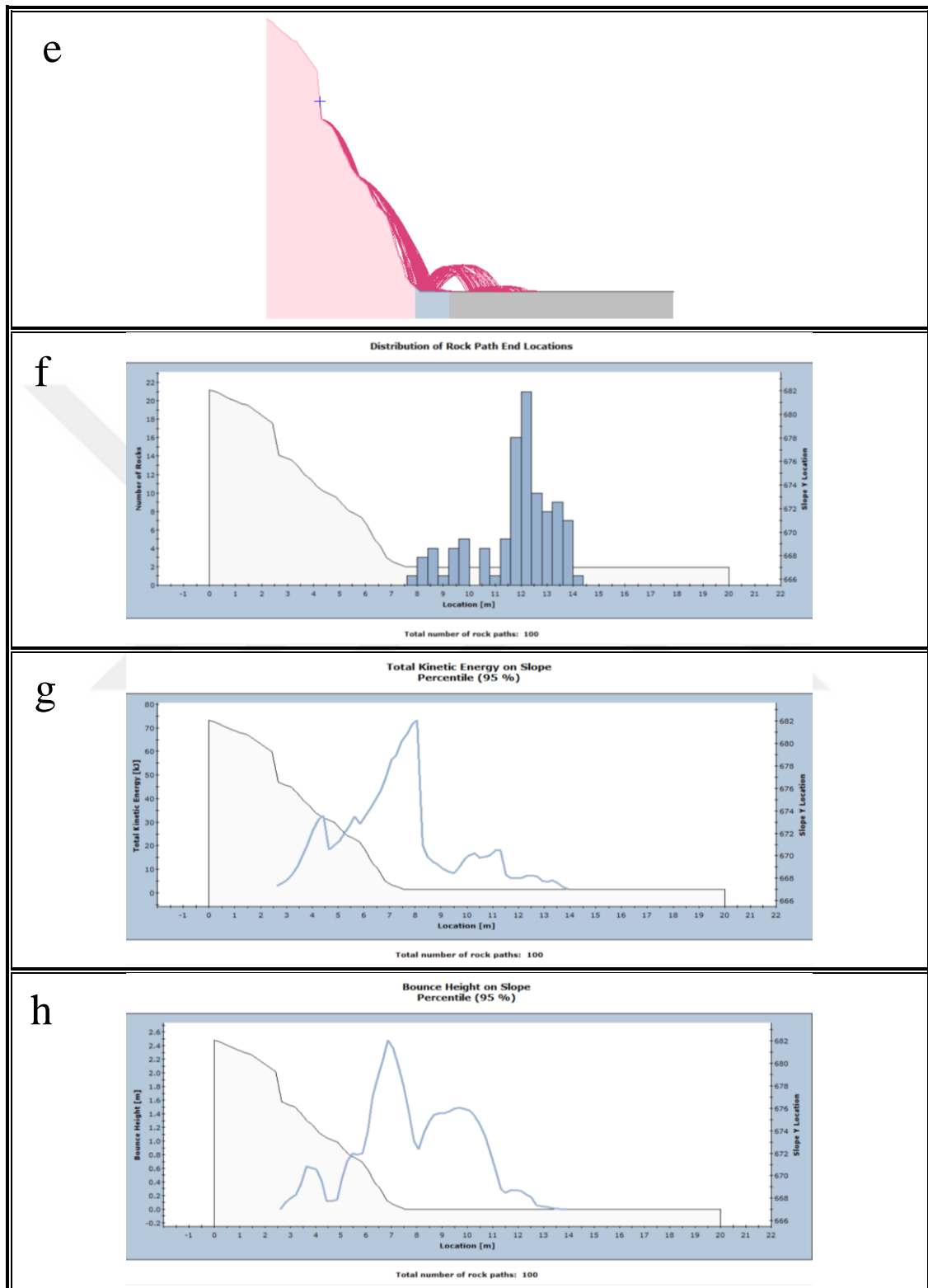
Şekil 56'nin devamı



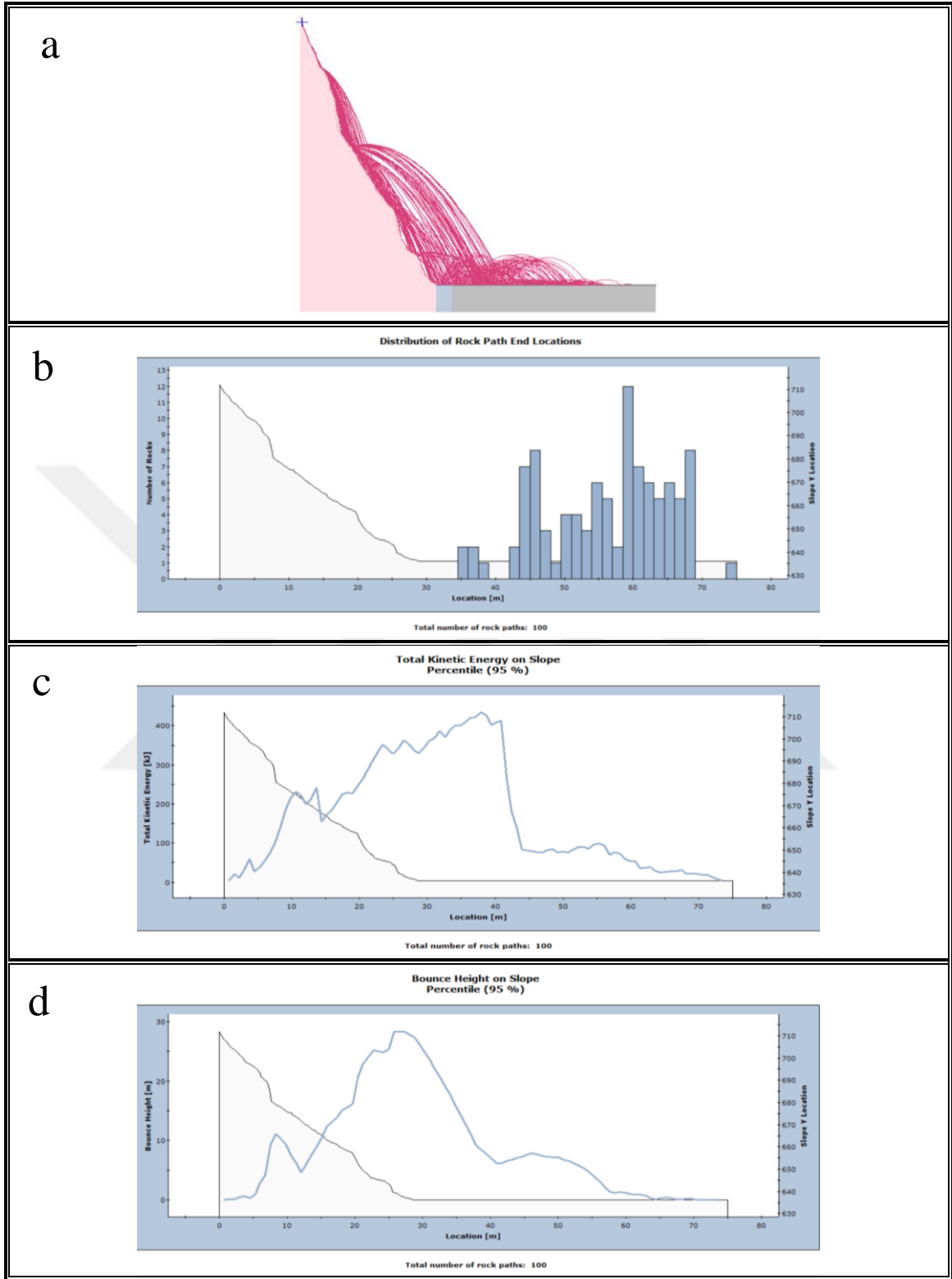


Şekil 57. 9. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

Şekil 57'nin devamı

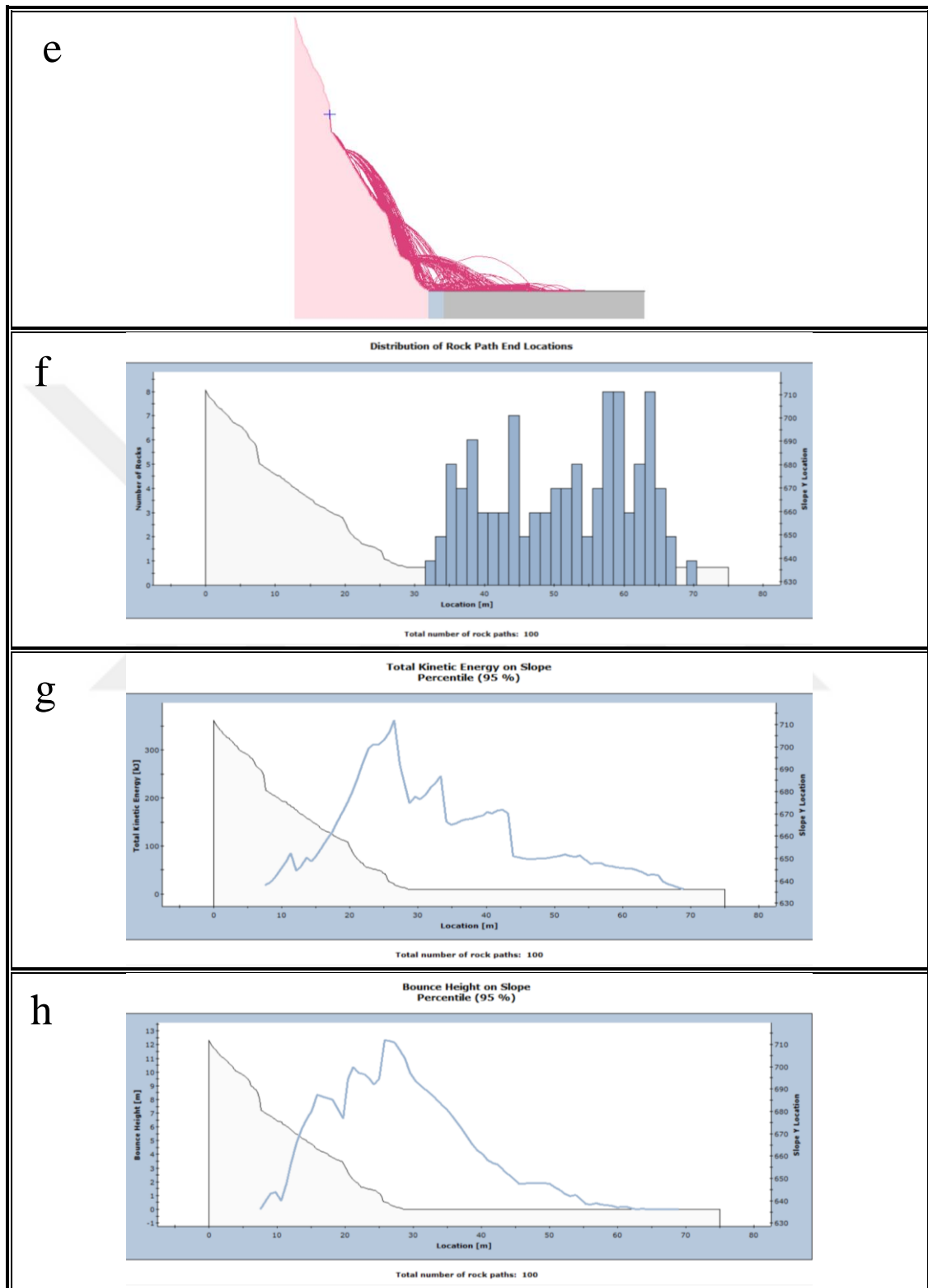


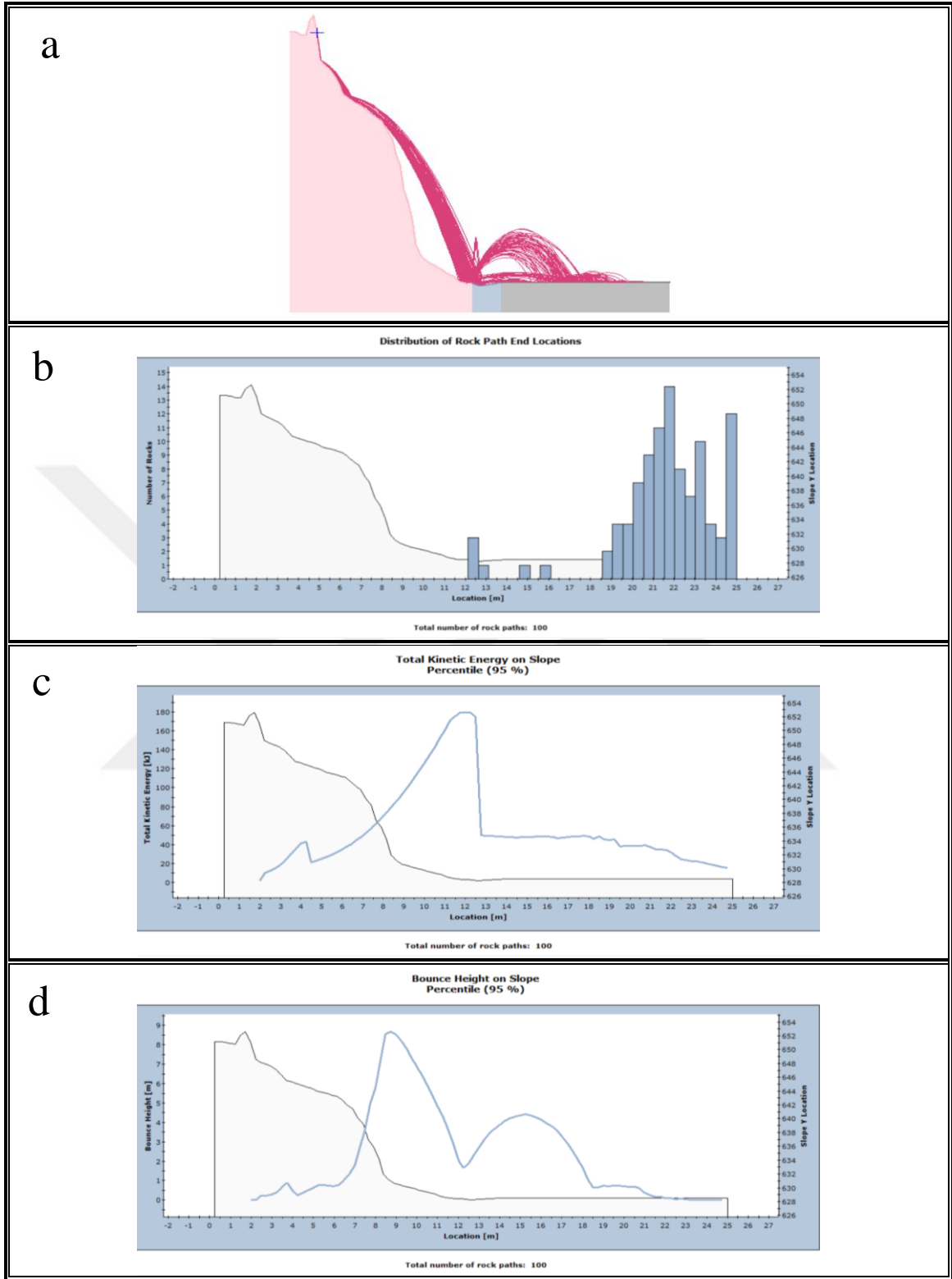




Şekil 58. 10. Lokasyon Rocfall simülasyon sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

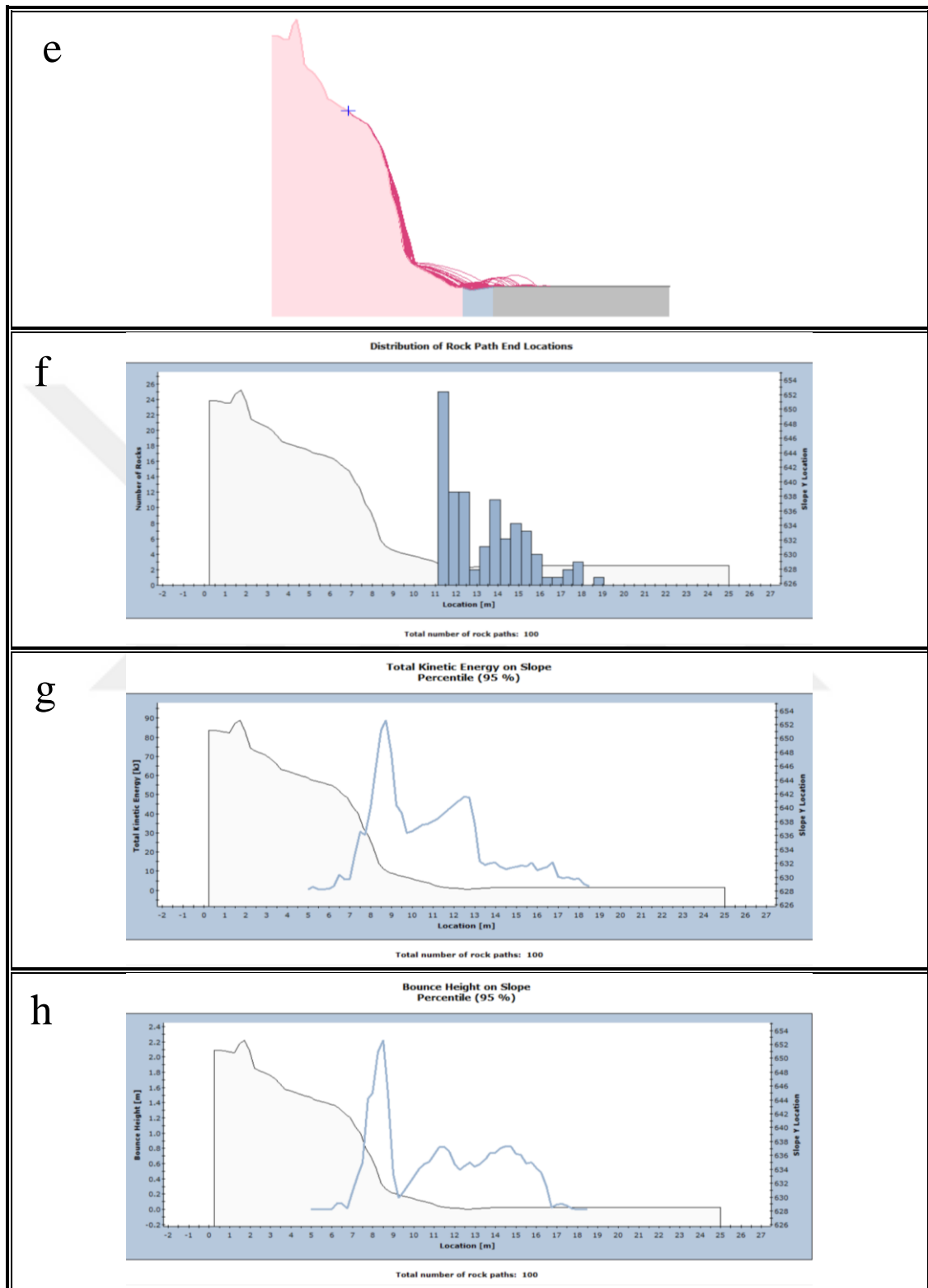
Şekil 58'in devamı





Şekil 59. 11. Lokasyon Rocfall simülasyonu sonuçları; a) alana ait kaya bloklarının izlediği yol. b) alana ait kaya bloklarının ilerleme mesafesi. c) alana ait kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. d) alana ait kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri. e) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının izlediği yol. f) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi. g) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının toplam kinetik enerjisi. h) orta kısımlardan kopan kaya bloklarının sıçrama yükseklikleri

Şekil 59'un devamı



### **2.8.6. Coğrafi Bilgi Sistemi Ortamında 3 Boyutlu Kaya Düşmesi Yörüngesi İçin Modelleme Yaklaşımı (Rockfall Analyst)**

RA iki ana bölümden oluşur: (1) 3B kaya düşmesi yörünge simülasyonu ve (2) kaya düşmelerinin uzamsal dağılımı için tarama modellemesi. Kaya düşmesi simülasyon modüllerinin çoğu gibi, kaya düşmesi yörüngelerini simüle etmek için RA'da "toplu kütle" veya nokta yaklaşımı kullanılır. RA, GIS modelleme ortamlarına sıkı bir şekilde entegre edilmiş bir uzantıdır. Entegrasyon önemlidir, çünkü kullanıcılar modellerinin kalitesini görsel bir şekilde ölçebilmeli ve tahmin edilen yüzeylerin istatistiksel hatasını ölçerek önemli belirsizlikleri analiz edebilmelidir.

SYM'ler, kaya düşmesi seeder'lar (kaynaklar) ve zemin yüzeyi özellikleri, 3B kaya düşmesi yörüngesini hesaplamak için birincil girdilerdir. SYM'Ler, hem eğim ve eğim yönü açıs rasterlerini oluşturmak için hemde önemli yüzey topografyasını hücre hücre modellemek için kullanılır. Kaya düşme sürecini ve fiziksel özelliklerini hesaplamak için yüksek kaliteli topografya çok önemlidir. Kaya düşüşü kaynakları şekil dosyalarında saklanan noktalar veya çoklu çizgi özellikleri olarak tanımlanabilir. Özellikler, seeder kütleleri, ilk yatay hız ( $V_{xy}$ ) ve ilk dikey hız ( $V_z$ ), dönüşüm açısı, dönüşüm hızı ve kaya düşmesi durumlarının değişimini belirleyen aralığı içerebilir. Kaya düşmesi noktaları bir çoklu çizgi biçiminde olduğunda (hat boyunca), çoklu çizgi boyunca örnekleme mesafesi önceden tanımlanmalıdır. Normal geri sıçrama, teğet geri sıçrama ve sürtünme açısı dahil olmak üzere katsayıları, şekil dosyasının öznitelik tablosunun farklı alanlarında kaydedilir. Simülasyon sonucunda elde edilen kaya düşme yörüngeleri, sayısal yükseklik modeli, frekans, sıçrama yüksekliği, ve kinetik enerji raster modellemesi için girdi parametresi olarak kullanılır. Raster çıktılarının tümü, kaya düşmesi tehlike değerlendirme simülasyonunda kullanılacak girdilerdir. Tarama, otomatik olarak farklı tehlike sınıflarına göre yeniden sınıflandırılır.

#### **2.8.6.1. 3 Boyutlu Modelleme Aşaması**

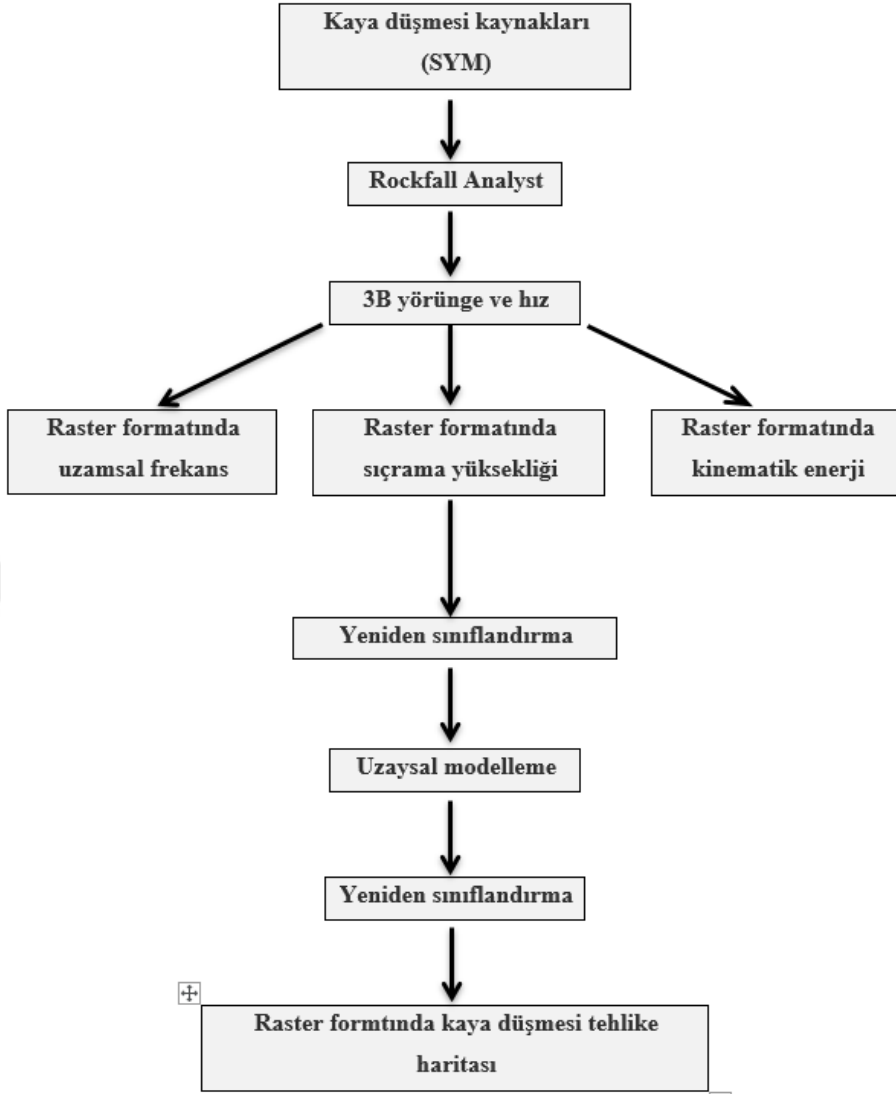
Modelleme aşamasında ilk olarak çalışma alanlarına ait 10 m mekansal çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılmıştır. Potansiyel kaya düşmesi kaynakları belirlemek için, her bir eğim boyunca bir çizgi çizilerek tanımlanmıştır. Arazi gözlemleri ve Google Earth görüntülerinin değerlendirilmesi ile Coğrafi bilgi sistemi ortamında kaya

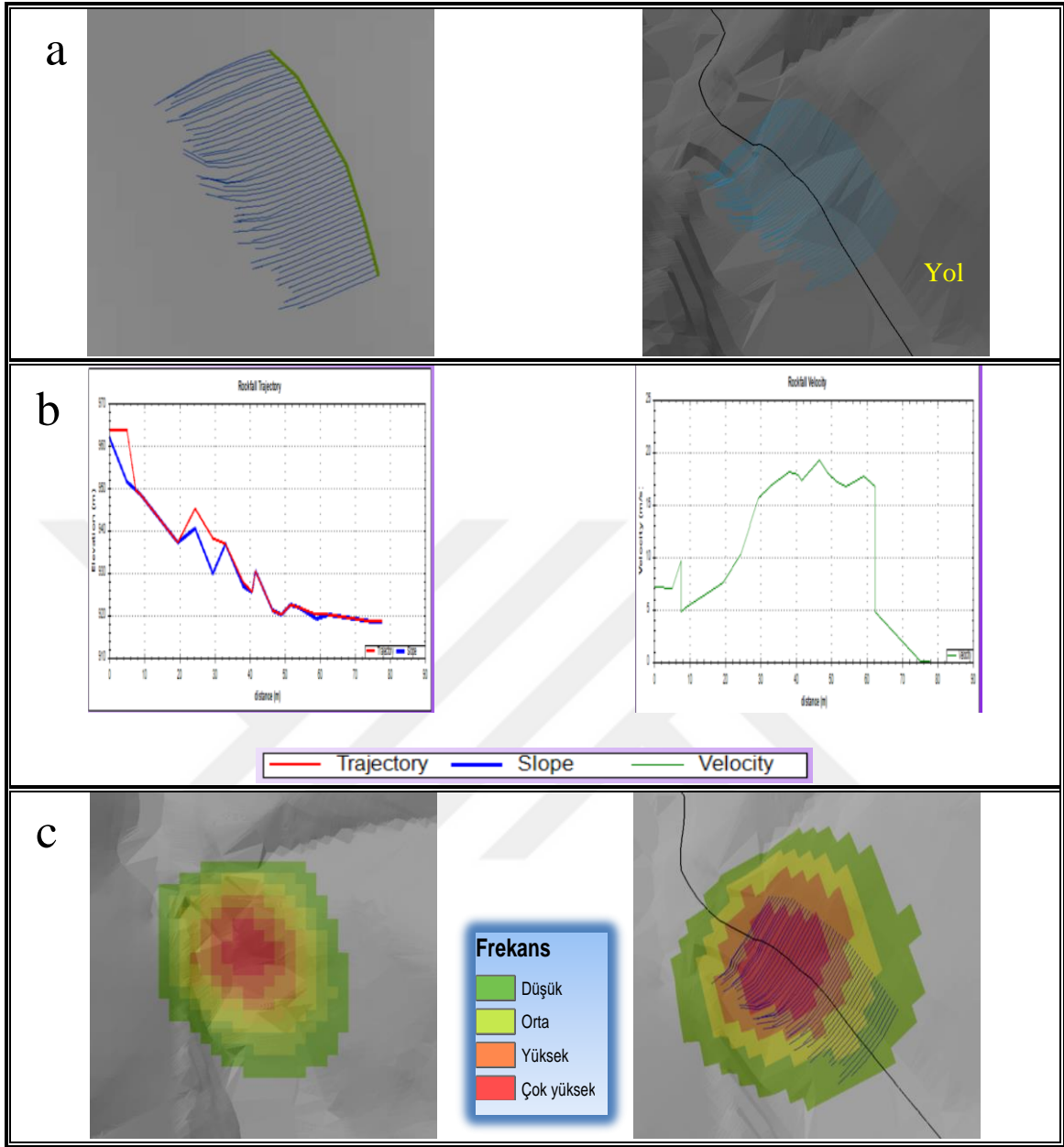
düşmesi kaynak alanı oluşturulmuştur. Bu iki parametre yani SYM ve kaynak çizgiler kaya düşme yörüngelerini belirlemek için uygulanacak olan simülasyon'da temel girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda kullanılan programında (Rockfall Analyst) düşen kaya bloğunun yüzey ile temas ettiği noktalardaki enerji sönümlenmelerini kontrol eden normal ve tanjansiyel katsayıları (normal (Rn) and tangential (Rt) coefficient of restitution) girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Çalışma alanlarındaki malzeme türüne bağlı değişen bu değerler Rocscience geri sıçrama katsayıları tablosundan belirlenmiştir (Tablo 32).

Tablo 32. Malzeme türüne bağlı değişen Rn ve Rt değerleri

Malzeme türü	Rn	Rt
Ana kaya	0.5	0.95
Beton	0.48	0.53
Asfalt	0.4	0.9

Simülasyon sonucunda elde edilen 3B yörünge ve hız parametreleri kaya düşmesi tehlike haritasının simülasyonunda kullanılacak frekans, sıçrama yüksekliği ve kinematik enerji haritalarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Raster formatında hazırlanan frekans, sıçrama yüksekliği ve kinematik enerji haritaları kaya düşmesi tehlike haritasının simülasyonunda girdi parametresi olarak kullanılmış ve her alana ait kaya düşmesi tehlike haritası elde edilmemiştir. Rockfall Analyst kullanarak kaya düşme tehlikesi değerlendirme iş akışı aşağıda getirilmiştir:

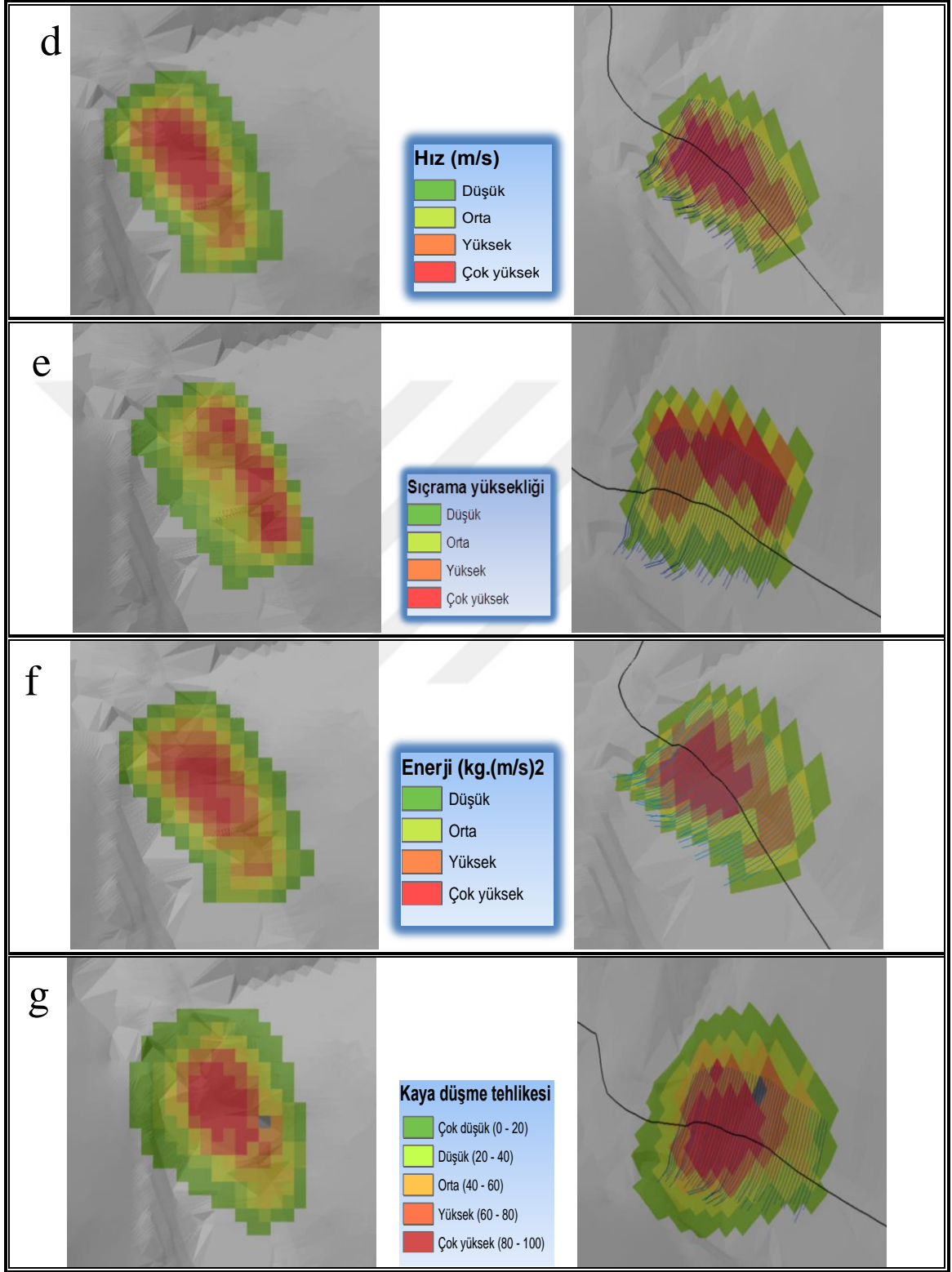


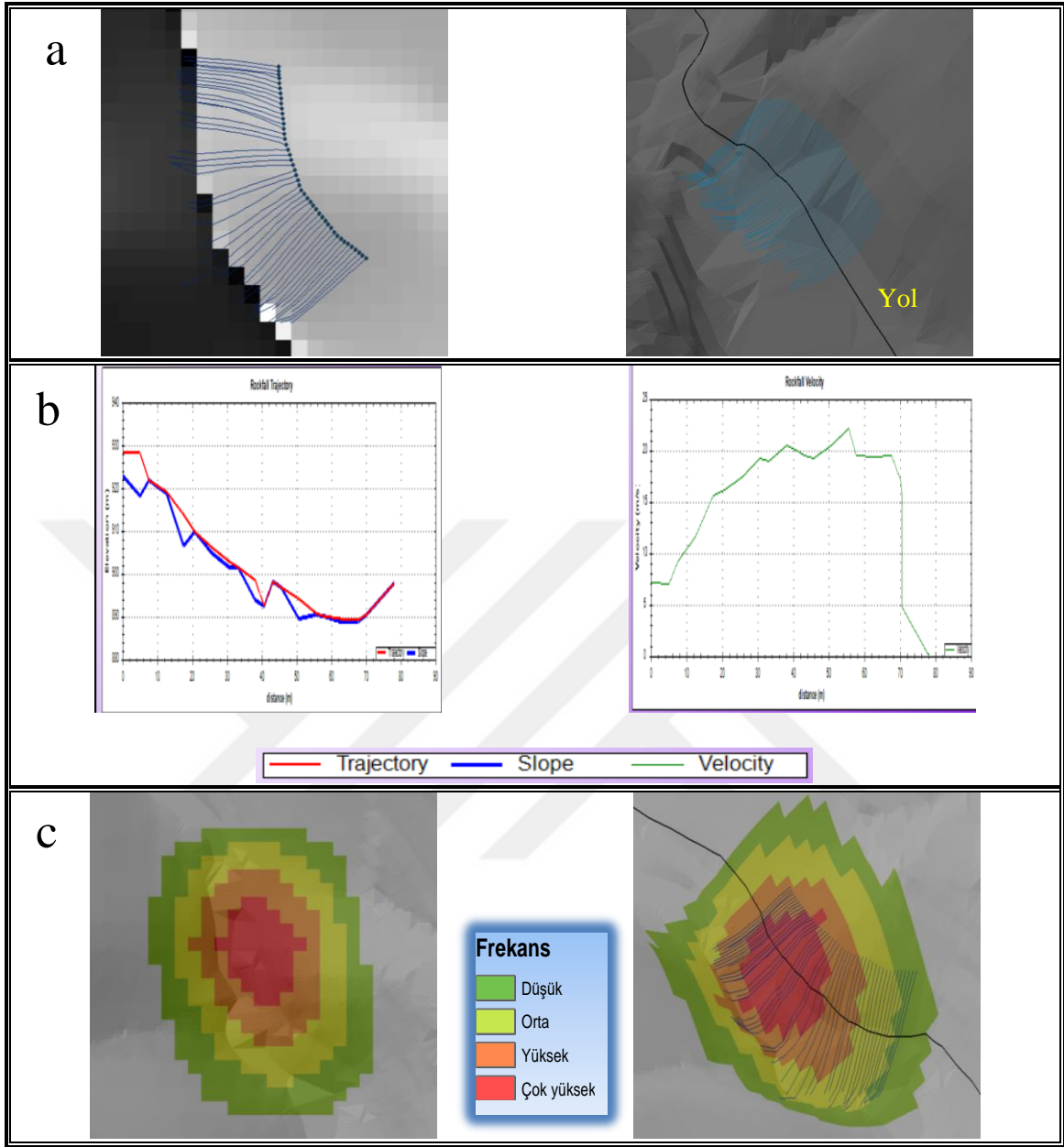


Şekil 60. 1. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)



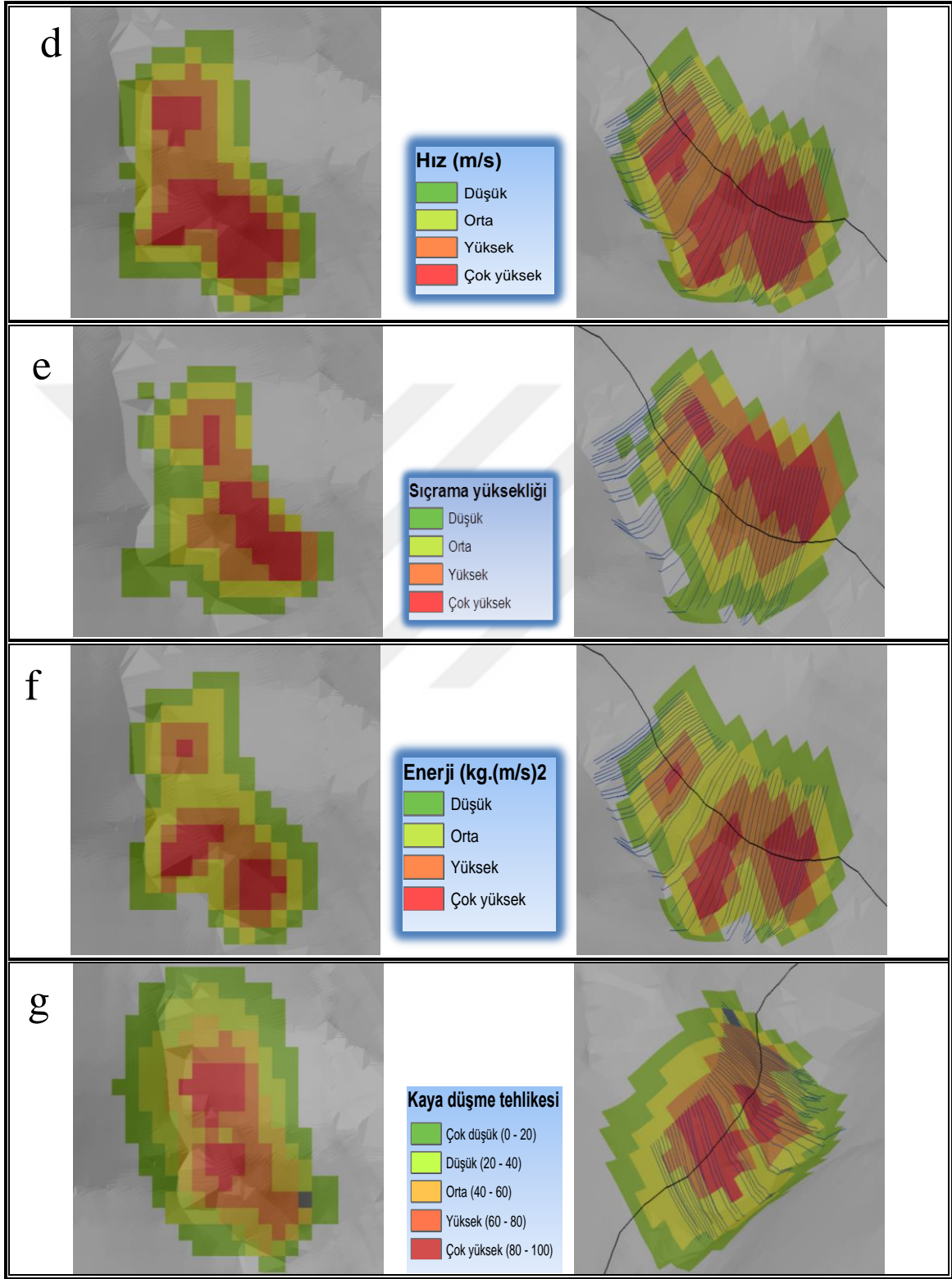
Şekil 60'ın devamı

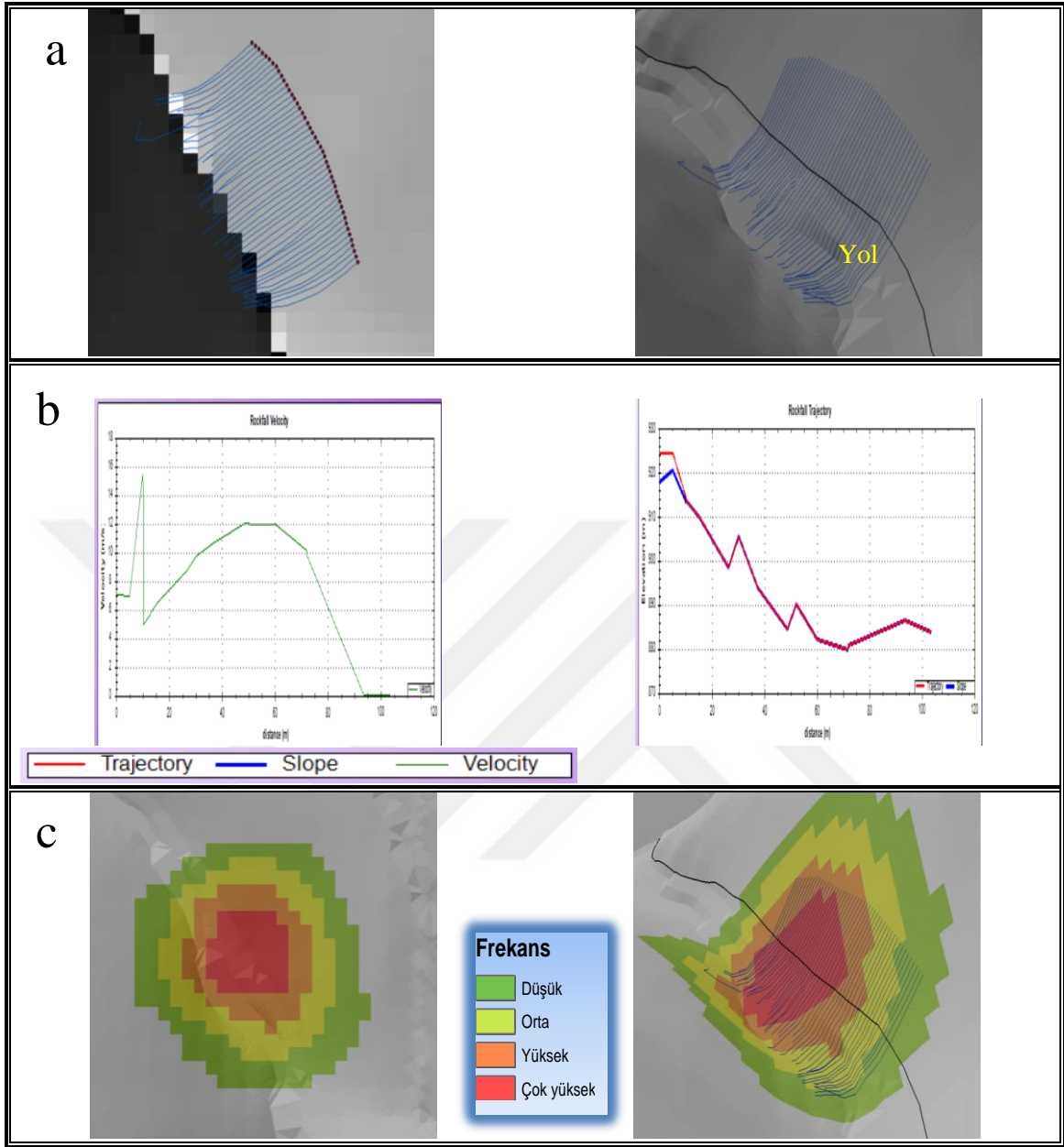




Şekil 61. 2. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

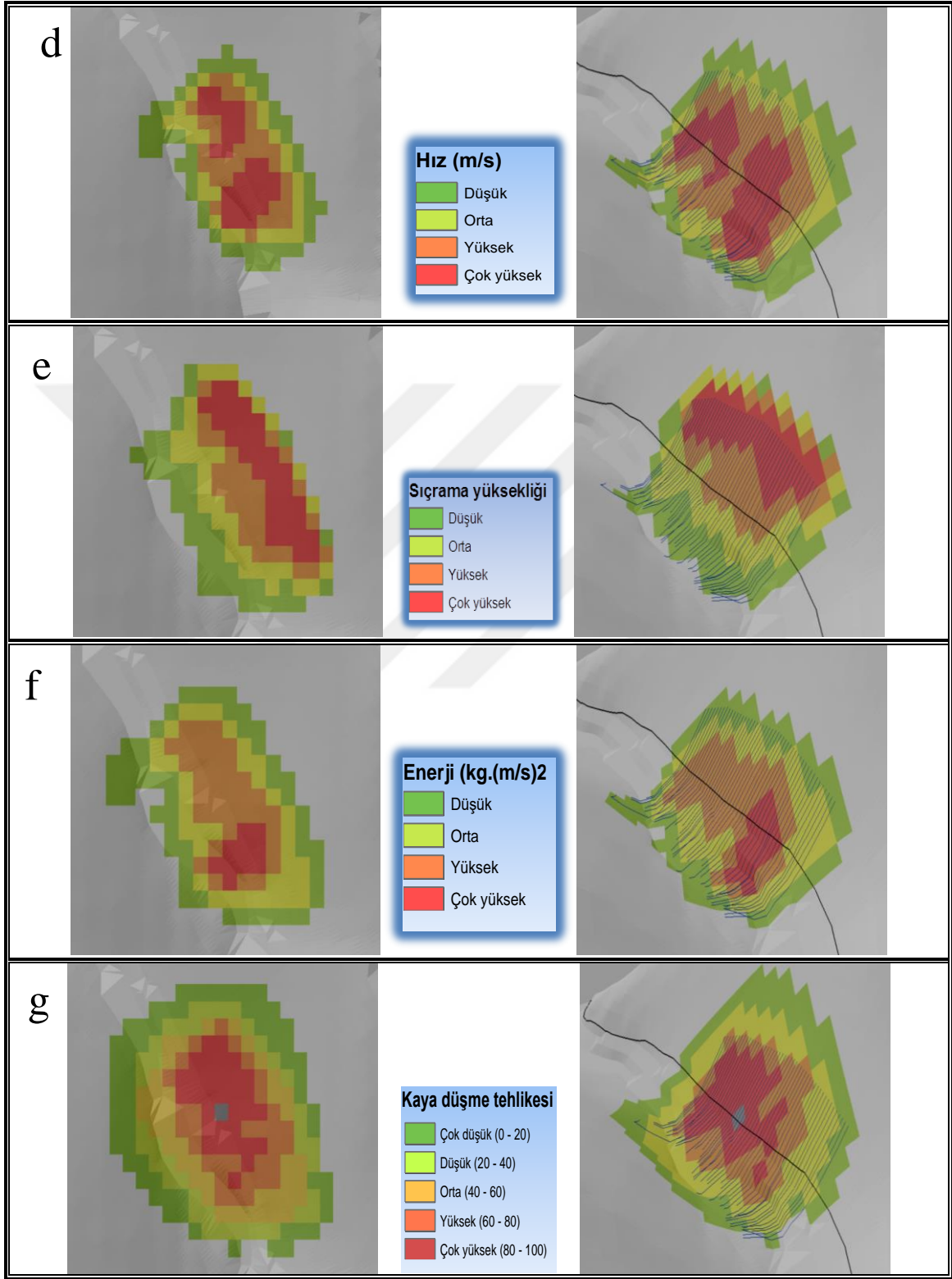
Şekil 61'in devamı

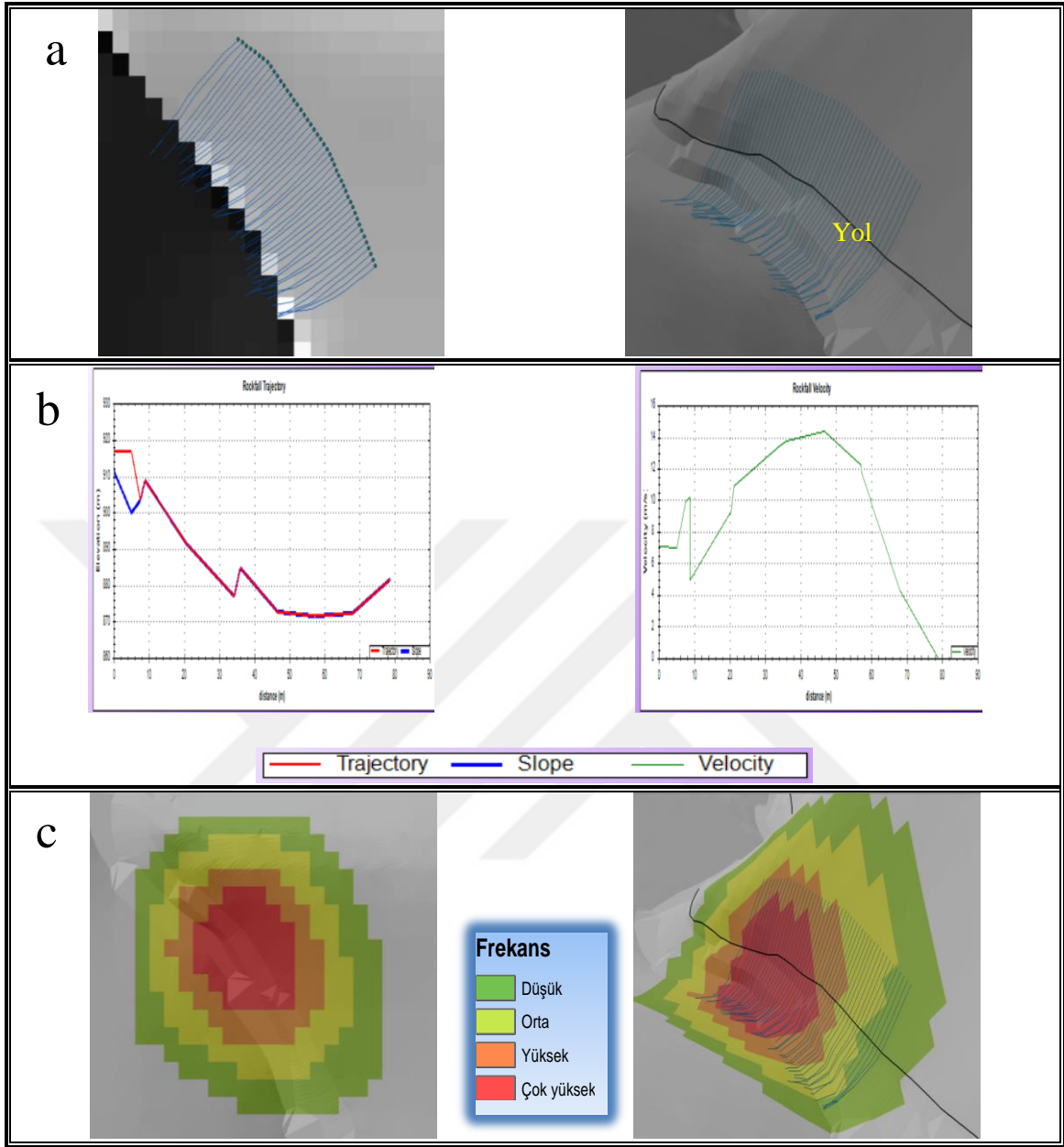




Şekil 62. 3. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

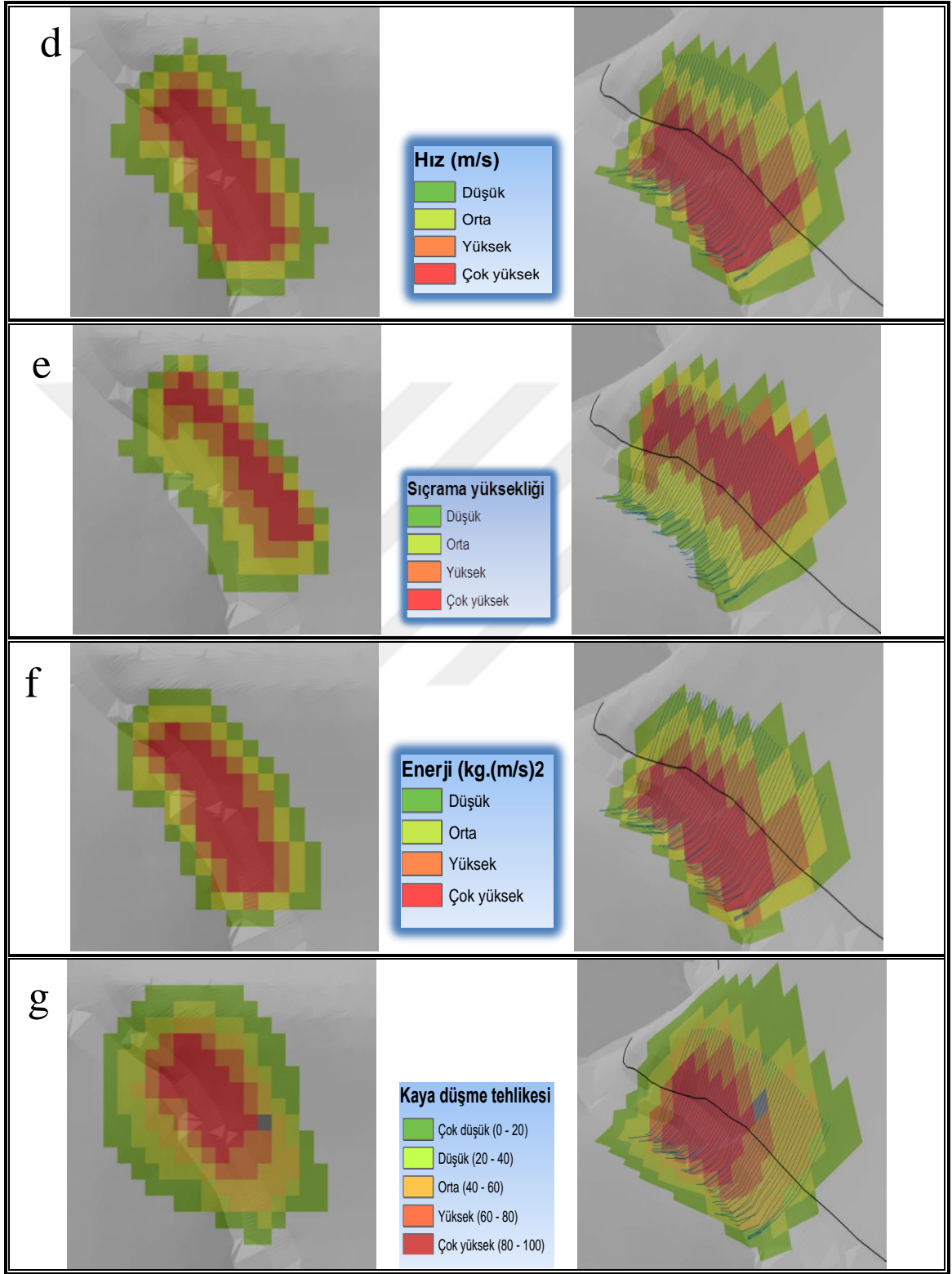
Şekil 62'nin devamı

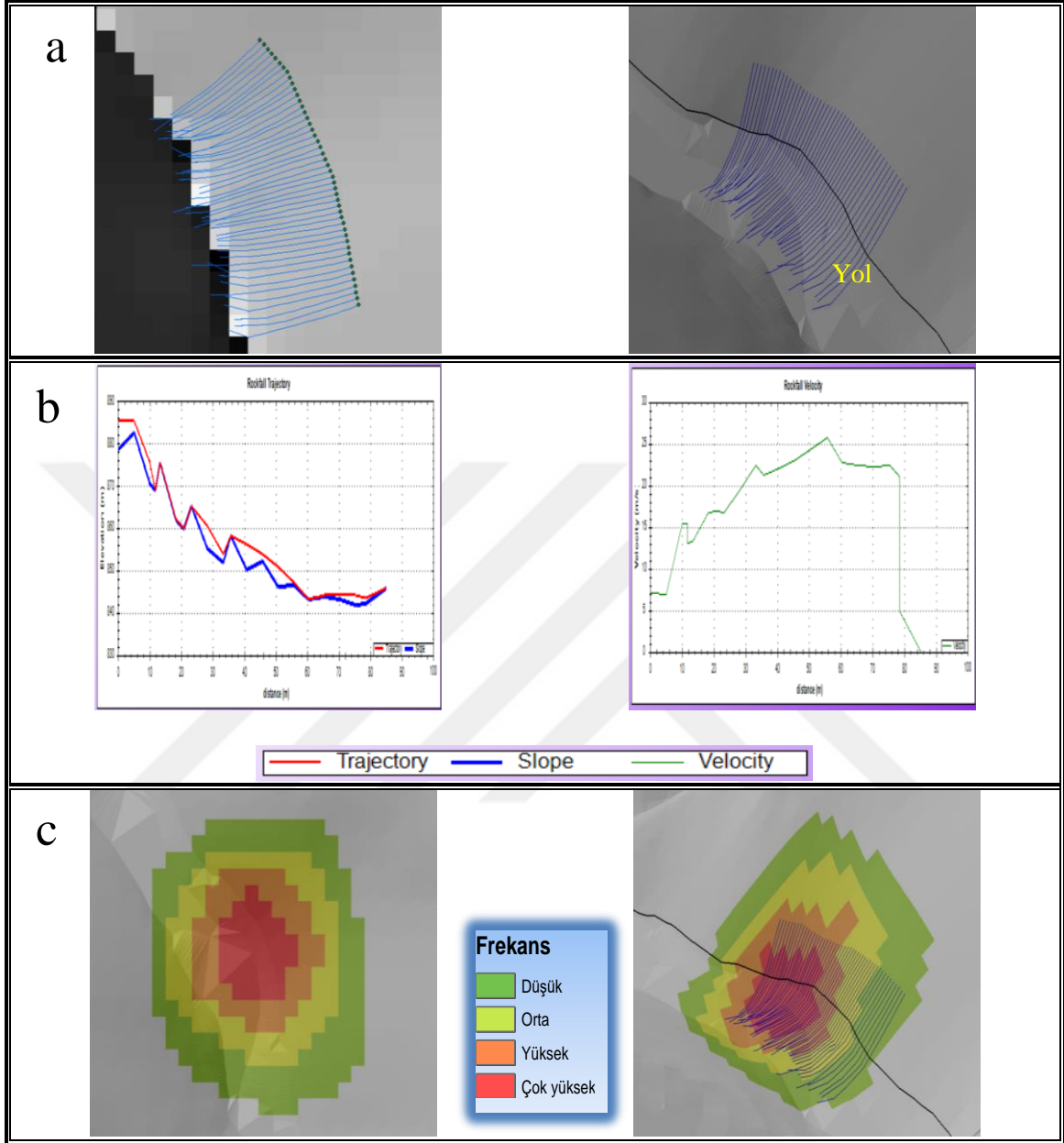




Şekil 63. 4. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

Şekil 63'ün devamı

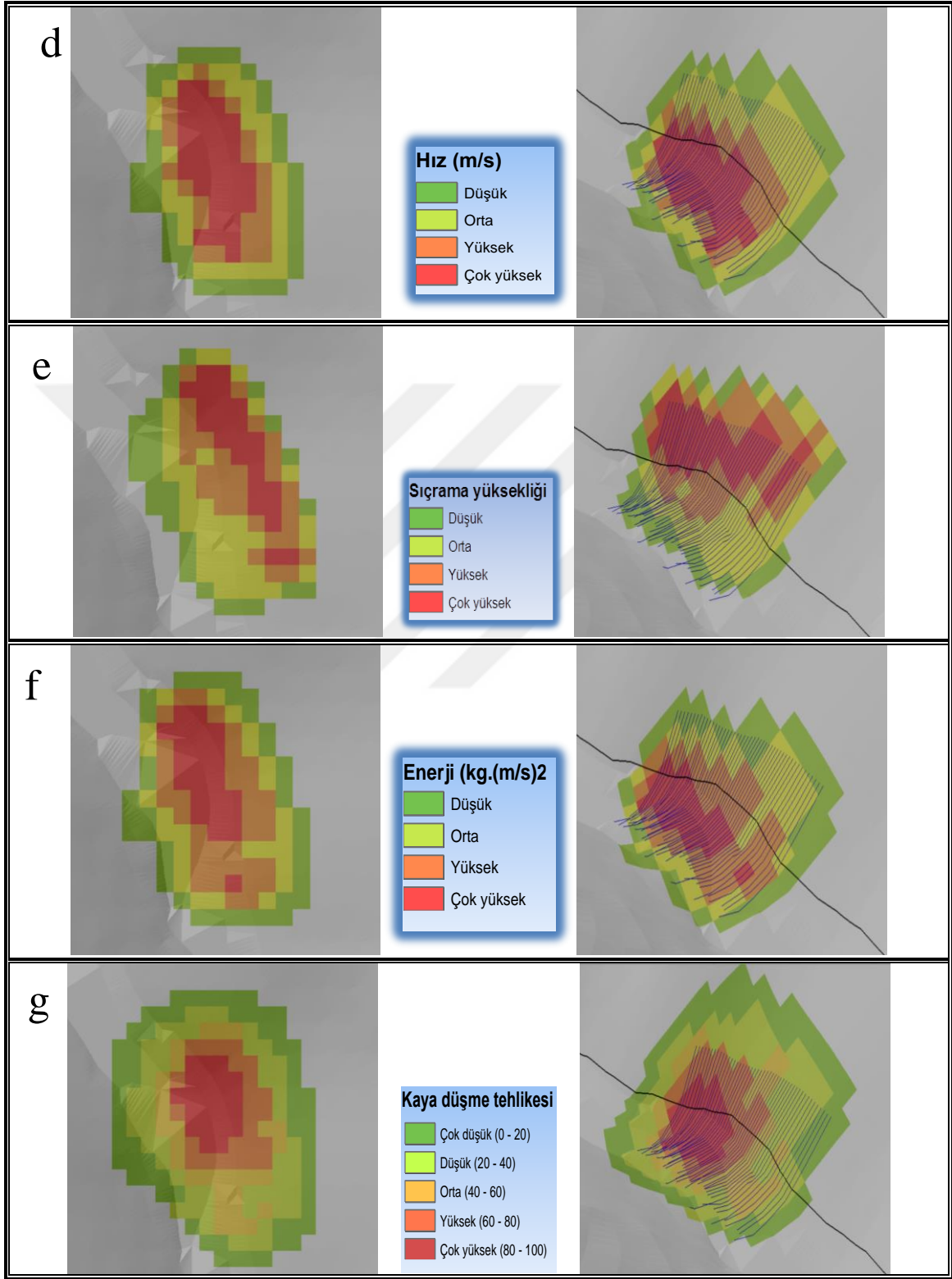


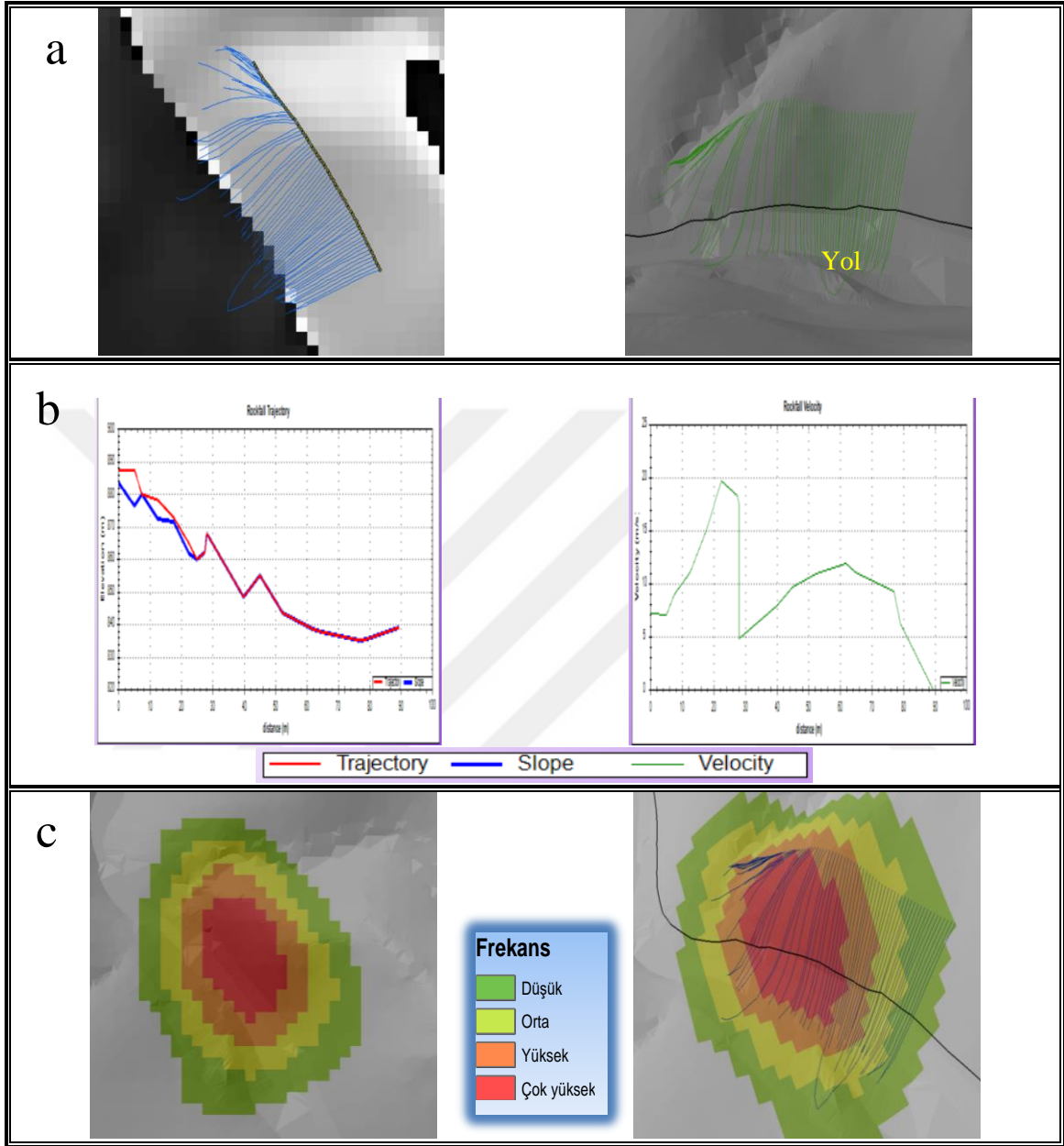


Şekil 64. 5. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)



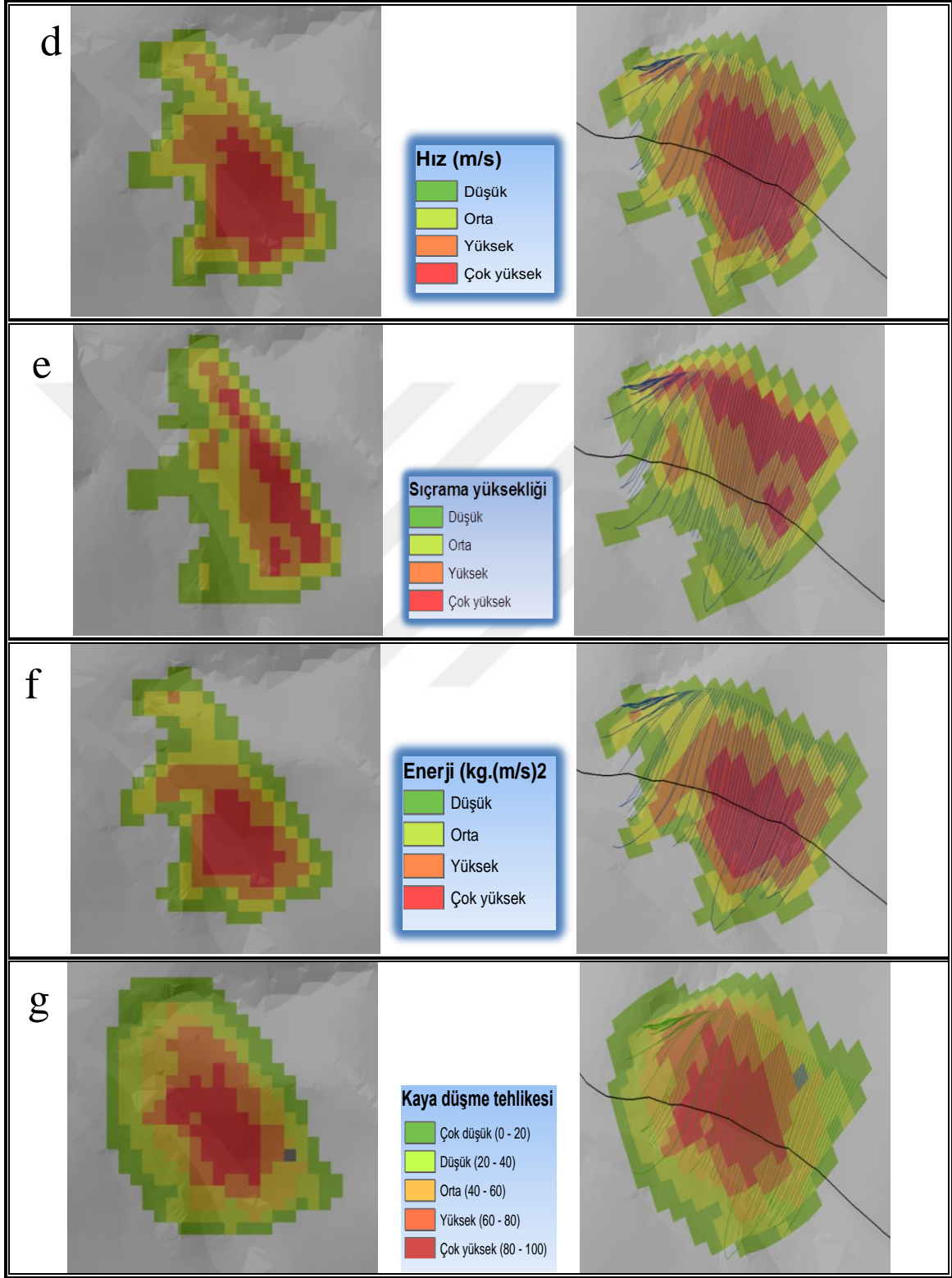
Şekil 64'ün devamı

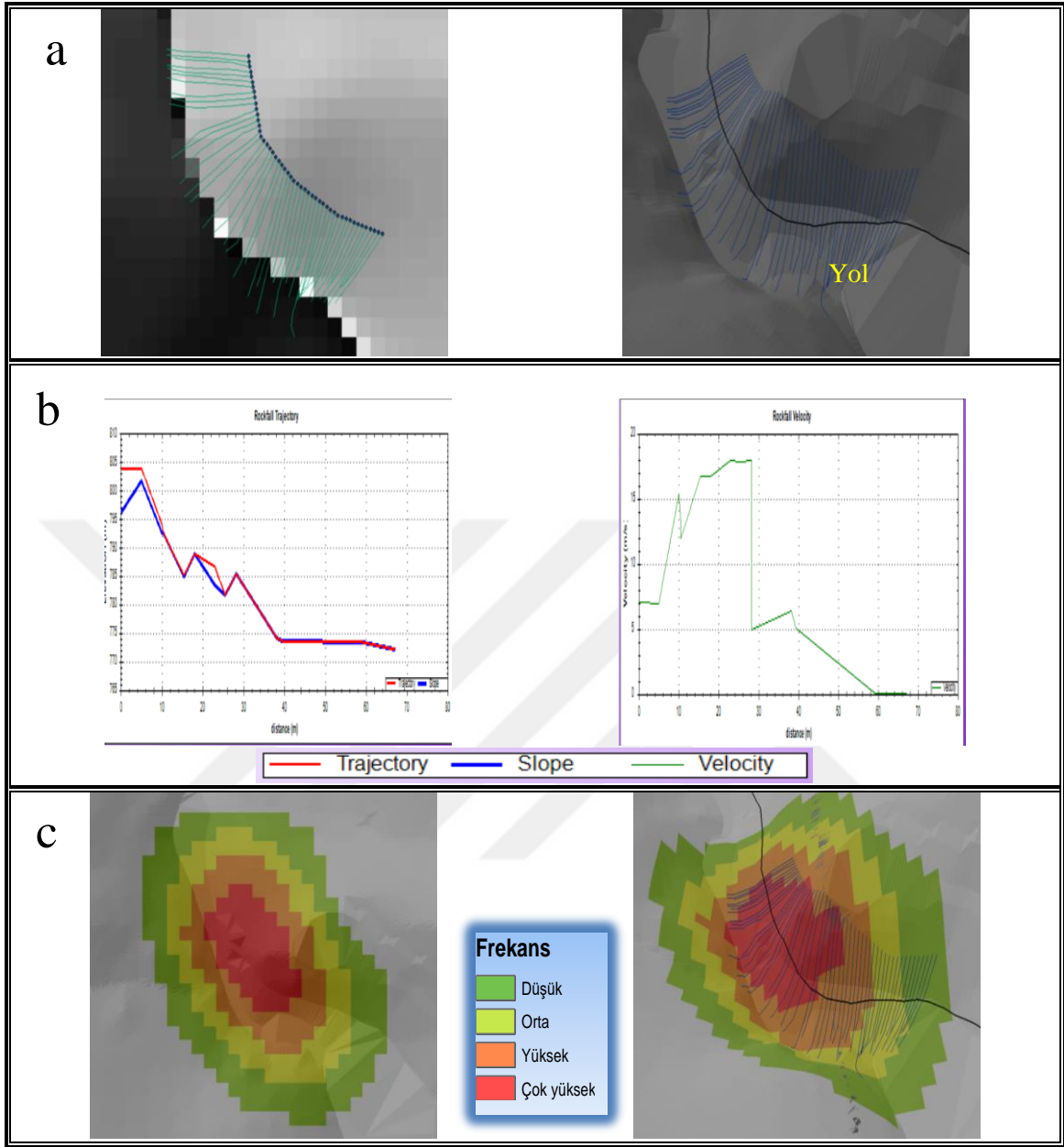




Şekil 65. 6. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirilmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirilmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirilmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

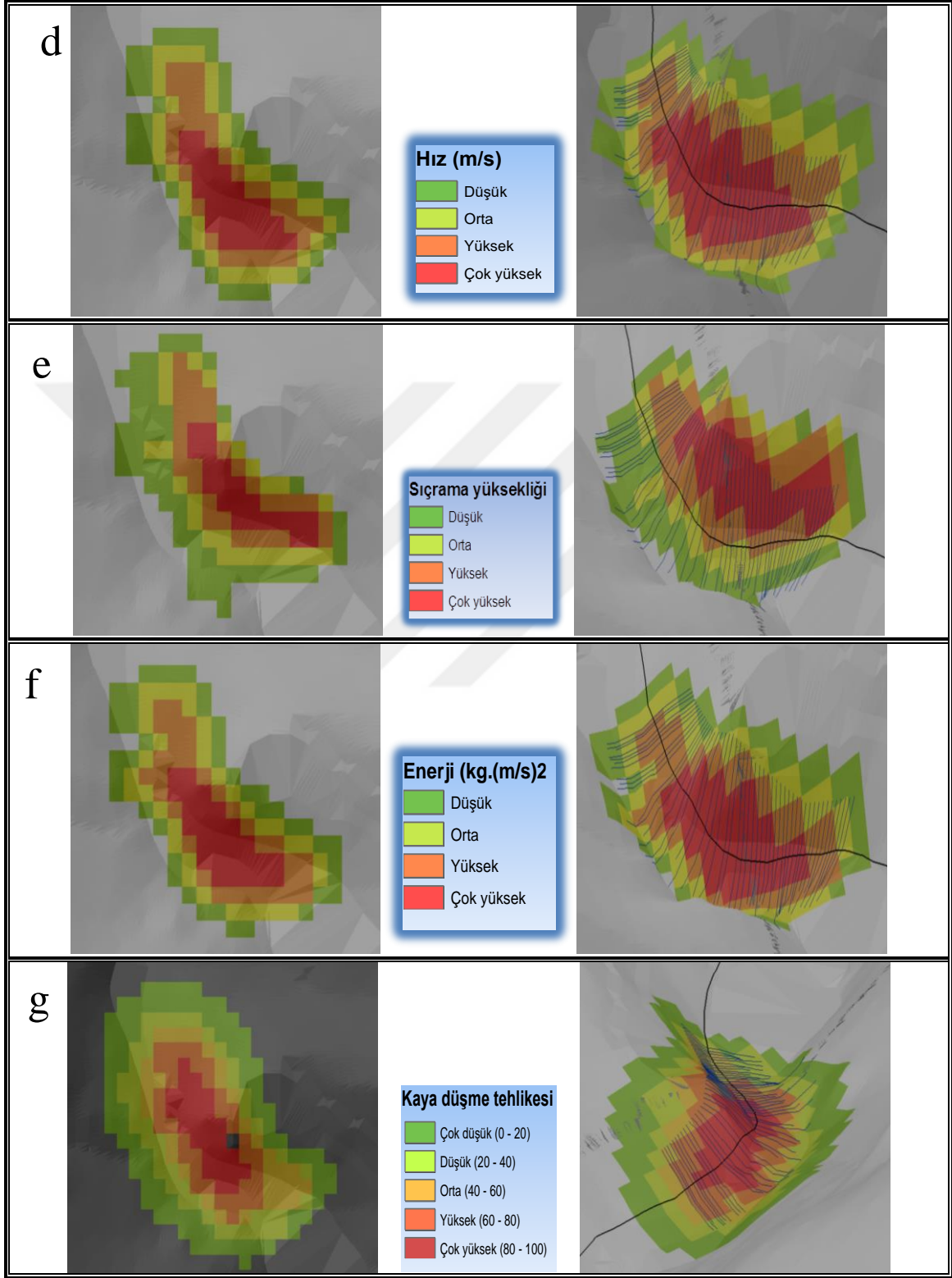
Şekil 65'in devamı

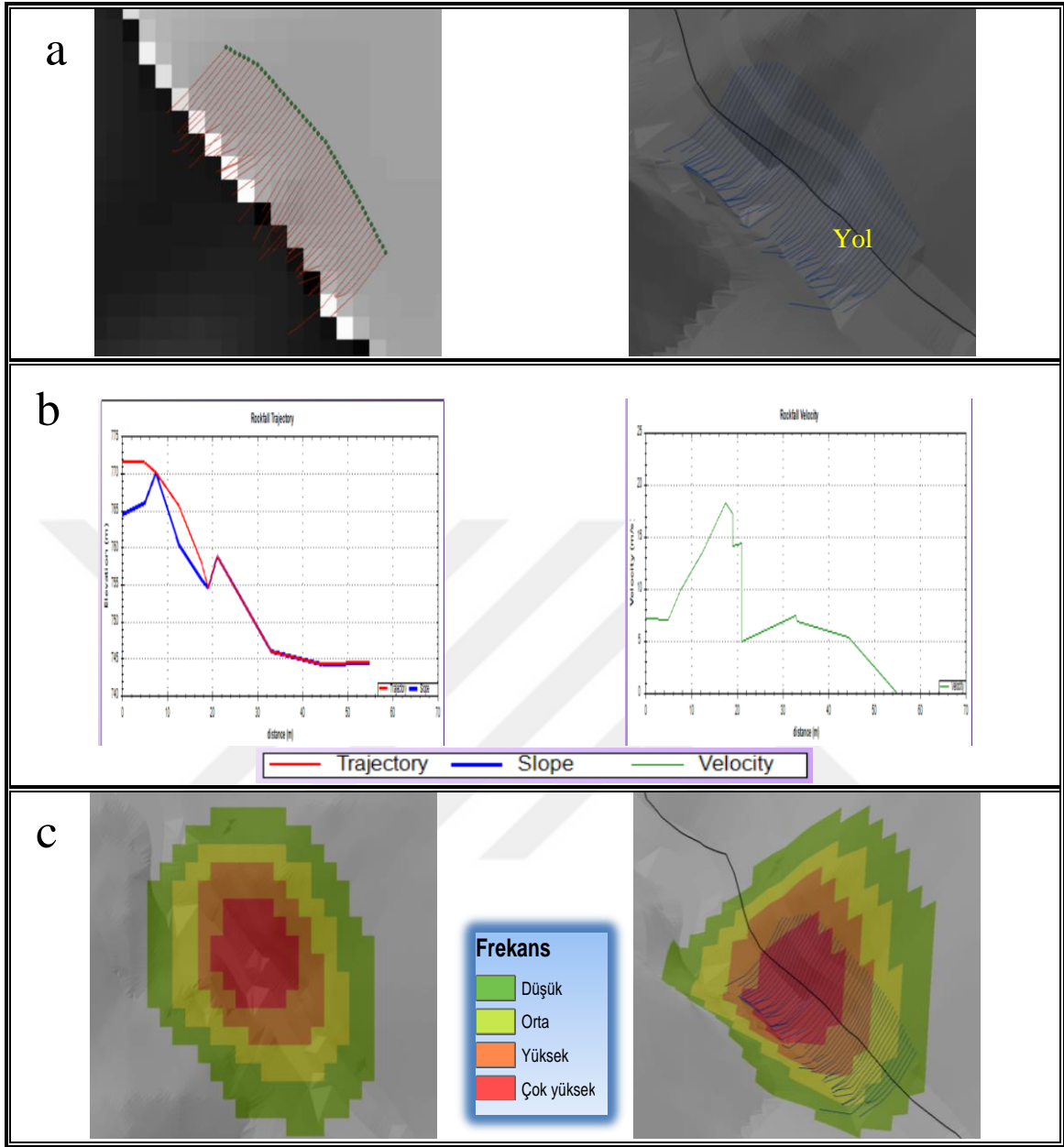




Şekil 66. 7. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

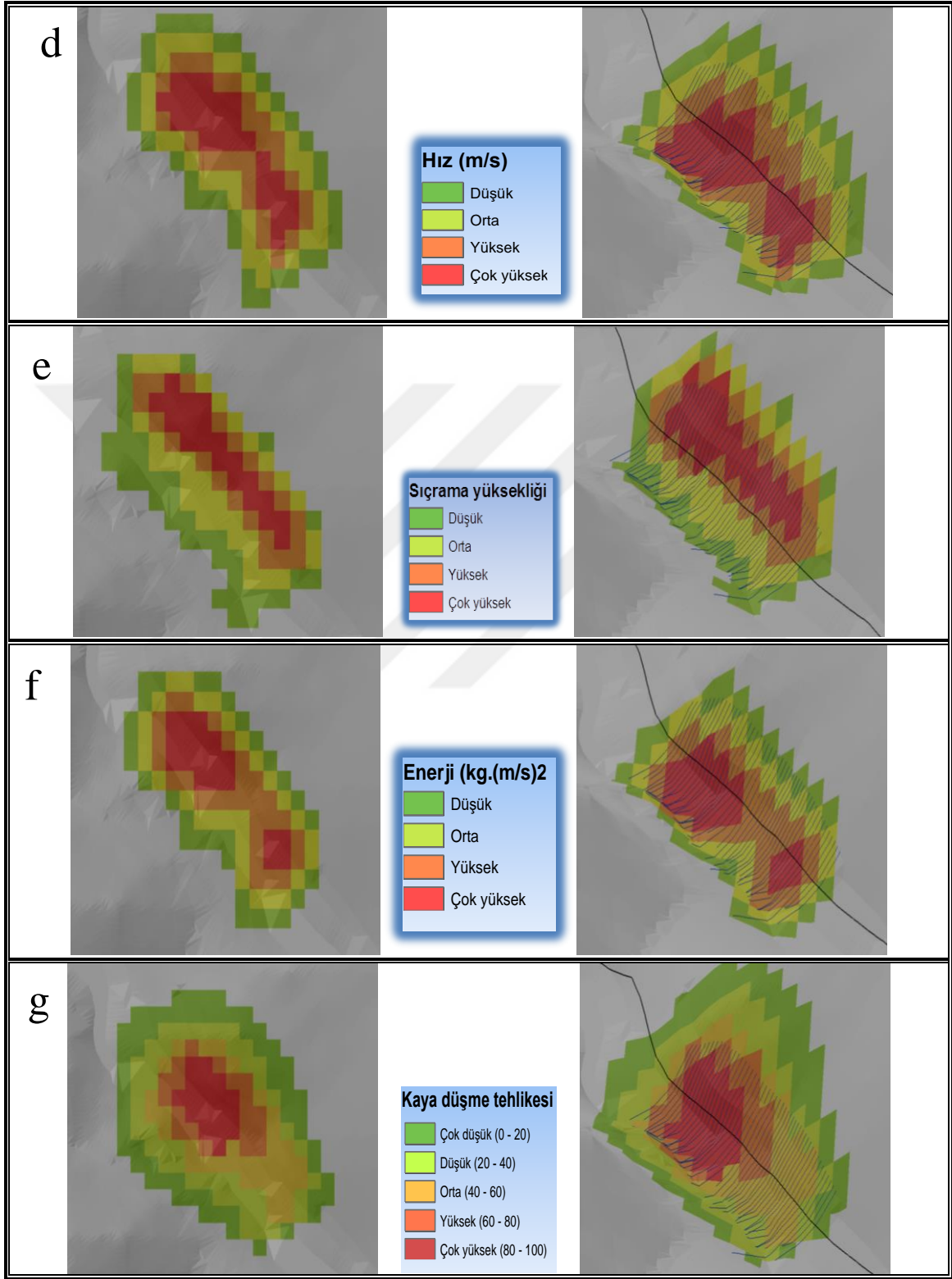
Şekil 66'nın devamı

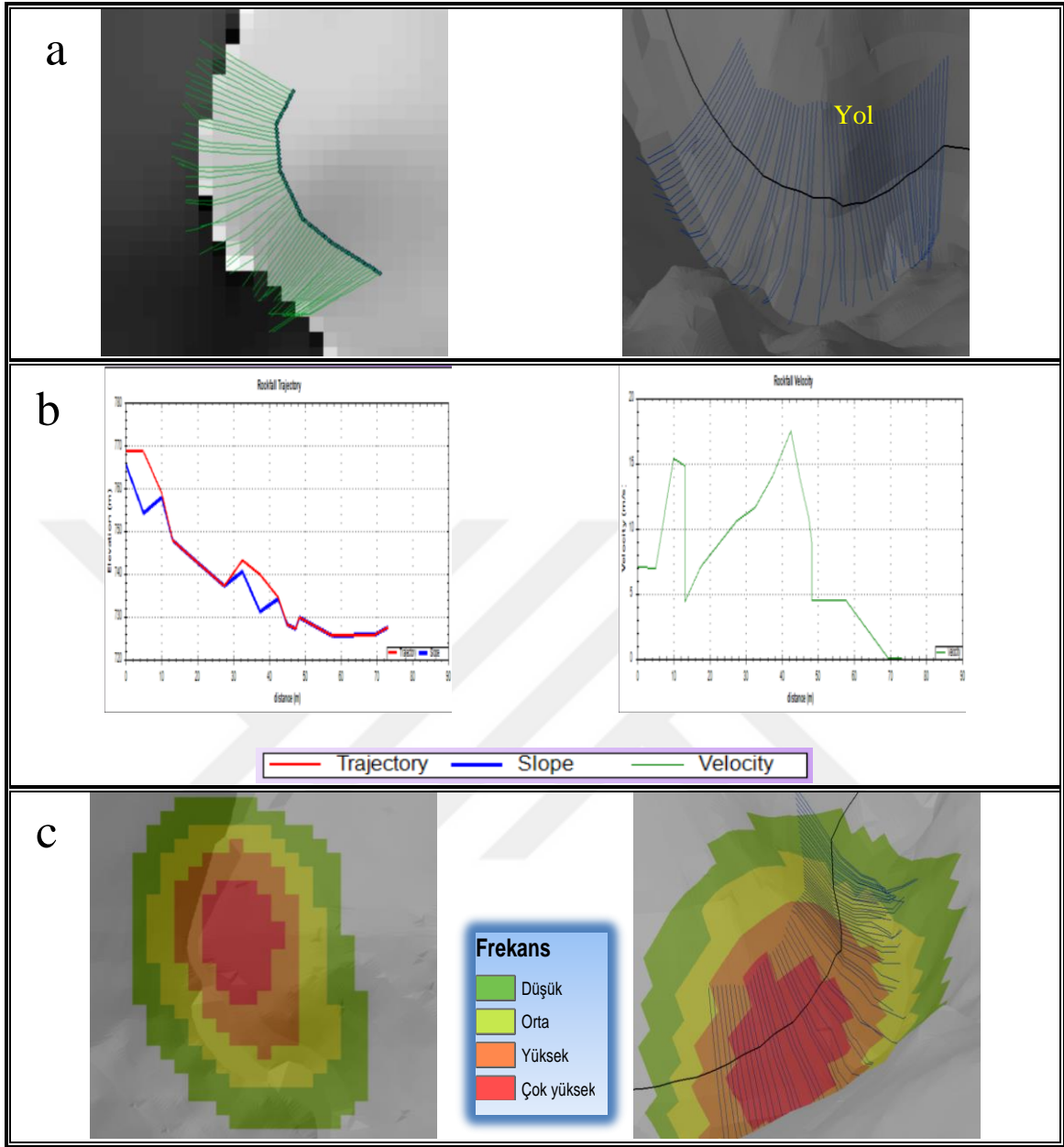




Şekil 67. 8. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

Şekil 67'nin devamı

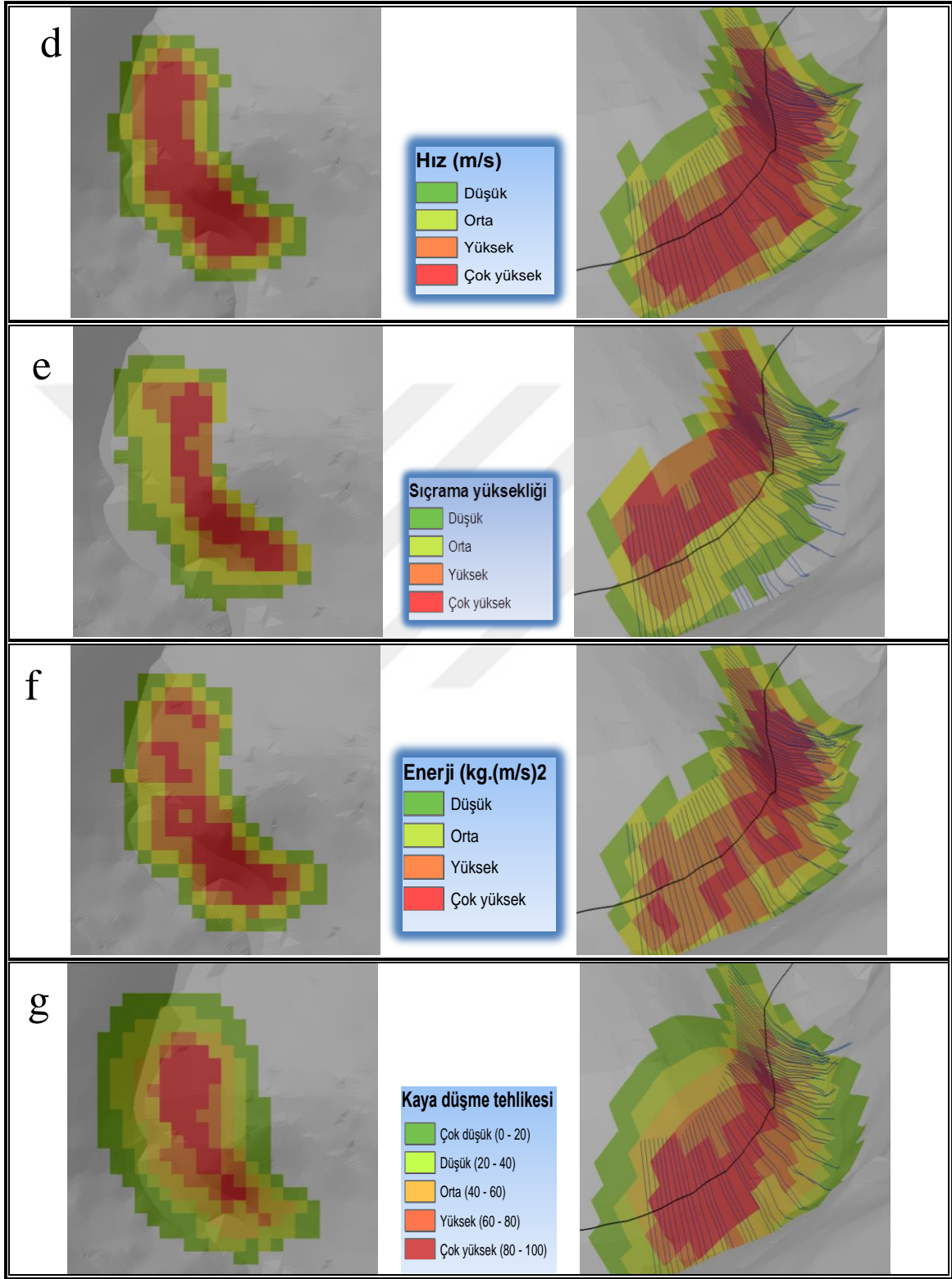


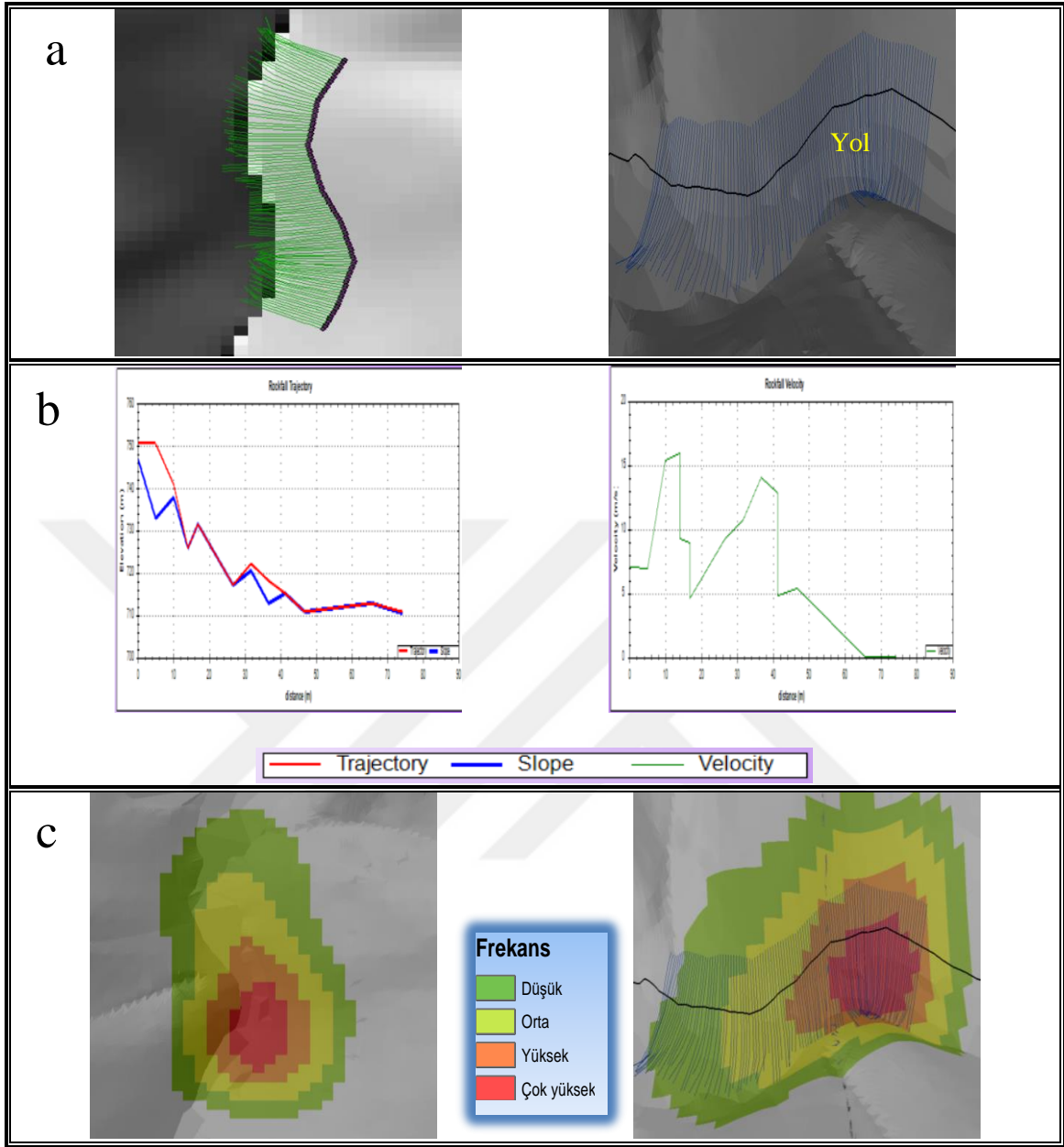


Şekil 68. 9. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)



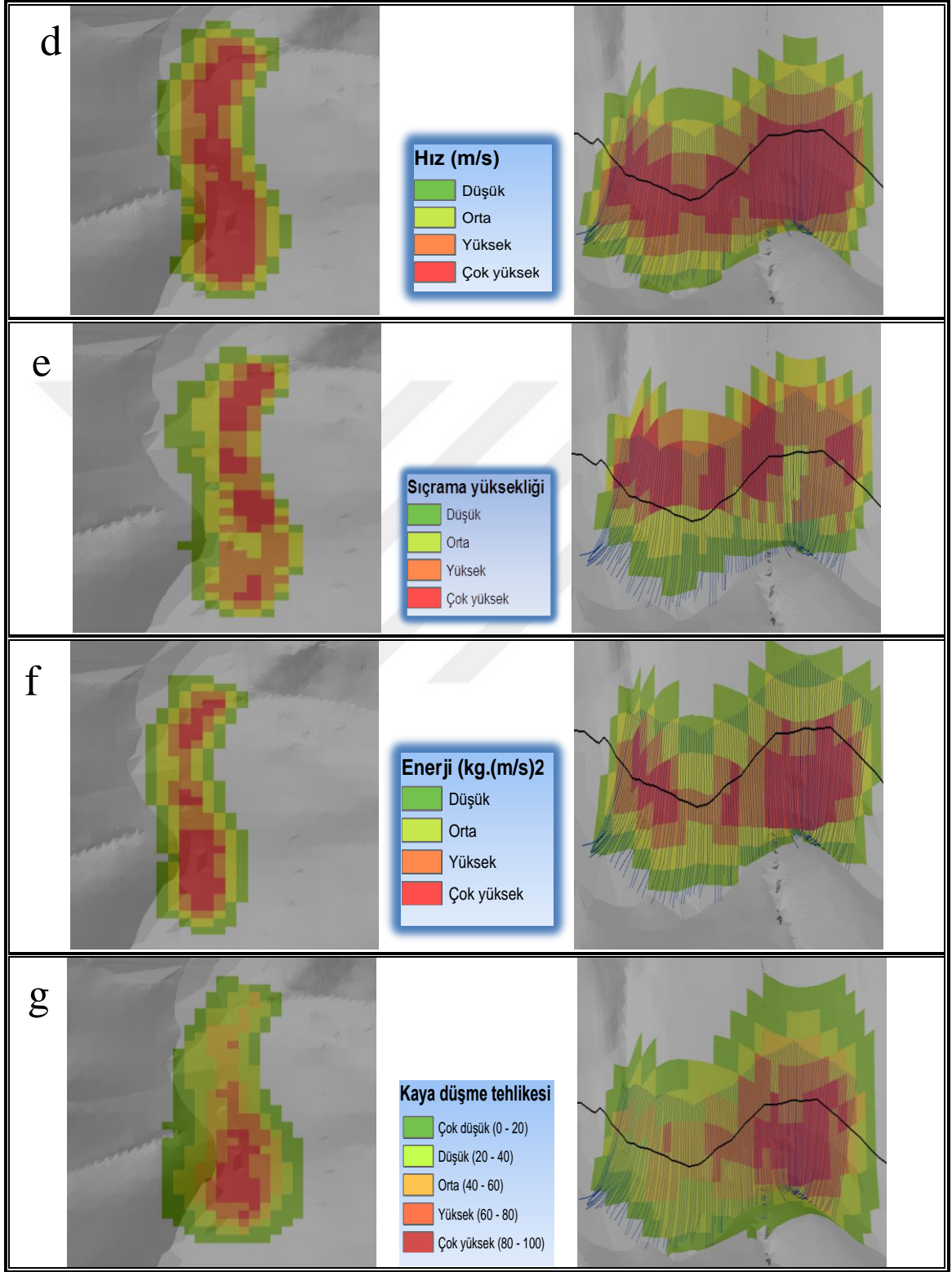
Şekil 68'in devamı

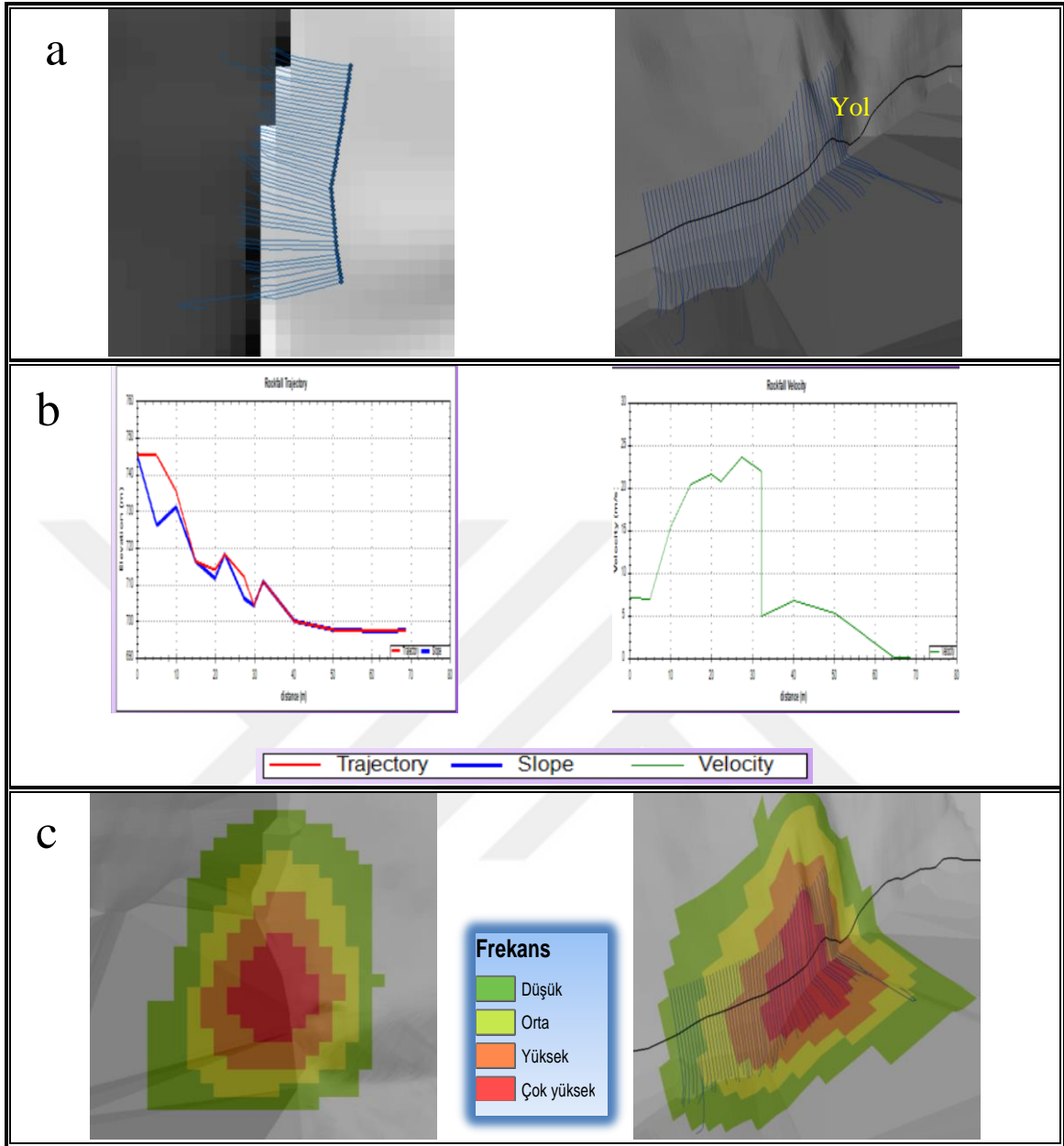




Şekil 69. 10. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

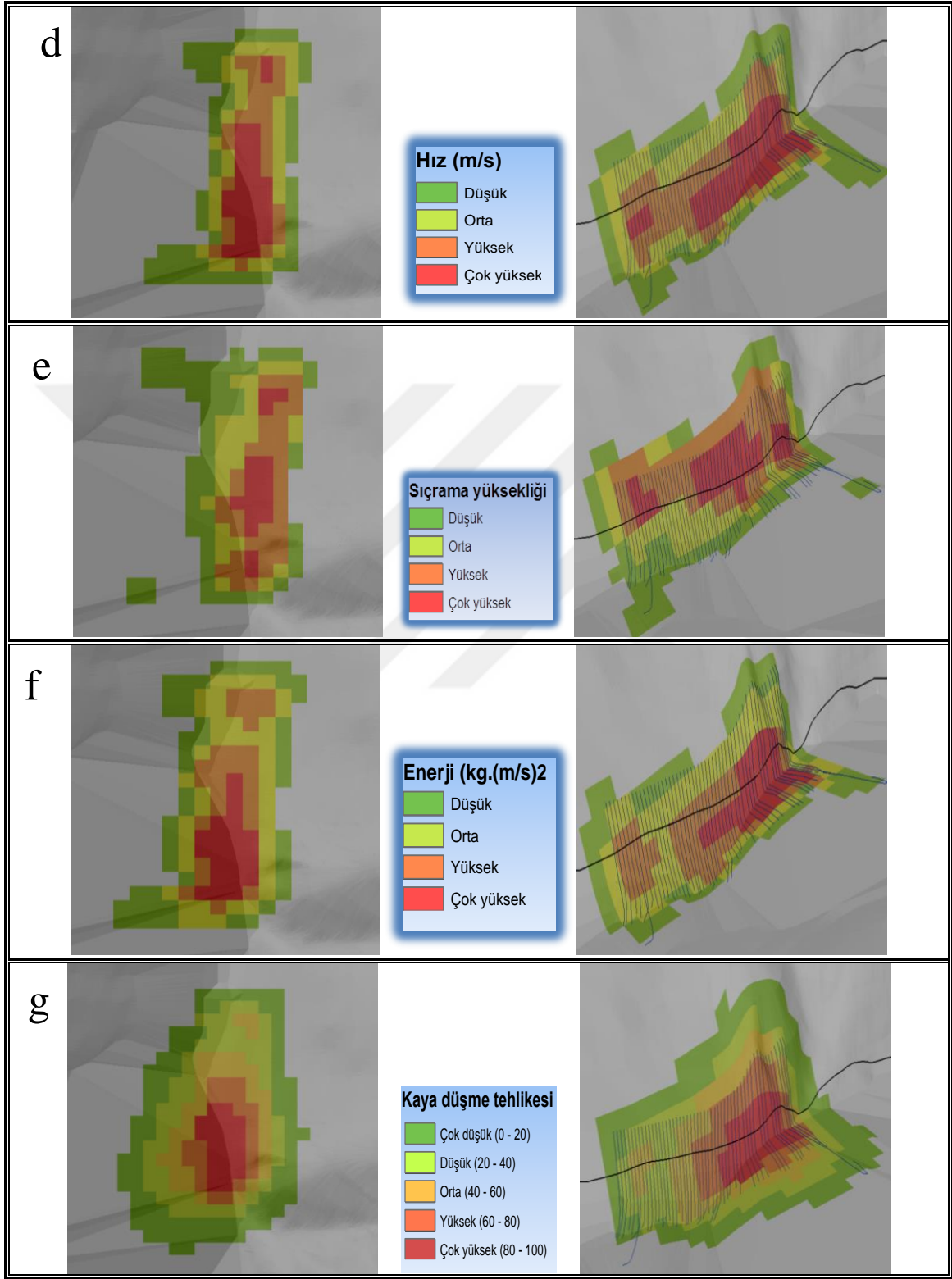
Şekil 69'un devamı





Şekil 70. 11. Lokasyon için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi; a) Potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu. b) hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri. c) SYM ve yörüngeler kullanılarak tahmin edilen kaya düşme frekansı. d) SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak tahmin edilen kaya düşme hızı. e) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kaya düşmesi sıçrama yüksekliği). f) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Kinematik enerji). g) Kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (Tehlike değerlendirme haritası)

Şekil 70'in devamı



### 3. TARTIŞMA

Rocfall (2B) ve rockfall analyst (3B) programları kaya düşmesi problemini simüle etse de her programın verileri girme, verileri işleme ve sonuçları görüntüleme konusunda belirli bir yaklaşımı vardır. Bununla birlikte, programlar, gerekli olan bazı özelliklerde (örneğin kaya düşmesini simüle etmek gibi) aynıdır.

2 boyutlu kaya düşme simülasyonu Rocfall 6. versiyon programı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Altındere vadisi boyunca gözlenen kaya düşmesi potansiyeli olan toplamda 11 eğim profili modelleme uygulamak için belirlenmiştir. Simülasyon, profili etkileyen her bir potansiyel kaya düşmesi kaynağından tüm profiller için gerçekleştirilmiştir ve bunun sonucunda her bir alan için kaya bloklarının eğim üzerinde izlediği yol, ilerleme mesafesi, toplam kinetik enerjisi ve sıçrama yükseklikleri elde edilmiştir.

3 boyutlu kaya düşme simülasyonu ise Rockfall Analyst programı yardımı ile Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında gerçekleştirilmiştir. Tüm lokasyonlar için 3 boyutlu kaya düşmesi modellemesi, potansiyel kaya düşmesi olan kaynaklar ve yörüngelerinin simülasyonu, hız ile tipik yörüngelerin uzunlamasına profilleri, SYM ve yörüngeler kullanılarak kaya düşme frekansı, SYM ve yörüngelerin hızı kullanılarak kaya düşme hızı, kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (kaya düşmesi sıçrama yüksekliği), kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (kinematik enerji) ve son olarak kaya düşmesi tehlike değerlendirmesinin sonuçları (tehlike değerlendirme haritası) elde edilmiştir.

2 ve 3 boyutlu modellemenin karşılaştırılmasında, 2B modelleme, 10 m'ye kadar çözünürlükler kullanarak, dik kaya yamaçlarında iyi bir, ilerleme mesafesi, kinetik enerji ve sıçrama yüksekliği tahmini üretse de 3 boyutlu modellemelerde daha yüksek hesaplamalar yapmaktadır. Hem 2B hem de 3B analizlerden elde edilen kinetik enerji, sıçrama yükseklikleri ve ilerleme mesafeleri değerleri oldukça yüksek olması nedeniyle, kaya düşmesinin meydana gelme olasılığı oldukça yüksektir. 2 boyutlu modelleme sonuçlarında bir profil boyunca düşen kaya bloğun izlediği yolu gözlemek mümkündür, 3 boyutlu simülasyonlarda ise kaya bloklarının düşme anındaki izlediği yolu gözlemlemenin yanısıra yayılma (runout) bölgelerinde belirlemek mümkündür ve bunun

sonucunda düşme potansiyeli olan kaya bloğunun izlediği yolu ve yayıldığı bölgeyi tespit edilmesine olanak tanımaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemi'nde uzantı olan Rockfall Analyst, düşen kaya bloklarının 3 boyutlu simülasyonu ve tehlike değerlendirmeleri için eşsiz modelleme ve analiz olanağı tanımaktadır. Veri yönetimi, görselleştirme ve mekansal modellemede CBS'nin güçlü yeteneklerini tam olarak birleştirerek, olanak sağladığı gelişmiş kaya düşmesi analizleri:

- Kaya düşmesi tehlikesinin değerlendirilmesi ve anlaşılması için 3 boyutlu süreç tabanlı fiziksel modelleme ve tarama tabanlı dağıtım modelleme entegrasyonu.
- Kayma, yuvarlanma, zıplama ve serbest düşme dahil olmak üzere tüm fiziksel kaya düşmesi süreçlerinin 3 boyutlu bir sistemde modellenmesi.
- Birincil kaya düşmesi özelliklerini dikkate alarak kaya düşmesi tehlikelerinin kalite tahmin yüzeylerinin oluşturulması.
- Yapısal yüzeyler üzerindeki etkinin araştırılması, tehlike dağılımını değiştirmede potansiyel bariyer analizleri.
- Uzamsal istatistik teknikleriyle raster model üretimi için kayaları rastgele yönlerle atarak belirsizlik modellemesi.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kaya düşmesi potansiyelinin çevresel etkileri 2 ve 3 boyutlu benzetim modeller kullanarak incelenmiştir. Altındere vadisi boyunca kaya düşmesi tehlike değerlendirmeleri dört aşamada gerçekleştirmiştir:

- ❖ Kaya düşmesi potansiyeli olan alanların belirlenmiş ve duyarlılık çalışmaları (Lojistik Regresyon ve AHP) gerçekleştirilmiştir.
- ❖ Eğim özelliklerini ve alanlardaki kaya düşmesi kaynaklarını belirlemek amacıyla arazi ve laboratuvara çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada her bir yüzey yüksek çözünürlüklü lazer tarama tekniğiyle taranıp ve nokta bulutları elde edilmiş ve süreksizlik takımlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.
- ❖ Arazi ve laboratuvara çalışmaları sonucunda tüm alanlara ait bir şev stabilitesi analizi (Kinematik analiz) ve RMR kaya kütle sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Kinematik analizi sonucunda alanlara ait olası yenilme türleri belirlenmiştir. RMR kaya kütle sınıflandırması sonucu çalışma alanları orta ve zayıf sınıf kaya kategorisinde yer almaktadır.
- ❖ Kaya düşmesi potansiyeli olan eğim yüzeylerine ait hem 2 hem de 3 boyutlu (Rocfall ve Rockfall Analyst) kaya düşmesi modellemesi gerçekleştirilmiştir ve bunun sonucunda yamaçtan kopan kaya blokların ilerleme mesafesi, kinetik enerji ve sıçrama yüksekliğine göre, çoğunun kutsal Sümela manastırına giden yola çarptığını ve kaya düşmesi tehlikelerinin değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Laboratuvar ve arazi çalışmaları sonuçları dikkate alınarak ve aynı zamanda 2 ve 3 boyutlu benzetim modellerin incelenmesiyle kopan kaya bloklarının ilerleme mesafesi ve yayılma (runout) bölgeleri tespit edilip ve bunun sonucunda insanları ve yoldan geçen araçları kaya düşmesi tehlikelerinden korumak için hafifletme önlemlerine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Tüm 11 lokasyon için elde edilmiş olan kaya düşme tehlike haritaları her bir alan için yüzeyin hangi noktasında kaya düşmesi potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermekte olup ve alanlarda alınabilecek önlemlerin 3 boyutlu modellere göre yüzeyin hangi bölgesine daha çok odaklanması gerektiğini göstermektedir. Buna yönelik alınabilecek olası önlemler aşağıda getirilmiştir:



- Şev yüzeyi boyunca meydana gelebilecek yüzeysel kaya düşmelerine karşı farklı çelik ağ ve halat çözümleri
- Kaya tutucu ve yavaşlatıcı ağların yerleştirilmesi
- Lokal olarak şev yüzeyinde risk oluşturan kaya bloklarının sağlam zemine sabitlenmesi (ankraj, kaya saplaması)
- Enjeksiyon
- Geniş ve yüksek şevlerde veya yüzeysel önlemlerin alınmasının mümkün olmadığı yerlerde bariyer veya engelleyici duvar yerleştirilmesi
- Düşen blokları tutan hendekler
- Askıda bulunan kaya bloklarının kaldırılması



## 5. KAYNAKLAR

- Abu Bakar, M.Z., Shahzad, M., Ali, Z., Iqbal, M.M. ve Saqib, S., 2015. Slope Stability Analysis of Dandot Plateau, Punjab Pakistan, Pakistan Journal of Science, 67,1 39-43.
- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M. ve Lato, M.J., 2014. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities, Earth Surface Processes and Landforms, 39, 80-97.
- Adıyaman, O., Chorowicz, J. ve Köse, O., 1998. Relationships between volcanic patterns and neotectonics in Eastern Anatolia from analysis of satellite images and DEM, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 85, 17-32.
- Ağar, Ü., 1997. Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) Bölgesinin Jeolojisi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Agliardi, F., Crosta, G.B. ve Frattini, P., 2009. Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 1059–1073.
- Akgun, A. ve Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region, Environmental Geology, 51, 1377–1387.
- Akgun, A., Dag, S. ve 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.
- Aksoy, H. ve Ercanoğlu, M., 2007. Fuzzified kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities, Engineering Geology, 89, 206–219.
- Alejano, L.R., Ferrero, A.M., Oyanguren, P.R. ve Fernandes, M.I.A., 2011. Comparison of limit–equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 48, 16–26.
- Alizadeh, E. ve Akgun, A., 2018. Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Çok Değişkenli İstatistik Yaklaşımı Kullanılarak Altındere Vadisi (Maçka, Trabzon) Karayolu Güzergahının Kaya Düşmesi Duyarlılık Değerlendirmesi, 2. Ulusal Heyelan Sempozyumu, 11-12 Ekim, Ankara, Türkiye, cilt.1, no.1, ss.9-10.
- Allmendinger, R. W., 2017. Stereonet 9, Ithaca: Cornell University,.
- Althuwaynee, O.F. ve Pradhan, B., 2016. Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City, Geomatics Natural Hazards & Risk, 8,2, 1–27.

- Anonim, 2001. Altındere Vadisi Milli Parkı Uzun Devreli Gelişme Planı, Analitik Etüt Çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Trabzon.
- Arlegui, L.E. ve Soriano, M.A., 1998. Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain), International Journal of Remote Sensing, 19,16, 3169-3185.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N. ve Viguier, F., 2016. Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities, Computers and Geosciences, 89, 21-31.
- Atkinson, P.M. ve Massari, R., 1998. Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy, Computers and Geosciences, 24, 373 – 385.
- Auberger, M. ve Rinehart J.S., 1960. Energy loss associated with impact of steel spheres on rocks, Journal of Geophysical Research, 65,12, 4157-4164.
- Aydan, Ö., Tokashiki, N., Iwata, N., Adachi, K. ve Takahashi, Y., 2016. The Development of a Servo-Control Testing Machine for Dynamic Shear Testing of Rock Discontinuities and Soft Rocks,” presented at the ISRM International Symposium—EUROCK, Nevşehir, Turkey, Aug. 29–31, , International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal.
- Aydan, O. ve Kawamoto. T., 1992. The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilisation, Rock Mechanics and Rock Engineering, 25,3, 143-165.
- Ayalew, L. ve Yamagishi, H., 2004. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakud-Yahiko Mountains, Central Japan, Geomorphology, 65, 15–31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. ve Kanno. T., 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications, Engineering Geology, 81, 432–445.
- Aynew, T. ve Barbieri, G., 2005. Inventory of rock-fall and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia, Engineering Geology, 77, 1–15.
- Azzoni, A. ve de Freitas M.H., 1995. Experimental gained parameters, decisive for rockfall analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, 28,2, 111-124.
- Balis, V., Karamistos, S., Kotsis, I., Liapakis, C. ve Simpas, N., 2004. 3DLaser Scanning Integration of Point Cloud and CCD Camera Video Data for The Production of High Resolution and Precision RGB Textured Models: Archaeological Monuments Surveying Application In Ancient Ilida, In Proceedings Of FIG Working Week, Athens, Greece.

- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, Eckstein, W. ve Ebner, H., 1999. Automatic road extraction based on multi-scale grouping and context, Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 65, 777-785.
- Barredol, J.I., Benavidesz, A., Herhl, J. ve Van Westen, C.J., 2000. Comparing heuristic landslide susceptibility assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2,1, 9–23.
- Baeza, C. ve Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques, Earth Surf. Processes and Landforms, 26, 1251–1263.
- Barber, D., 2011. 3D Laser Scanning for Heritage: Advice Ant Guidance To Users On Laser Scanning In Archaeology And Architecture, English Heritage, Swindon.
- Banerjee, S. ve Mitra, S., 2005. Fold-thrust styles in the Absaroka thrust sheet, Caribou National Forest area, Idaho-Wyoming thrust belt, Journal of Structural Geology, 27, 51-65.
- Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S. ve Dorren, L., 2008. Slope stability and erosion control, p.17–64, Ecotechnological solutions.
- Bernknopf, R.L., Cambell, R.H., Brookshire, D.S. ve Shapiro, C.D., 1998. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 25, 39 – 56.
- Binal, A. ve Ercanoğlu, M., 2010. Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region, Environmental Earth Sciences, 61, 1361–1373.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, xii, p.251, Wiley, New York.
- Bieniawski, Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends, In: Hudson, J.A., ed., Comprehensive Rock Engineering, Volume 3, p. 553-573, Oxford, Pergamon Press, New York.
- Booth-Rea, G., Azanón, J., Azor, A. ve Garcia-Duenas, V., 2004. Influence of strike-slip fault segmentation on drainage evolution and topography, A case study: the Palomares Fault Zone (southeastern Betics, Spain), Journal of Structural Geology, 26, 1615-1632.
- Bourrier, F., Lambert, S. ve Baroth J., 2015. A reliability-based approach for the design of rockfall protection fences, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 247–259.
- Bowman, R., 1995. Coefficient of restitution as an indication of impact resistance, Standards Association of Australia.

- Bozzolo, D. ve Pamini, R., 1986. Simulation of rock falls down a valley side, Acta Mechanica, 63, 113–130.
- Bobet, A., 1999. Analytical solutions for toppling failure, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36,7, 971-980.
- Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. In: Proceedings 4th international symposium on landslides, Toronto, 1, 307–324.
- Budetta, P. and Santo, A., 1994. Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (Southern Italy): A case study, Engineering Geology, 36, 197-210.
- Budetta, P., 2004. Assessment of rockfall risk along roads, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 71–81.
- Burdick, R. G. ve Speirer, R. A., 1980. Development of a method to detect geologic faults and other linear features from LANDSAT images, U. S. Bureau of Mines Report Inv., 8413:74.
- Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. ve Duman, Y., 2005. Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analysis, Geomorphology, 82, 250–271.
- Cancelli, A. ve Crosta, G.B., 1993. Hazard and risk assessment in rockfall prone areas, In: Telford T (ed) Risk reliability in ground engineering, pp 177–190.
- Carrara, A., Cardinali, M. ve Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide susceptibility and risk, J Interdenominat Theol Center (ITC), 2, 172–183.
- Castellanos Abella, E.A. ve Van Westen, C.J., 2007. Generation of landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation, Landslides, 4, 311–325. doi:10.1007/s10346-007- 0087-y
- Chorowicz, J., Kim, J., Manoussis, S., Rudant, J.P., Foin, P. ve Veillet, I., 1989. A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital terrain models, Remote Sensing of the Environment, 29, 229 – 239.
- Chainey, S. ve Ratcliffe, J., 2005. GIS and Crime Mapping John Wiley & Sons, Chichester.
- Chau, K.T., Tang, Y.F. ve Wong, R.H.C., 2004. GIS-Based Rock-fall susceptibility map for Hong Kong, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41,3, 530–542.
- Choi, J., O.h, H.J., Lee, H.J., Lee, C.h. ve Lee, S., 2012. Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS, Engineering Geology, 124, 12–23.

- Chau, K.T. ve Lee, C.F., 1998. Experimental studies on rockfall and debris flow. Planning, Design and Implementation of Debris Flow and Rockfall Hazards Mitigation Measures, Hong Kong, 115-128.
- Chau, K.T., Tang, Y.F. ve Wong, R.H.C., 2004. GIS-Based Rock-fall susceptibility map for Hong Kong, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41,3, 530–542.
- Chau, K.T. ve Chan, J.E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression for Hong Kong Island, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2,4, 280–290.
- <http://www.cloudcompare.org/>, CloudCompare (version 2.6.2) [GPL software].
- Collet, B., Taud, H., Parrot, J.F., Bonavia, F. ve Chorowicz, J., 2000. A new kinematic approach for the Danakil block using a Digital Elevation Model representation, Tectonophysics, 316,3-4, 343-357.
- Çoğulu, E., 1970. Gümüşhane ve Rize granitik plutonlarının mukayeseli petrolojik ve jeokronolojik etüdü. İ.T.Ü. Maden Fakültesi (Doçentlik tezi), İstanbul.
- Crosta, G.B., Frattini, P. ve Sterlacchini, S., 2001. Valutazione e gestione del rischio da frana: principi e metodi, Regione Lombardia Publication, Milano 169.
- Crosta, GB. ve Agliardi, F., 2003. A methodology for physically based rockfall hazard assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 407–422.
- Crosta, G.B. ve Locatelli, C., 1999. Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo, In: Proceedings Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni, Glauco Brigatti Publisher, Genoa, 259–286.
- Cundall, P.A., 1971. Acomputer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock system, International Society for Rock Mechanics Symposium on Rock Fracture, Nancy, Paper 11-8.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Li, J. ve Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, Environmental Geology, 40, 381–391.
- Dai, F.C. ve Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong, Geomorphology, 42, 213 – 238.
- Dai, F.C. ve Lee, C.F., 2003. A spatiotemporal probabilistic modeling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression, Earth Surface Processes and Landforms, 28, 527–545.
- Davis, G. H. ve Reynolds, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions , 2nd edition, Wiley.

- Danzi, M., Di Crescenzo, G., Ramondini, M. ve Santo, A., 2012. Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys in rockfall instability studies, Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana, 24, 82–85.
- Derron, MH., Jaboyedoff, M. ve Blikra, LH., 2005. Preliminary assessment of rockslide and rockfall hazards using a DEM (Oppstadhornet, Norway), Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 285–292.
- Deere, D.u. 1968. Geological Considerations Rock Mechanics in Engineering Practice, ed.R.G. Stage and D.C. Zienkiewicz, Wiley, 1-20, Newyork.
- Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. ve Rohmer, J., 2016. a cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds”, the international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, xli-b5, xxiii isprs congress, 12–19 july, prague, czech republic.
- DIPS User’s guide Manual, Rock Science Inc., 1989-2002.
- Dorren, L.K., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Progress in Physical Geography, 27, 69-87.
- Dorren, L., Domaas, U., Kronholm, K. ve Labiouse, V., 2013. Methods for Predicting Rockfall Trajectories and Run-out Zones, Rockfall Engineering, 143–173.
- Evans, S.G. and Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazard at a base of talus slopes, Canadian Geotechnical Journal, 30, 620-636.
- Fanos, A.M. ve Pradhan, B., 2018. Laser Scanning Systems and Techniques in Rockfall Source Identification and Risk Assessment: A Critical Review, Earth Systems and Environment, 1-20.
- Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk, Canadian Geotechnical Journal, 31,2, 261–272.
- Fell, R. ve Hartford, D., 1997. Landslide risk management, Cruden ve Fell, Landslide risk assessment, 51–109, Balkema, Rotterdam.
- Fernandez-Hernandez, M., Paredes, C., Castedo, R., Llorente, M. ve de la Vega-Panizo, R., 2012. Rockfall detachment susceptibility map in El Hierro Island, Canary Islands, Spain, Natural Hazards, 64, 1247–1271.
- Feng, Q., Sjögren, P., Stephansson, O. ve Jing, L., 2001. Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station, Engineering Geology, 59, 133–146.
- Fleming, M.D. ve Hoffer, R.M., 1979. Machine processing of Landsat MSS data and LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

- Fornaro M., Peila D. ve Nebbia M., 1990. Block falls on rock slope Application of a numerical program to some real cases, Proceeding 6th International Congress IAEG, Amsterdam, Balkema, Rotterdam, 2173-2180.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A. ve Agliardi, F., 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically based approaches, Geomorphology, 94, 419–437.
- Frattini, P., Crosta, G.B. ve Agliardi, F., 2012. Rockfall characterization and modeling. In: Clague, J. J. ve Stead, D. (eds.) *Landslides - Types, Mechanisms and Modeling*, Cambridge University Press, New York, NY.
- Ganas, A., Pavlides, S. ve Karastathis V., 2005. DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates, Geomorphology, 65, 301-319.
- Ghorbanzadeh, O., Rostamzadeh, H., Blaschke, T., Gholaminia, K. ve Aryal, J., 2018. A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping, Natural Hazards, 94, 497–517.
- Ghorbanzadeh, O., Valizadeh Kamran, K., Blaschke, T., Aryal, J., Naboureh, A., Einali, J. ve Bian, J., 2019. Spatial Prediction of Wildfire Susceptibility Using Field Survey GPS Data and Machine Learning Approaches, Fire, 2,43.
- Giacomini, A., Buzzi, O., Renard, B. ve Giani, G.P., 2009. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46, 708–715.
- Gorseveski, P.V., Gessler, P. ve Foltz, R.B., 2000. Spatial prediction of Landslide susceptibility using logistic regression and GIS, In: 4th International conference on integrating GIS and environmental modeling, Alberta, 9.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to Rock Mechanics (2nd edition), p. 562, Wiley, New York.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M. ve Catalano, E., 2007. Logistic regression analysis in the evaluation of mass movement's susceptibility case study: Calabria, Italy, Engineering Geology, 89,1, 47–66.
- Gümüş, K., 2008. Yersel Lazer Tarayıcılar ve Konum Doğruluklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ- FBE Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. ve Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, Geomorphology, 31, 181–216.



- Guzzetti, F., 2005. Review and selection of optimal geological models related to spatial information available, Risk advanced weather forecast system to advise on risk events and management action 1.14, IRPI CNR, Perugia, Italy.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. ve Cardinali, M., 2006a. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 115–131.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. ve Galli, M., 2006b. Estimating the quality of landslide susceptibility models, Geomorphology, 81, 166–184.
- Guenther, A., Carstensen, A. ve Pohl, W., 2004. Automated sliding susceptibility mapping of rock slopes, Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 95–102.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 1/250000 ölçekli jeolojik ve metalojenik haritası, MTA, Ankara.
- Harrison, J.P., ve Hudson, J.A., 2000. Engineering Rock Mechanics—an Introduction to the Principles. Elsevier.
- Heddi, M., Eastaff, D.J. ve Petch, J., 1999. Relationships between tectonic and geomorphological linear features in the GuadixBaza Basin, Southern Spain, Earth Surface Processes and Landforms, 24, 931 – 942.
- Hencher, S.R. ve Richards, L.R., 1989. Laboratory Direct Shear Testing of Rock Discontinuities, Ground Eng, 22,2, 24–31.
- Hencher, S.R., 1995. Interpretation of Direct Shear Tests on Rock Joints, presented at the 35th US Symposium on Rock Mechanics, June 5–7, University of Nevada, Reno, Reno, Nevada.
- Hencher, S.R., Lee, S.G., Carter, T.G. ve Richards, L.R., 2011. Sheeting Joints: Characterisation, Shear Strength and Engineering, Rock Mech Rock Eng, 44,1, 1–22.
- Hencher, S.R., 2012. Discussion of Alejano, Gonzalez and Muralha, Rock Mech. Rock Eng, 45,6, 1137–1139.
- Hencher, S.R. ve Richards, L.R., 2015. Assessing the Shear Strength of Rock Discontinuities at Laboratory and Field Scales, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48,3, 883–905.
- Hoek, E. ve Bray, J., 1981. Rock Slope Engineering, 3rd edn, Institute of Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hoek, E. ve Diederichs, M., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 203-215.

- Hoek, E., 2006. Practical rock engineering, North Vancouver, British Columbia, Canada: Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- Hoek, E., 2010. Practical Rock Engineering, Chapter 9: Analysis of rockfall hazards, 2007 (Last Accessed April 21).
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C. ve Bui, D.T., 2015. Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines, CATENA, 133, 266–281.
- Hooper, D.M., Bursık, M.I. ve Webb, F.H., 2003. Application of high-resolution, interferometric DEMs to geomorphic studies of fault scarps, Fish Lake Valley, Nevada-California, USA, Remote Sensing of Environment, 84, 255-267.
- Hudson, J.A., ve Harrison, J.P., 2005. Engineering rock mechanics : an introduction to the principles, Pergamon.
- Hung, L.Q., Dinh, N.Q., Batelaan, O., Tam, V.T. ve Lagrou D., 2002. Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La-NW Vietnam), Journal of Cave and Karst Studies, 64,1, 23-33.
- Hungr, O. ve Evans, S.G., 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. In: Bonnard C (ed) 5th International Symposium on Landslides, Balkema, Lausanne, vol 1, 685–690.
- Hungr, O., Leroueil, S. ve Picarelli, L., 2013. The Varnes classification of landslide types, an update, Landslides, 11, 167–194.
- Iqbal, M.M., Abu Bakar, M.Z., Akram, M., Shahzad, M. ve Majeed, Y., 2013. Slope stability analysis of Dandot plateau, Punjab, Pakistan, Pakistan Journal of Science, 65,4, 531-538.
- Ishizaka, A. ve Labib, A., 2009. Expert choice: Benefits and limitations, Operational research society Ltd., 22,4, 201-220.
- ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006: International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.
- Iwahashi, J., Watanabe, S. ve Furuya, T., 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan, Computers & Geosciences, 27, 851-865.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Hantz, D., Heidenreich, B. ve Mazzoccola, D., 2001. Terminologie. In: Carere, Ratto, Zanolini (eds) Prevention des mouvements de versants et des instabilites de falaises, 48–57.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Philippossian, F. ve Rouiller, J.D., 2004. Assessing fracture occurrence using “weighted fracturing density”: a step towards estimating rock instability hazard, Nat Hazards Earth Syst Sci, 4, 83–93.

- Jaboyedoff, M. ve Labiouse, V., 2011. Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones, Nat Hazards Earth Syst Sci, 11, 819–828.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R. ve Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review, Natural Hazards, 61, 5-28.
- Jade, S. ve Sarkar, S., 1993. Statistical models for slope stability classification, Engineering Geology, 36, 91–98.
- Jones, K.H., 1998. A Comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, Computers & Geosciences, 24, 315-323.
- Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L. ve Arkin, Y., 1996. Automatic extraction of geological linear features from digital remote sensing data using a Hough Transform, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62, 525–531.
- Keefer, D. K., 1992. The susceptibility of rock slopes to earthquake-induced failure, Proceeding 35th Annual Meeting of the Association of Engineering Geologists (ed. Martin L. Stout), Long Beach, CA, 529–538.
- Kelarestaghi, A. ve Ahmadi, H., 2009. Landslide susceptibility analysis with a bivariate approach and GIS in northern Iran, Arabian Journal of Geosciences, 2, 95–101.
- Kemeny, J., Norton, B. ve Turner, K., 2006a. Rock slope stability analysis utilizing ground-based LIDAR and digital image processing. Felsbau, 24, 8+10-15.
- Kentli, B. ve Topal, T., 2004. Assessment of rock slope stability for a segment of the Ankara–Pozanti motorway, Turkey, Engineering Geology, 74, 73-90.
- Khajavi, N., Quigley, M., McColl, S., Rezanejad, A., 2012. Seismically induced boulder displacement in the Port Hills, New Zealand during the 2010 Darfield (Canterbury) earthquake, New Zeal, J. Geol. Geophys, 55, 271–278.
- Kim, G.B., Lee, J.Y. ve Lee, K.K., 2004. Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and AvenueTM scripts, Computers & Geosciences, 30, 1117–1126.
- Kim, J. H., Yoon, W. S. ve Jeong, U. J., 2002. kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes, Engineering Geology, 67, 51 – 61.
- Khorram, S., Koch, F.H., Van Der Wiele, C.F. ve Nelson, S. A., 2012. Remote sensing, Springer Science & Business Media, New York, NY.
- Kliche, C.A., 1999. Rock slope stability, SME, Littleton, CO.
- Kobayashi, Y., Harp, E. L., ve Kagawa, T., 1990. Simulation of rock falls triggered by earthquakes, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 23,1, 1–20.

- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia, Geomorphology, 74, 17–28.
- Kühni, A. ve Pfiffner, O.A., 2001. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250-m DEM, Geomorphology, 41, 285- 307.
- Kulatilake, P.H.S.W., Wang, L., Tang, H. ve Liang, Y., 2011. Evaluation of rock slope stability for yujian river dam site by kinematic and block theory analyse, Computers and Geotechnics, 38, 846–860.
- Lamelas M.T., Marinoni, O., Hoppe, A. ve Riva, J., 2008. Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain), Environ Geol, 54, 963–977.
- Lambert, S., ve Nicot, F., 2013. Rockfall Engineering, 57–59.
- Lee, S. ve Pradhan, B., 2006. Probabilistic landslide susceptibility s and risk mapping on Penang Island, Malaysia, Journal of Earth System Science, 115,6, 661–672.
- Lee, S. ve Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, Environ Geol, 50, 847–855.
- Lee, S. ve Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea, Environmental Geology, 40, 1095–1113.
- Mazzoccola, D. ve Sciesa, E., 2000. Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps, In: 8th international symposium on landslides, Balkema, Rotterdam, 2, 1035–1040.
- Marquinez, J., Duarte, R.M., Farias, P. ve Sa´nchez, M.J., 2003. Predictive GIS-based model of rockfall activity in mountain cliffs, Nat Hazards, 30,3, 341–360.
- Mavrouli, O.C., 2011. Quantitative evaluation of the rockfall risk, Application to the Sola` d'Andorra, PhD thesis, Universitat Polite`cnica de Catalunya.
- Miliaresis, G. ve Iliopoulou, P., 2004. Clustering of Zagros Ranges from the Globe DEM representation, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 5, 17-28.
- Morris, K., 1991. Using knowledge-base rules to map threedimensional nature of geological features, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57, 1209 – 1216.
- Mostafa, M. ve Zakir, F., 1996. New enhanced techniques for azimuthal analysis of lineaments for detecting tectonic trends in and around the Afro-Arabian Shield, International Journal of Remote Sensing, 17, 2923–2943.

- Nandi, A. ve Shakoor, A., 2009. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, Eng Geol, 110, 11–20.
- Oguchi, T., Aoki, T. ve Matsuta, N., 2003. Identification of an active fault in the Japanese Alps from DEM-based hill shading, Computers & Geosciences, 29, 885-891.
- Ohlmacher, C.G. ve Davis, C.J., 2003. Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA, Engineering Geology, 69, 331 – 343.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.H. ve Metzger, R., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, Natural Hazards and Earth System Science, 9, 1003-1019.
- Ozturk, H.S., Kocaman, S. ve Gokceoglu, C., 2019. A low-cost approach for determination of discontinuity orientation using smartphone images and application to a part of Ihlara Valley (Central Turkey), Eng Geol, 254, 63–75.
- Palma, B., Parise, M., Reichenbach, P. ve Guzzetti, F., 2011. Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula, Campania, southern Italy, Nat. Hazards, 61, 187–201.
- Pantelidis, L. ve Kokkalis, A., 2011. Designing passive rockfall measures based on computer simulation and field experience to enhance highway safety, Int J Rock Mech Min Sci, 48, 1369–1375.
- Park, H. J., T. R. West, ve I. Woo., 2005. Probabilistic Analysis of Rock Slope Stability and Random Properties of Discontinuity Parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA, Engineering Geology, 79, 230-250.
- Pantelidis, L., 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 46, 315–325.
- Peng, B., 2000. Rockfall Trajectory Analysis -Parameter Determination and Application, University of Canterbury, New Zealand.
- Pelin, S., 1977. Alucra (Giresun) güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından jeolojik incelenmesi, Karadeniz Teknik Üniv. Yerbilimleri FaK. Yayını, 13, 103.
- Pfeiffer, T.J. ve Bowen, T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls, Bull. Ass. Engllg. Geol, XXVI, 135-146.
- Pierson, L.A., Davis, S.A. ve Van Vickie, R., 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual, federal highway administration (FHWA), report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA. US Department of Transportation, Oregon.
- Piteau, D.R. ve Clayton, R., 1977. Discussion of paper "Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data.

- Pourghasemi, H.R. ve Rahmati, O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162, 177–192.
- Pradhan, B., 2010. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia, *Adv Space Res.*, 45, 1244–1256.
- Priest, S.D. ve Hudson, A.J., 1976. Discontinuity Spacing in Rock., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. And Geomech.*, Abstr.
- Redweik, P., 2010. Photogrammetry. In: XU, G. (ed.) *Sciences of Geodesy-II: Innovations and Future Developments*, Springer Science & Business Media, New York, NY
- Reger, J.P., 1979. Discriminate analysis as a possible tool in landslide investigations, *Earth Surf Proc Land*, 4, 267–273.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. ve Ardizzone, F., 2005. Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. In: Glade T, Anderson M, Crozier MG (eds) *Landslide risk assessment*. Wiley, Chichester, 429-468.
- Reshetyuk, Y., 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners, Licentiate thesis in Geodesy Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics Division of Geodesy.
- Reshetyuk, Y., 2009. Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning, Doctoral Thesis in Infrastructure, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- Ritchie, A.M., 1963. *Evaluation of rockfall and its control*, Washington DC.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R. ve Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds, *Comp. & Geosci*, 68, 38-52.
- Riquelme, A. J., Abellan, A. ve Tomas, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3d point clouds, *Engineering Geology*, 195, 185 –195.
- Riquelme, A.J., Tomás, R. ve Abellán, A., 2016. Characterization of rock slopes through slope mass rating using 3D point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 84, 165–176.
- A.J. Riquelme, A. Abellán, R. ve Tomás, M., 2016. Using open-source software for extracting geomechanical parameters of a rock mass from 3D point clouds: Discontinuity set extractor and SMRTTool, *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Richards, L.R., Peng., B. ve Bell, D.H., 2001. Laboratory and Field Evaluation of the Normal Coefficient of Restitution for Rocks. In *Rock Mechanics – a Challenge*

for Society, ed. Särkkä and Eloranta, Proceedings of Eurock Conference, Finland, 149-155.

[https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf\\_files/tutorials/Tutorial\\_04\\_Toppling\\_Planar\\_and\\_Wedge\\_Sliding.pdf](https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf_files/tutorials/Tutorial_04_Toppling_Planar_and_Wedge_Sliding.pdf), Rocscience, DIPS 7.0 Tutorial Manual. Retrieved February 9, 2018.

<https://www.rocscience.com/rocscience/products/dips>, Rocscience, Dips - Graphical and statistical analysis of orientation data. Toronto: Rocscience Inc. Retrieved, 2017.

[https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf\\_files/tutorials/Tutorial\\_04\\_Toppling\\_Planar\\_and\\_Wedge\\_Sliding.pdf](https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf_files/tutorials/Tutorial_04_Toppling_Planar_and_Wedge_Sliding.pdf), Rocscience, DIPS 7.0 Tutorial Manual. Retrieved February 9, 2018.

Robotham, M.E., Wang, H. ve Walton G., 1995. Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes, Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy Section A, 104,Jan-April, A25-33.

Rocscience Inc., 2013. RocFall 5.0.

Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S. ve Allison, R.J., 2005. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 363-375.

Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, AC. ve Peruccacci, S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts, Geomorphology, 114, 129–142.

Rouiller, J.D. ve Marro, C., 1997. Application de la methodologie Matterrock a l ´evaluation du danger lie aux falaises, Eclogae Geol Helv, 90, 393–399.

Ruíz, J. ve Li, C., 2014. Measurement of the Basic Friction Angle of Rock by Three Different Tilt Test Methods, Proceedings of EUROCK 2014, Balkema, Rotterdam, Rock Mechanics and Rock Engineering: Structures on and in Rock Masses, 261–266.

Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology, 15,3 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).

Saaty, T.L., 1980. A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology, 15, 234–281.

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process, International Journal of Services Sciences, 1,1, 83–98.

Sadagah, B., 2010. Rockfalls risk reduction and redesign of rock slopes using rockfall program, ISRM International Symposium 6th Asian Rock Mechanics Symposium - Advances in Rock Engineering, New Delhi, India.

- Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes, 2nd ed, Oxford University Press.
- Sangchini, E.K., Emami, S.N., Tahmasebipour, N., Pourghasemi, H.R., Naghibi, S.A., Arami, S. A. ve Pradhan, B., 2016. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharmahal-e-Bakhtiari Province, Iran Arabian Journal of Geosciences, 9, 201.
- Santana, Q.M. vd., 2008. "3D RiskMapping, Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning, Training material based on practical applications", European Leonardo Da Vinci programme.
- Shahabi, H., Hashim, M. ve Ahmad. B.B., 2015. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran, Environmental Earth Sciences, 73, 8647–8668.
- Slob, S. ve Hack, R., 2004. 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique, Lect. Notes Earth Sci, 104, 179–189.
- Stead, D. ve Wolter, A., 2015. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology, Journal of Structural Geology, 74, 1–23.
- Stevens, W.D., 1998. RocFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, Dissertation, University of Toronto, Toronto.
- Su, F. ve Cui, P., 2010. Susceptibility assessment of landslides caused by the wenchuan earthquake using a logistic regression model, Journal of Mountain Science, 7, 234–245.
- Sung, Q. ve Chen, Y., 2004. Geomorphic evidence and kinematic model for quaternary transfer faulting of the Pakuashan anticline, Central Taiwan, Journal of Asian Earth Sciences, 24, 389- 404.
- Suzen, M. L. ve Toprak, V., 1998. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey, International Journal of Remote Sensing, 19, 1101–1114.
- Topal, T., Akin, M. ve Ozden, U.A., 2007. Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey, Environmental Geology, 53, 191–200.
- Tunusluoglu, M. C. ve Zorlu K., 2009. Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey), Environmental Geology, 56, 963–972.
- Turner, A.K. ve Duffy, J.D., 2012. Modeling and prediction of rockfall. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Rockfall, characterization and control, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 334–406.



- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H. ve Tuncay, E., 2001. Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoğlu coal mine and possible remedial measures, Environmental Geology, 40,6, 769–786.
- Ulusay, R. ve Karakul, H., 2016. Assessment of Basic Friction Angles of Various Rock Types from Turkey under Dry, Wet and Submerged Conditions and Some Considerations on Tilt Testing, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75,4, 1683–1699.
- <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>, UNISDR Terminology on disaster risk reduction, 2009.
- Umili, G., Ferrero, A. ve Einstein, H., 2013. A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3d model, Computers & Geosciences, 51, 182 – 192.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. ve Soeters, R., 1977. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GISbased hazard zonation, Geol Rundsch 86, 404–414.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes, Landslides, Analysis and Control, Special Report 176, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, 11–33.
- Varnes, D.J., 1984. IAEG—International Association Engineering Geology, Commission on landslides and other mass-movements landslide hazard zonation: a review of principles and practice, the UNESCO Press, Paris.
- Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P. ve Micklethwait, S., 2014. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAVbased photogrammetric data: An image analysis approach, Comp. & Geosci., 69, 22-32.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Gerber, W. ve Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection—a review, Natural Hazards and Earth System Sciences 11, 2617–2651.
- Viero, A., Teza, G., Massironi, M., Jaboyedoff, M. ve Galgaro, A., 2010. Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps), Geomorphology 122, 191-204.
- Walker, R. ve Jackson, J., 2002. Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system, Journal of Structural Geology, 24, 1677-1698.
- Webb, A., 2002. Statistical Pattern Recognition, 2nd ed, Wiley, New York.
- Wieczorek, G.F., Gori, P.L., Jager, S., Kappel, W.M. ve Negussey, D., 1996. Assessment and management of landslide hazards near Tully Valley landslide, Syracuse, New

- York, USA. Proc. 7th Int. Symposium on Landslides, Trondheim, Balkema, Rotterdam, pp. 411 – 416.
- Wu, S.S., 1985. Rockfall evaluation by computer simulation, *Transportation Research Record*, 1031, 1-5.
- Wyllie, D.C. ve Mah, C.W., 2002. *Rock Slope Engineering*, 4th edition, 422 pages, Taylor & Francis, London.
- Wyllie, D.C. ve Mah C.W., 2004. *Rock slope engineering-civil and mining*, 4th edition, p. 431, Spon Press, New York.
- Wyllie, D. ve Mah, C., 2018. *Rock Slope Engineering*. Spon Press. Yosemite Climbing Rangers, 2004. Yosemite Climbing Information, Retrieved March 4.
- Wyllie, D.C. ve Mah, C.W., 2005. *Rock Slope Engineering: civil and mining*, 4th Edition, p. 431, Spon Press, Taylor and Francis Group, London and New York.
- Yalcin, A., 2007. Environmental impacts of landslides: a case study from East Black Sea region, Turkey, *Environ. Eng. Sci.*, 24,6, 821-833.
- Yalcin, A. ve Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey), *Nat Hazards*, 41, 201–226. doi:10.1007/ s11069-006-9030-0
- Yang, X.L. ve Zou J. F., 2006. Stability factors for rock slopes subjected to pore water pressure based on the Hoek-Brown failure criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43,7, 1146-1152.
- Yoon, W.S., Jeong, U.J. ve Kim, J.H., 2002. kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes, *Engineering Geology*, 67, 51–61.
- Yoshimatsu, H. ve Abe, S., 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using analytical hierarchy process (AHP) method, *Landslides*, 3, 149–158. doi:10.1007/ s10346-005-0031-y
- Zahedi, F., 1986. The analytic hierarchy process, a survey of the method and its applications, *Interfaces*, 16,4 96-108.
- Zakir, F., Qari, M. ve Mostfa, M., 1999. A new optimising technique for preparing lineament density maps, *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1073–1085.
- ZHOU, Q. ve LIU, X., 2004. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties, *Computers & Geosciences*, 30, 369-378.

## 6. EKLER

Ek Tablo 1. Temel RMR puanlama tablosu

Alan	Nokta Yüklü Dayanım İndeksi (MPa)	RQD	Süreksizlik Ara Uzaklığı (cm)	Devamlılık	Açıklık (mm)	Pürüzlülük	Dolgu	Bozunma	YST	Toplam Temel RMR Puanı
1	2.51	66.98	8	Düşük derece devamlı	20-30	Pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>56</b>
2	3.12	69.17	9	Orta derece devamlı	20-30	Düz	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>50</b>
3	1.89	57.63	7	Düşük derece devamlı	10-20	Az pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>51</b>
4	3.59	83.15	11.5	Orta derece devamlı	20-30	Az pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>56</b>
5	1.78	48.39	6	Düşük derece devamlı	10-20	Az pürüzlü	Yok	Az bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>53</b>

Ek Tablo 1'in devamı

Alan	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi (MPa)	RQD	Süreksizlik Ara Uzaklığı (cm)	Devamlılık	Açıklık (mm)	Pürüzlülük	Dolgu	Bozunma	YST	Toplam Temel RMR Puanı
6	2.94	63.74	8	Orta derece devamlı	5-10	pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>54</b>
7	4.28	73.83	10	Orta derece devamlı	5-10	pürüzlü	Yok	Az bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>61</b>
8	2	80.77	12	Orta derece devamlı	20-30	pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>58</b>
9	2.81	52.81	6	Orta derece devamlı	10-20	Az pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>52</b>
10	2.28	43.94	5	Orta derece devamlı	10-20	Az pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>44</b>
11	2.48	60	7	Orta derece devamlı	20-30	pürüzlü	Yok	Orta derece bozunmuş	Nemli	
<b>Puan</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>54</b>

Ek Tablo 2. Rocscience geri şıçrama katsayıları tablosu

RN ( Normal )				RT ( Tangential )				Type	Verification	Reference
Min	Max	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Mean	Standard Deviation			
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving	Tested using simulated rockfalls of similar size and shape of a previous rockfall.	Pfeiffer, T.J., and Bowen, T.D., "Computer Simulation of Rockfalls." Bulletin of Association of Engineering Geologists. Vol. 26, No. 1. 1989. pp135-146
0.330	0.370			0.830	0.870		Bedrock or boulders with little soil or vegetation			
0.300	0.330			0.830	0.870		Talus with little vegetation			
0.300	0.330			0.800	0.830		Talus with some vegetation			
0.280	0.320			0.800	0.830		Soft soil slope with little vegetation			
0.280	0.320			0.78	0.820		Vegetated soil slope			
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face	Tested on restoration-blasting slopes made of four types of materials; blast-generated rock fragments, partially vegetated scree on berms, uncovered blast piles, and vegetated quarry waste.	Robotham, M.E., and Wang, H., and Walton, G., "Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes." Institution of mining and Metallurgy, Section A. 1995.104(Jan-April), pp A25-A33
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree		
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile		
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile		
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face		
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree		
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.	Tested as control parameters	Wu, Shie-Shin "Rockfall evaluation by computer simulation" Transportation Research Records. Vol. 1031 pp 1-5, 1985.
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desopits	Consisted of hand made throws and free fall tests by fragmentation of rock using explosives, of dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus deposit of the landslide fans. Also used back-analysis, and information from Urciuoli.	Budetta, P., and Santo, A. "Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania (southern Italy)." Engineering Geology. Vol.36 pp197-210.
		0.100				0.200		Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff		
		0.000				0.240		Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff		

Ek Tablo 2'nin devamı

RN ( Normal )				RT ( Tangential )				Type	Verification	Reference
Min	Max	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Mean	Standard Deviation			
		0.393				0.567		Soil	Tested by dropping 3 to 5 cm cuboid and angular granite rock fragments onto slopes	Chau, K.T., and Wong, R.H.C., and Lee, C.F. "Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution" International Journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics. Vol. 35, Section 4-5. 1996. pp662-663
		0.453				0.737		Shotcrete		
		0.487				0.910		Rock slope		
		0.500				0.950		Bedrock	Referenced from tests carried out by Barbieri et al.	Giani, G.P. "Rock Slope Stability Analysis" Rotterdam, Balkema 1992.
		0.350				0.850		Bedrock covered by large blocks		
		0.300				0.700		Debris formed by uniform distributed elements		
		0.250				0.550		Soil covered by vegetation		
		0.530				0.990		Clean hard bedrock		
		0.400				0.900		Asphalt roadway		
		0.350				0.850		Bedrock outcrops with hard surface, large boulders		Hoek, Evert. "Unpublished notes" NSERC Industrial Research Professor of Rock Engineering, Department of Civil Engineering, University of Toronto, St George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4
		0.320				0.820		Talus cover		
		0.320				0.800		Talus cover with vegetation		
		0.300				0.800		Soft soil, some vegetation		
0.370	0.420							Smooth hard surfaces and paving		
0.330	0.370							Most bedrock and boulder fields	Developed by observation and literature review	Pfeiffer, T.J., and Higgens, J.D., "Rockfall Hazard Analysis Using the Colorado Rockfall Simulation." Transportation Research Record 1288, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp117-126.
0.300	0.330							Talus and firm soil slopes		
0.280	0.300							Soft soil slopes		
				0.870	0.920			Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces		
				0.830	0.870			Most bedrock surfaces and talus with no vegetation		
				0.820	0.850			Most talus slopes with some low vegetation		
				0.800	0.830			Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation		
				0.780	0.820			Brush covered soil slope		

Ek Tablo 2'nin devamı

RN ( Normal )				RT ( Tangential )				Type	Verification	Reference
Min	Max	Mean	Standard Deviation	Min	Max	Mean	Standard Deviation			
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	a) rolled many rocks down the slope to verify used values b) comparison to historical rockfall events at site	feedback from user of RocFall version 3
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop		
		0.320	0.040			0.820	0.040	Talus cover		
		0.320	0.040			0.800	0.040	Talus with vegetation		
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving		
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	default program values used	feedback from user of RocFall version 3
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop		
		0.480	0.190			0.530	0.170	Concrete	inverse calculation of paths - standard deviations seemed to large	feedback from user of RocFall version 3
		0.470	0.300			0.550	0.230	Weathered Rock		
		0.480	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths, roughness of 7.9 degrees for concrete, 9.3 for rock	
		0.470	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock		
		0.850	0.000			0.530	0.000	Concrete	inverse calculation of paths	
		1.000	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock		
		0.530	0.040			0.990	0.040	Bedrock	Estimation, block diameters 10 to 30 cm	feedback from user of RocFall version 3
		0.500	0.060			0.700	0.060	Blockfield		
		0.500	0.060			0.650	0.060	Blockfield with bushes and small trees		
		0.500	0.060			0.500	0.060	Blockfield with forest		
		0.300	0.060			0.800	0.060	Top-soil with vegetation		
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving		
		0.350	0.040			0.850	0.040	Gravel road		
		0.500				0.800		Sparsely forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.		
		0.500				0.800		Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.	Calculated from historic rockfall	
		0.700				0.900		rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.	Calculated from historic rockfall	

## ÖZGEÇMİŞ

Öğrenim hayatına Urmia Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü lisans programını kazanarak devam etti. Yine Urmia Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisansını tamamladı. Öğrenim sürecinde halen Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde Doktora öğrencisi olarak devam etmektedir.

