

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BEŞİKDÜZÜ (TRABZON) YÖRESİ HEYELAN TEHLİKE ANALİZLERİ

DOKTORA TEZİ

Kübra TEZEL

**MAYIS 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BEŞİKDÜZÜ (TRABZON) YÖRESİ HEYELAN TEHLİKE ANALİZLERİ

Kübra TEZEL

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 : 26 / 05 /2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aykut AKGÜN

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Öncelikle kurmuş olduğu cumhuriyet sayesinde, haklarımıza kavuşmamızı sağlayan, eğitim ve bilimin ışığı ile açtığı yolda yürümeme imkan kılan Ulu Önderimiz Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e en kalbi duygularım ve büyük bir saygı ile sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Beni yetiştiren, öğretirken sabır, sevgi ve güler yüzünü eksik etmeyen, hayattaki duruşu ve çalışmalarını her zaman örnek aldığım, desteğiyle her zaman yanımda olup yol gösteren çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Aykut Akgün'e sonsuz teşekkür borçluyum.

Tezimin izleme sürecinde katkıları ve yardımları için değerli hocalarım Prof. Dr. Fikri Bulut ve Prof. Dr. S. Banu İkizler'e teşekkürlerimi sunarım. Ne zaman bilgisine ve yardımına ihtiyacım olsa elinden gelen herşeyi yapan değerli hocam Prof. Dr. Hakan Ersoy'a teşekkürlerimi sunarım. Bilgisine her danıştığımda yardımlarını esirgemeyen hocam Dr. Öğr. Üyesi Emrehan Kutluğ Şahin'e teşekkür ederim.

Arazi, laboratuvar veya ofis çalışmaları farketmeksizin yardımlarıyla yanımda olan, doktora yolunda birlikte yürüdüğümüz meslektaşım ve değerli arkadaşım Ehsan Alizadeh'e, arazi çalışmamda yardımcı için arkadaşım Ünal Bereketoğlu'na, laboratuvar çalışmalarımda bilgisine danıştığım arkadaşım İnşaat Mühendisi Dr. Saeid Zardari'ye ve bilgi paylaşımı için Dr. Bilgehan Kul Yahşi'ye teşekkür ederim. En ihtiyacım olan anda uzattığı eli ve yardımları için meslektaşım, arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Senem Tekin'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Bugün buradaysam ailemin sayesinde. Hayatım boyunca yanımda olan, maddi-manevi desteklerini esirgemeyen, öncelikle iyi bir insan olarak yetiştiren canlarım annem Ayten Tezel, babam Atilla Tezel ve kardeşim Kürşat Batuhan Tezel'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Bu zorlu yolda tüm duygularımı benimle anbean yaşayan, çıkmaza girdiğim her an uzaklardan moral veren en iyi arkadaşım anneme ayrıca teşekkür ederim, İyi ki varsınız.

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2018-7368 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Kübra TEZEL

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Beşikdüzü (Trabzon) Yöresi Heyelan Tehlike Analizleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut AKGÜN’ün sorumluluğunda tamamladığımı, örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ilgili lâboratuvarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/05/2021

Kübra TEZEL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş ve Amaç.....	1
1.2. Çalışma Alanı.....	2
1.3. Çalışma Alanının Jeolojisi.....	4
1.4. Kütle Hareketleri ve Heyelan.....	5
1.5. Kütle Hareketlerini Etkileyen Faktörler.....	6
1.6. Heyelan Duyarlılık Haritalaması.....	7
1.7. Heyelan Tehlike Haritalaması.....	7
1.8. Önceki Çalışmalar.....	8
1.8.1. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları.....	8
1.8.2. Heyelan Tehlike Çalışmaları.....	13
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	19
2.1. Shalstab Matematiksel Modeli.....	20
2.2. Lojistik Regresyon (LR) Yöntemi.....	22
2.3. Destek Vektör Makineleri (DVM) Yöntemi.....	23
2.4. Fiziksel Tabanlı Model İçin Verilerin Hazırlanması.....	25
2.4.1. Birim Yoğunluk Tayini.....	25
2.4.2. Kıvam Limitleri.....	26
2.4.2.1. Likit Limit Deneyi.....	26
2.4.2.2. Plastik Limit Deneyi.....	27
2.4.3. Yıkamalı Elek Analizi.....	28
2.4.4. Hidrometre Deneyi.....	29

2.4.5.	Kesme Kutusu Deneyi.....	31
2.5.	Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performansı	32
2.5.1.	Alicı İşletim Karakteristiği (ROC).....	32
2.6.	Zamansal Olabilirlik.....	33
2.6.1.	Uygunluk Testi.....	34
2.7.	Alansal Olabilirlik	34
3.	BULGULAR	36
3.1.	Sayısal Yükseklik Modeli (SYM).....	36
3.2.	İkincil Topoğrafik Veriler	37
3.3.	Litoloji.....	42
3.4.	Heyelan Envanteri	43
3.5.	Laboratuvar Sonuçları	46
3.6.	Heyelan Duyarlılık Haritaları.....	48
3.6.1.	Shalstab Matematiksel Modeli.....	48
3.6.2.	Lojistik Regresyon (LR) Yöntemi	49
3.6.3.	Destek Vektör Makineleri (DVM) Yöntemi	51
3.7.	Heyelan Duyarlılık Haritalarının Karşılaştırılması	52
3.8.	Zamansal Olabilirlik.....	54
3.8.1.	Yağış Analizleri	55
3.9.	Alansal Olabilirlik	59
3.10.	Heyelan Tehlike Haritaları.....	61
3.10.1.	Shalstab Matematiksel Modeli Tabanlı Tehlike Haritaları	61
3.10.2.	Lojistik Regresyon Yöntemi Tabanlı Tehlike Haritaları	70
4.	SONUÇLAR	80
5.	ÖNERİLER	83
6.	KAYNAKLAR	84
7.	EKLER.....	92
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BEŞİKDÜZÜ (TRABZON) YÖRESİ HEYELAN TEHLİKE ANALİZLERİ

Kübra TEZEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aykut AKGÜN
2021, 91 Sayfa, 9 Sayfa Ek

Bu tezin amacı, Beşikdüzü ilçe sınırlarını kapsayan alanda heyelanlara yönelik olasılıksal ve fiziksel model tabanlı tehlike analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla, ilk olarak Google Earth uydu görüntülerinden yararlanılarak gözlenen heyelan alanlarının envanter haritası hazırlanmış, belirlenen yenilme alanları arazi çalışmalarıyla denetlenmiştir. Toplam 11 heyelan lokasyonundan alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri ile birim yoğunlukları, kıvam limitleri ve kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Çalışma alanına ait 1:25.000 ölçekli ve Harita Genel Müdürlüğü tarafından üretilen sayısal topoğrafik haritalardan yararlanarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında 10 m mekânsal çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (SYM) üretilmiş, SYM'den ikincil topoğrafik veriler elde edilmiştir. Yağış tetiklemeli meydana gelen heyelanların zamansal tekrarlanma olasılıkları için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen yağış verileri istatistiksel olarak analiz edilmiş, alansal olasılıkları için alansal büyüklük-frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Fiziksel modele dayalı duyarlılık değerlendirmesi Shalstab matematiksel modeli kullanılarak elde edilmiş, olasılıksal yöntemlerden Lojistik Regresyon (LR) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) yöntemleriyle de üretilen duyarlılık haritaları ile karşılaştırılmıştır. Yağış değerlerinden yola çıkarak 1, 2, 5, 10 ve 20 yıllık tekrarlanma periyotları ve alansal büyüklük olasılığı belirlenen eşik değerleri dikkate alınarak alanın olası heyelan tehlike haritaları üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan tehlike modellemesi, Fiziksel tabanlı model, Shalstab, Lojistik Regresyon

PhD. Thesis

SUMMARY

LANDSLIDE HAZARD ANALYSES OF BEŞİKDÜZÜ (TRABZON) REGION

Kübra TEZEL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geological Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Aykut AKGÜN
2021, 91 Pages, 9 Pages Appendix

The aim of this thesis is the realization of probabilistic and physical model-based hazard analyses for landslides in the area covering the borders of Beşikdüzü district. For this purpose, firstly, an inventory map of the observed landslide areas was prepared using Google Earth satellite images, and the determined failure areas were inspected by field studies. Unit densities, Atterberg limits and shear resistance parameters were determined with disturbed and undisturbed soil samples taken from a total of 11 landslide locations. Using the 1:25,000 scale digital topographic maps of the study area produced by the General Directorate of Mapping, a 10 m spatial resolution digital elevation model (DEM) was produced in the Geographical Information Systems (GIS) environment, and secondary topographic data were obtained from the DEM. For the temporal recurrence probabilities of the landslides triggered by precipitation, the precipitation data obtained from the General Directorate of Meteorology were statistically analyzed, and spatial magnitude-frequency analyzes were performed for the spatial possibilities. The susceptibility assessment based on the physical model was obtained using the Shalstab mathematical model and compared with the susceptibility maps produced by the probabilistic Logistic Regression (LR) and Support Vector Machines (SVM) methods. Based on the precipitation values, the possible landslide hazard maps of the area were produced by taking into account the 1, 2, 5, 10 and 20-year recurrence periods and the threshold values determined by the areal magnitude.

Key Words: Landslide hazard modeling, Physical based model, Shalstab, Logistic Regression

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası	3
Şekil 1.2. Doğu Karadeniz Bölgesi Jeoloji Haritası (MTA tarafından hazırlanan 1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritasından değiştirilmiştir; Bektaş vd. 1995, Eyuboglu vd. 2006).....	5
Şekil 2.1. Lineer Ayrılabilme Durumunda Optimum Ayırıcı Aşırı Düzlem (A1 ve A2: sınır, C1 ve C2: örnek grubu) (Yakut, 2012).....	24
Şekil 2.2. Birbirinden Doğrusal Olarak Ayrılamayan Veriler (Özkan, 2008)	24
Şekil 2.3. Örselenmemiş numune alımı	25
Şekil 2.4. a) Doğal numune b) Numunelerin etüvde kuruması c) Kuru numune.....	26
Şekil 2.5. Likit limit deneyi.....	27
Şekil 2.6. Plastik limit deneyi	28
Şekil 2.7. Yıkamalı elek analizi	29
Şekil 2.8. Hidrometre deneyi	31
Şekil 2.9. Kesme kutusu deneyi	32
Şekil 3.1. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli	36
Şekil 3.2. Çalışma alanına ait yamaç eğimi haritası	37
Şekil 3.3. Çalışma alanına ait yamaç yönelimi (bakı) haritası.....	38
Şekil 3.4. Çalışma alanına ait plan yamaç eğriselliği haritası.....	39
Şekil 3.5. Çalışma alanına ait profil yamaç eğriselliği haritası.....	40
Şekil 3.6. Çalışma alanına ait topoğrafik nemlilik indeksi haritası.....	41
Şekil 3.7. Çalışma alanına ait akarsu güç indeksi haritası	42
Şekil 3.8. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 1:25.000 ölçekli olarak üretilen sayısal jeoloji haritası	43
Şekil 3.9. Çalışma alanı heyelan envanter haritası.....	44
Şekil 3.10. Arazide tanımlanan heyelanların bazılarından örnekler	45
Şekil 3.11. a) 2013 b) 2014 c) 2018 yılında gözlemlenen heyelanlar.....	45
Şekil 3.12. Yıllara göre dağılımın grafiksel gösterimi	46
Şekil 3.13. Shalstab modeli ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası	49
Şekil 3.14. LR yöntemi ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası	50
Şekil 3.15. DVM yöntemi ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası.....	52

Şekil 3.16. Duyarlılık sınıfları yüzde dağılımları.....	53
Şekil 3.17. Duyarlılık haritalarının Alıcı İşletim Karakteristik Eğrisi ile karşılaştırılması	54
Şekil 3.18. Beşikdüzü İstasyonu yıllık yağış verileri.....	55
Şekil 3.19. 2012-2018 yılları için Beşikdüzü İstasyonu aylık ortalama yağış verileri	56
Şekil 3.20. Beşikdüzü İstasyonu 2012-2018 yılları günlük maksimum yağış değerleri.....	56
Şekil 3.21. Birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)	57
Şekil 3.22. 4 günlük maksimum yağış verileri için en uygun dağılım modeli	57
Şekil 3.23. 4 günlük maksimum yağış verileri için elde edilen yaşam fonksiyonu eğrisi .	58
Şekil 3.24. Alanın kuvvet kanunu ilişkisine göre heyelan alanı-frekans yoğunluğu grafiği.....	60
Şekil 3.25. Kernel yoğunluk tahminine göre heyelan boyutu olasılık dağılımları.....	61
Şekil 3.26. 250 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları	62
Şekil 3.27. 250 m ² 'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	63
Şekil 3.28. 250 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	64
Şekil 3.29. 500 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları	65
Şekil 3.30. 500 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları	66
Şekil 3.31. 500 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	67
Şekil 3.32. 1000 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	68
Şekil 3.33. 1000 m ² 'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	69
Şekil 3.34. 1000 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	70
Şekil 3.35. 250 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları	71
Şekil 3.36. 250 m ² 'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	72
Şekil 3.37. 250 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	73
Şekil 3.38. 500 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları	74

Şekil 3.39. 500 m ² 'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	75
Şekil 3.40. 500 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	76
Şekil 3.41. 1000 m ² 'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	77
Şekil 3.42. 1000 m ² 'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları.....	78
Şekil 3.43. 1000 m ² 'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası.....	79
Ek şekil 1. Zemin örneklerine ait granülometri eğrileri.....	92
Ek şekil 2. Örneklere ait likit limit deneyi grafikleri	95
Ek şekil 3. Örneklere ait kesme kutusu deneyi grafikleri	97
Ek şekil 4. Shalstab modeli tabanlı hazırlanan tehlike haritalarının alansal ve zamansal gerçekleşme yüzdeleri.....	99
Ek şekil 5. LR yöntemi tabanlı hazırlanan tehlike haritalarının alansal ve zamansal gerçekleşme yüzdeleri.....	100

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Shalstab matematiksel modelinde elde edilen duraylılık sınıflarının gösterimi (Michel vd., 2014)	21
Tablo 2.2. ROC eğrisi modeli doğruluk sınıflaması (Hosmer vd., 2013).....	32
Tablo 3.1. Birim yoğunluk değerleri.....	46
Tablo 3.2. Kıvam limitleri değerleri	47
Tablo 3.3. Zemin türleri (USCS'ye göre sınıflandırılmış).....	47
Tablo 3.4. Kayma direnci parametreleri	48
Tablo 3.5. LR yöntemi sonucu elde edilen istatistiksel sonuçlar	51
Tablo 3.6. Kolmogorov-Smirnov Testine göre en uygun yoğunluk fonksiyonu	58
Tablo 3.7. Poisson Dağılımına göre yağış değerlerinin 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 yıl için gerçekleşme olasılıkları.....	59
Tablo 4.1. Heyelan tehlike haritalarının alansal ve zamansal olasılık gerçekleşme yüzdeleri.....	82
Ek tablo 1. Örneklere ait zemin türü yüzde değerleri	94

SEMBOLLER DİZİNİ

AGİ	: Akarsu güç indeksi
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BS	: İngiliz Standartları
c	: Kohezyon
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
d	: Yoğunluk
DVM	: Destek vektör makineleri
EAA	: Eğri altında kalan alan
KTÜ-BAP	: Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
LL	: Likit limit
LR	: Lojistik regresyon
m	: Örnek kütlesi
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
MH	: İnorganik siltler
OH	: Organik killer
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
ROC	: Alıcı İşletim karakteristiği
SC	: Killi kumlar
Shalstab	: Shallow landsliding stability model
SM	: Siltli kumlar
SYM	: Sayısal yükseklik modeli
TNİ	: Topoğrafik nemlilik indeksi
UU	: Konsolidasyonsuz-drenajsız direkt kesme deneyi
V	: Örnek hacmi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş ve Amaç

Ülkemizi depremlerden sonra en çok etkileyen doğa olayı heyelanlardır. Tetikleyici faktörleri kimi bölgede depremler iken, kimi bölgede şiddetli yağışlar olmaktadır. Afetlerin meydana gelmeden önce, olası zarar ve kayıpların en aza indirgenmesi son derece önemlidir. Heyelan, kaya düşmesi, moloz akması vb. kütle hareketlerinin önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalara sık rastlanmaktadır. Ülkemizde Karadeniz Bölgesi, özellikle Doğu Karadeniz Bölümünde bu tür kütle hareketleri sıklıkla görülmektedir. Aşırı yağışlara bağlı olarak gelişen kütleli şev yenilmeleri bölgede ciddi boyutlu can ve mal kayıplarına sebep olmuş ve olmaya da devam etmektedir. Çalışma alanı olan Trabzon ili, Beşikdüzü ilçesi bahsedilen olaylara örnek oluşturan bir bölgedir. Şimdiye kadar meydana gelen yağış tetiklemeli heyelanlara yönelik çalışmalar (Baltacı vd., 2010; Akçalı, 2011; Akçalı ve Arman, 2013) yapılmış olsa da sonuçların uygulamaya aktarılmasındaki eksiklikler nedeniyle, bu tezde önerilen metodların bölge için önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmaların birçoğunda heyelan duyarlılık değerlendirmeleri orta ölçekli (1:25.000-1:50.000) ve genellikle rastgele bir alan seçilerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerin su toplama havzası ölçeğinde gerçekleştirilmesinin, sürecin meydana gelme nedenlerini daha iyi anlamak adına önemli olduğu da görülmektedir. Böylece daha detaylı veri toplanarak meydana gelebilecek sürecin daha etkin yönetimi de sağlanabilecektir.

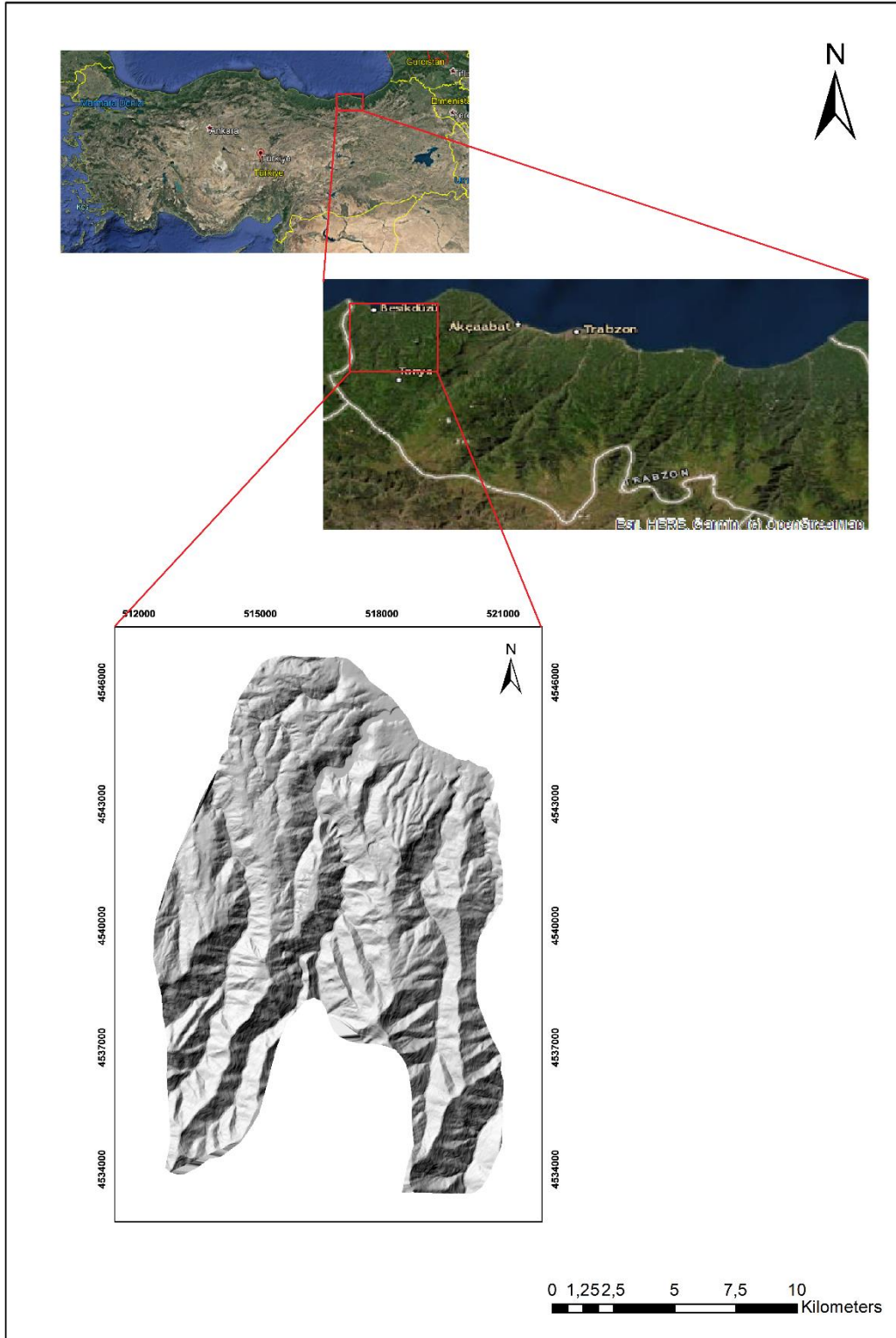
21 Eylül 2016 tarihinde Trabzon ili, Beşikdüzü ilçesinde aşırı yağışlar sonucu çok sayıda heyelan ve sel olayı meydana gelmiş, bunun sonucunda ciddi boyutlarda can ve mal kayıpları ortaya çıkmıştır. Bölge olarak benzer süreçlere oldukça duyarlı olan ve olay sayısı bakımından Türkiye’de ön sırada yer alan Karadeniz Bölgesinin Doğu Karadeniz Bölümü’nde bugüne kadar birçok araştırmacı tarafından heyelanlara ilişkin duyarlılık, tehlike ve risk değerlendirmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Akgün ve Bulut, 2007; Akgün vd., 2008; Nefeslioğlu vd., 2011; Dağ ve Bulut, 2012; Kavzoğlu vd., 2014). Yapılan bu çalışmaların tamamı olasılıksal yaklaşıma dayanan modellerle gerçekleştirilmiş olup fiziksel veriye dayalı bir yaklaşım kullanılmamıştır. Bu kapsamda bölgede yapılan ilk fiziksel veriye dayalı heyelan duyarlılık değerlendirmesi Akgün ve Erkan (2016) tarafından

gerçekleştirilmiştir. Keleş ve Nefeslioğlu (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışma bölgede yapılan fiziksel model tabanlı duyarlılık çalışmasına güncel bir örnek oluşturmaktadır.

Bu noktadan hareketle, yukarıda sözü edilen tarihte meydana gelen akma ve sığ kayma olayları sonrasında çalışma alanı olarak Beşikdüzü ilçesi seçilmiş ve alanda fiziksel ve olasılıksal modellere dayalı duyarlılık değerlendirmeleri yapılmıştır. Hazırlanan duyarlılık haritalarından sonra yağış verileriyle birlikte 1, 2, 5, 10 ve 20 yıllık aşma süreleri ve alan özeli için belirlenen alansal büyüklük meydana gelebilirliği değerleri için tehlike haritaları hazırlanmıştır.

1.2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Trabzon ilinin en batısında bulunan Beşikdüzü ilçesidir (şekil 1.1). Doğusunda Vakfıkebir, batısında Giresun'un Eynesil ilçesi, güneyinde şalpazarı ve Tonya ilçeleri yer alıp kuzeyi Karadeniz'e sınırdır. $41^{\circ}02'58''K$ ve $39^{\circ}14'07''D$ koordinatları arasında, 1:25.000 lekli F42d3 ve G42a2 paftaları olmak üzere iki adet topoğrafik harita üzerinde yer almaktadır. 121 km^2 'lik alansal yzlmne sahiptir. Karadeniz iklimine sahip ilçede her mevsim yağış mevcuttur. En sıcak ay ortalama 22, en soğuk ay ortalama 6 derecedir. Alan %60-70 dolaylarında nem oranına sahiptir (URL-1, 2020).



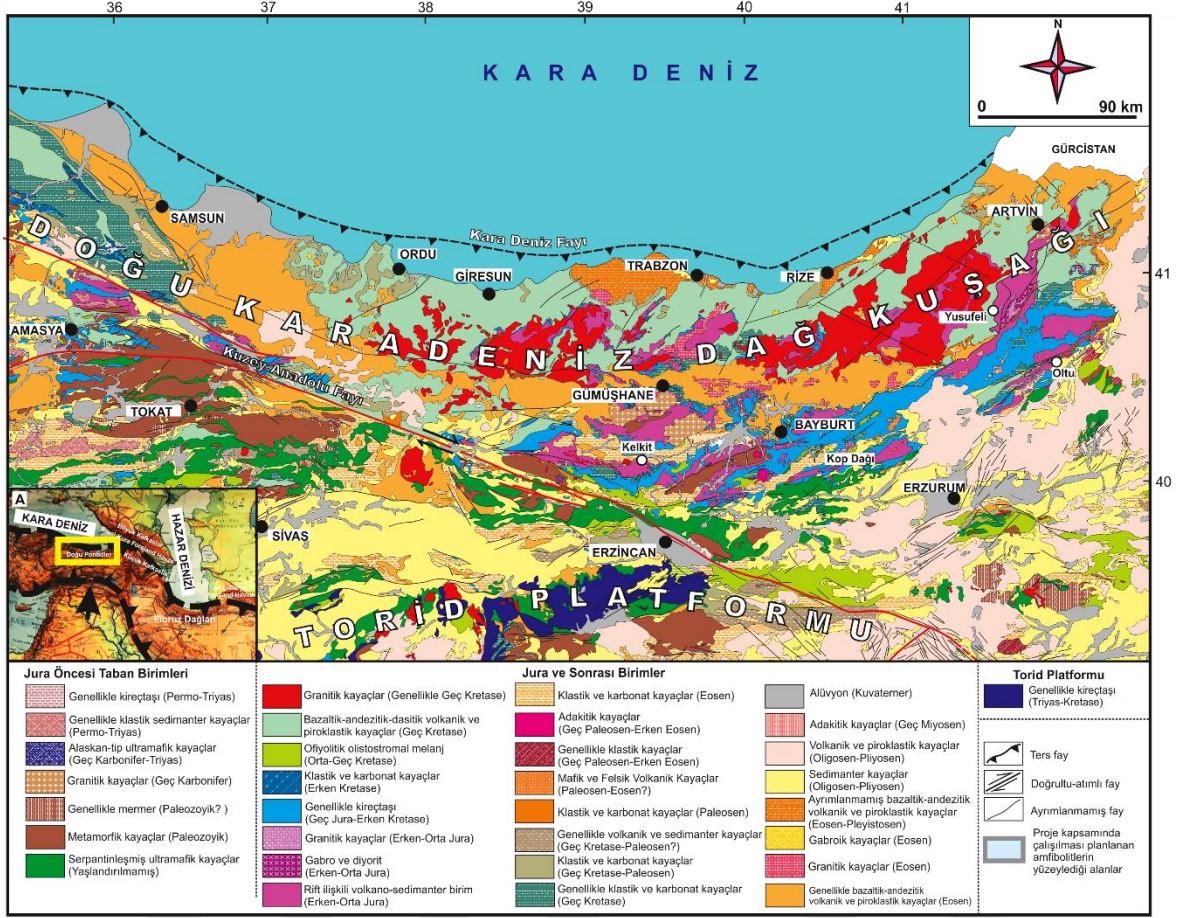
Şekil 1.1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası

1.3. Çalışma Alanının Jeolojisi

İnceleme alanı, Doğu Pontid tektonik birliğinin kuzey doğusunda bulunmaktadır. Doğu Pontidler, yapısal ve litolojik özellikler açısından Kuzey ve Güney Zon olarak iki bölgeye ayrılmıştır (Ketin, 1966). Kuzey Zon, Geç Kretase ve Orta Miyosen yaşlı volkanik ve piroklastik kayalardan, Güney Zon ise Geç Kretase öncesi tortul birimlerden meydana gelmektedir. Çalışma alanı, Kuzey Zon'da yer almaktadır (Şekil 1.2).

Bölge, Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalardan oluşmaktadır ve bunlar gnays, meta bazalt, mikaşist, kuvars-klorit şistten meydana gelen temel kayalardır (Ketin, 1951). Doğu Karadeniz Bölümü'nde bulunan kayalar (özellikle volkanitler) yüzeyden itibaren ayrışmaya başladığı için birçok yerde killeşmiştir (Tarhan, 1992). Bol feldispat mineralli volkanitler su ile temas ettiğinde saf kile dönüşür ve yerinde killeşme (rezidüel zemin) oluşur (Pekcan, 1996). Söz konusu bu rezidüel zeminlerin yaygın olduğu alanlarda ise sıklıkla toprak akması türünde kütle hareketleri görülür.

Beşikdüzü ilçesinde yüzeylenen litolojik birimlere bakıldığında, genel olarak bazalt ve andezit türündeki volkano-klastik birimler görülmektedir. Heyelanlar söz konusu bu volkano-klastik birimler içinde görülmektedir.



Şekil 1.2. Doğu Karadeniz Bölgesi Jeoloji Haritası (MTA tarafından hazırlanan 1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritasından değiştirilmiştir; Bektaş vd., 1995, Eyuboglu vd., 2006)

1.4. Kütle Hareketleri ve Heyelan

Yerçekimi etkisiyle yamaç malzemesinin eğim yönünde hareketi “kütle hareketleri” olarak tanımlanmıştır (Monroe ve Wicander, 2007). “Heyelan” kavramı Varnes (1958) tarafından doğal kaya, toprak, yapay dolgular veya bu malzemelerin kombinasyonlarından oluşan eğim oluşturan malzemelerin aşağı ve dışa doğru hareketi, Katz ve Aharonov (2006) tarafından ise; yer çekimi kuvvetleri, artan gözenek basınçları ve sismik olarak tetiklenen kayma gerilmeleri eğim kuvvetini aştığında ortaya çıkan yamaç malzemesinin aşağı doğru hareketi olarak ifade edilmiştir.

1.5. Kütle Hareketlerini Etkileyen Faktörler

- Jeolojik Faktörler; Yamaç altındaki kayalar şev ile aynı yönde eğimliyse kütle hareketleri daha kolay gerçekleşir (Monroe ve Wicander, 2007). Çatlaklı yapı, çatlakların su ile dolması/donması/erimesi, dengeyi bozarak kütle hareketlerine sebep olur. Kayaç tanelerinin de harekete etkisi vardır. Örneğin köşeli taneler, içsel sürtünme açısı, sıkışabilirlik ve boşluk oranını artırırken basınç direncini azaltır. Kireçtaşı, jips ve dolomit gibi kayaçların erimesiyle çökme, oturma, kayma gibi hareketler gelişir (Canik, 1997).
- Şev Açısı; Şev açısının artması şevi duraysız hale getirerek kütle hareketlerini hızlandırır. Nehir ve dalga etkisiyle şevin altının oyulması, kazı ve inşaat çalışmaları eğimin değişmesine sebep olabilir (Monroe ve Wicander, 2007).
- Bitki Örtüsü; Derin köklü bitkiler gözenek ve çatlaklarda bulunan suyu aldığı için kohezyonu azaltır, böylece kütle hareketlerine engel olur. Ağaç gövdelerinin çok fazla büyümesi yamaca ek yük bindirir ve hareketi sebep olabilir. Bu sebeple derin köklü, gövdesi az büyüyen bitkiler hareketi önlemede tercih edilir (Canik, 1997).
- Su İçeriği; Şiddetli yağış veya kar erimesi sonucu zemin ya da kayada su miktarının artması, yamaca ek yük yapacağı için kütle hareketine sebep olabilir (Monroe ve Wicander, 2007).
- İklim Koşulları; Sıcaklık ve yağış kütle hareketlerini etkileyen faktörlerdir. Yağış suları süreksizlerin arasına dolarak ayrışmaya sebep olur. Kohezyon ve içsel sürtünme direncinin azalmasıyla hareketler kütle hareketleri gerçekleşir. Sıcaklık değişimleri ile kayaçların genleşmesi ve büzülmesi sebebiyle parçalanır (Canik, 1997).
- Aşırı Yüklemeler; Ek ağırlık kesme dayanımını azaltarak, şev ve yamaçlardaki malzemesini zayıflatır. Böylece malzeme içindeki su basıncı artar ve harekete sebep olur (Monroe ve Wicander, 2007). İnşaat dolgu çalışmaları da malzeme yükünü arttıran bir diğer faktördür.
- Titreşimler; Depremler, volkanik olaylar, patlamalar, gürültülü gök gürlemeleri heyelanı tetiklemeye sebep olabilir (Monroe ve Wicander, 2007).

1.6. Heyelan Duyarlılık Haritalaması

Heyelan duyarlılığı; yerel arazinin jeolojik, morfolojik ve çevresel şartlarına göre bir alanda heyelanların mekânsal olarak meydana gelme olasılığıdır (Clark vd., 1984). Duyarlılık çalışmalarında heyelan envanter analizi, jeomorfolojik haritalama, sezgisel yaklaşımlar, fiziksel tabanlı sayısal modellemeler, istatistiksel sınıflandırma gibi birçok yöntem önerilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999; Guzzetti vd., 1999).

Duyarlılık haritalaması nitel ve nicel olarak iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999). Nitel yöntemler; jeomorfolojik gözlemler veya parametre haritalarının kullanılmasını temel alır. Nicel yöntemlerde ise; arazi verileri belirli bilgisayar programları ile analiz edilir ve uzmanlar tarafından sonuçlar değerlendirilir. Nicel yöntemlerde istatistiksel analizler, matematiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır (Aleotti ve Chowdhury, 1999).

1.7. Heyelan Tehlike Haritalaması

Heyelan tehlikesi; belirli bir süre içinde, belirli bir alanda zarar verici güce sahip heyelanın yaşanması olasılığıdır (Varnes, 1984). Heyelan tehlike haritalaması çalışmalarında, detaylı envanter haritaları önemlidir. Heyelana sebep olan hazırlayıcı ve tetikleyici faktörlerin, mekânsal dağılımları incelenmelidir. Tetikleyici faktörler ve heyelan oluş zamanı arasındaki ilişki açık bir şekilde ortaya konmalıdır (Sooters ve Van Westen, 1996). Tehlike haritaları arazi kullanımı ve mühendislik çalışmalarındaki planlamalar için oldukça önem arz etmektedir (Jones, 1992).

Heyelan tehlike haritalarının hazırlanabilmesi için sırasıyla heyelan envanter ve duyarlılık haritalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Envanter haritaları, bir alanda fark edilebilir özellikler bırakan tüm heyelanların konumunu gösteren, meydana gelme tarihi ve hareket türü hakkında bilgiler de verebilen haritalardır (Hansen, 1984; Wiczorec, 1984). Bu haritaların hazırlanması için çeşitli yöntemler mevcuttur (Guzzetti, 2006). Çalışmanın amacı, temel haritaların ölçeği, uydu görüntüleri ve hava fotoğraflarının kalitesi, araştırmacıların deneyimi ve yeteneklerine uygun bir veya birkaç yöntem birlikte kullanılabilir (Guzzetti vd., 2000; Van Westen vd., 2006).

1.8. Önceki Çalışmalar

1.8.1. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları

Çan vd. (2005), Batı Karadeniz Bölgesi'nde 3 farklı havza için yoğun yağış ile tetiklenen sığ toprak akması duyarlılık değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Mayıs 1998'de ekstrem yağış ile meydana gelen heyelanlar neticesinde 10 can kaybı ve sosyal ekonomik yıkımlar yaşanmış, gelecekte de bu şekilde yağışlar olabileceğini düşünerek yaptıkları çalışmada lojistik regresyon yöntemini kullanmışlardır. 1/25.000 ölçekli sayısal yükseklik modeli ve girdi parametreleri olarak eğim, bakı, jeoloji, orman ve plan eğrilik haritaları kullanılmıştır. Yağış verileri analiz edilmiş, 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritalarda toprak akmalarının nokta olarak gösterilebilmesi sebebiyle benzersiz koşul birimleri kullanılmıştır. Elde edilen duyarlılık değerlendirmesi sonucu yükseklik, bakı, yüzey oranı, eğim aralığı gibi topoğrafi faktörlerin ve bitki örtüsü gibi arazi kullanım faktörlerinin çalışma alanı için toprak akmaları üzerinde anlamlı parametreler olduğu ortaya konmuştur.

Deb ve El- Kadi (2009), Oahu'nun (Hawaii, Amerika Birleşik Devletleri) doğu-güney bölgelerinde SINMAP fiziksel modeli ile heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bölge aşırı yağış almaktadır. USGS'den temin edilen 1/24.000 ölçekli topoğrafik haritadan 10 m çözünürlüklü dijital yükseklik modeli oluşturulmuştur. Model için gerekli parametreler olan zemin yoğunluk değerleri, kohezyon, içsel sürtünme açısı, R/T (geçirgenlik oranı) elde edilmiştir. Heyelan envanter haritası oluşturabilmek için 1949-2006 yılları arasındaki yağış süreçleri incelenmiştir. Yayın arşivleri, hava fotoğrafları, USGS raporlarından yararlanılmıştır. Bu şekilde toplam 226 heyelan haritalanmıştır. SINMAP ile elde duyarlılık haritası, var olan bir moloz akması tehlike haritası ile kıyaslanarak doğrulama yapılmıştır. Model çıktısının meydana gelecek hareketlerin risklerini azaltmak için yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

Akgün ve Türk (2010) Ayvalık (Balıkesir) ve çevresinin iki ve çok değişkenli istatistiksel yöntemler ve sezgisel yöntem ile heyelan duyarlılık haritalarını üretip karşılaştırmışlardır. Alanda hakim litoloji çökeller, magmatik ve metamorfik kayalardır. 1995 yılının 1/35.000 ölçekli hava fotoğrafları, 15 m çözünürlüklü 2004 yılının uydu görüntüsü kullanılarak ve detaylı arazi çalışmalarıyla 45 heyelan haritalanmıştır. CBS ortamında jeolojik, morfolojik, arazi kullanım verileri hazırlanmış olup eğim, bakı, akarsu

güç indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, litoloji, ayrışma, drenaj ağından uzaklık, süreksizlikler, arazi ve bitki örtüsü yoğunluğu faktörleri değerlendirilmiştir. Benzerlik oranı, lojistik regresyon ve analitik hiyerarşi yöntemleriyle tüm bu faktörlerin heyelan oluşumundaki rolü araştırılarak parametrelerin ağırlık değerleri ortaya konmuştur. Tüm yöntemler neticesinde elde edilen duyarlılık haritaları eğri altında kalan alan (EAA) metoduyla doğruluk değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Bölgeye ait en başarılı metodun 0.76 EAA ile lojistik regresyona ait olduğu sonucuna varılmıştır.

Akıncı vd. (2010) Samsun il merkezinin, olasılık yöntemlerinden biri olan frekans oranı metoduyla heyelan duyarlılık haritasını üretmişlerdir. Öncelikle 1/25.000 ölçekli topoğrafik haritanın sayısallaştırılmasından sonra sayısal yükseklik modelinin üretilmesiyle birlikte model için gerekli olan ikincil topoğrafik veriler elde edilmiştir. MTA'dan temin edilen yine aynı ölçekli sayısal heyelan envanter haritası ve jeoloji haritalarından faydalanılmıştır. Toplam 61 heyelan haritalanmış olup, eğitim ve test heyelanları olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritası, heyelan envanter haritası ile karşılaştırılarak tutarlılığı kontrol edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen duyarlılık haritasında “yüksek” ve “çok yüksek” duyarlı sınıflarda yer alan alanların kontrol edilen heyelanlar ile %72,9 uygun olduğu görülmüştür.

Akgün (2012) lojistik regresyon, çok kriterli karar ve olasılık oranı yöntemleri ile üretilen heyelan duyarlılık haritalarını karşılaştırmıştır. Çalışma alanı İzmir ili ve çevresidir. Eğim, bakı, litoloji, yol, drenaj hatları ve faylar girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Modelleme ve doğrulama aşamasından önce heyelanlar eğitim ve sınama olarak iki gruba ayrılmıştır. Üç model ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritalarının eğri altında kalan alan (EAA) yöntemiyle doğrulamaları yapılmıştır. Lojistik regresyon yöntemi için 0.810, olasılık oranı yöntemi için 0.764, çok kriterli karar verme yöntemi için 0.710 EAA değerleri elde edilmiştir. Çalışılan arazi için en iyi metodların lojistik regresyon ve olasılık oranı yöntemleri ile hazırlanan duyarlılık haritalarının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Davis ve Blesius (2015) San Pedro Creek (Pacifica, CA, ABD) Eyaletinde heyelan duyarlılık haritalaması yaptıkları çalışmalarında, fiziksel tabanlı modellerden olan “Stability Index MAPping” (SINMAP) ile MaxEnt'i birleştiren hibrid bir yaklaşımı kullanmışlardır. Alanda hakim jeoloji, bir yakınsak levha sınırında biriken deniz çökelleridir. Sağ yanal Pilarcitos fayı ile Jura/Kretase yaşlı Franciscan grovak, serpantinit, melanaj, kireçtaşı, yeşil taşı kuzeyde birleşmiştir. Paleosen denizel sedimanter kayalar, kıyı şeridi boyunca türbidit yataklar dahil güneye yayılmıştır. Bölgede aşınmış anakaya, farklı

kalınlıkta mollisoller, vadi dolgusu, kolüviyaller, yamaç molozu görülmektedir. Arazinin dik olması ve zayıf ana kayanın bir arada bulunmasıyla artan yağışlar kaymalara neden olmaktadır. Heyelanlar 26° - 45° eğimli alanlarda görülmektedir. Bölgedeki heyelan tehlikesini arttıran etken kentleşmedir. Havzanın heyelan envanteri için arşiv araştırması, hava fotoğrafları yorumlaması ve saha çalışmaları yapılmıştır. Değerlendirilen çevresel faktörler yüzey jeolojisi, akarsu ve yollara uzaklık, bitki örtüsü, eğim, yüksekliğin eğrilik türevleridir. ABD Jeolojik Araştırma Kurumu'ndan alınan LIDAR 3 m, fotogrametrik konturlardan 10 m çözünürlüklü yükseklik verileri elde edilmiştir. Hibrid heyelan duyarlılık modeli zemin, yükseklik ve yüzey jeolojisi verilerini kullanan duraylılık indeksinin türetilmesiyle başlamaktadır. Geçirgenlik ve zemin kalınlığı, zemin ve kolüviyal kalınlığından türetilmiştir. Çalışmanın sonucunda, envanterdeki kaymalar, SINMAP ile çoğunlukla duraysız tahmin edilmiştir. Stabilite indeksinin 1.0'dan düşük olan alanlardaki heyelan tahminlerinin çoğu önceden oluşturulmuş heyelan envanter haritalarında görülmüştür. Diğer faktörler ile beraber SINMAP ve Hibrid modelden elde edilen stabilite indeks verileri, maksimum entropi modeli boyunca analiz edilmektedir. Kolüviyal yatakları üzerinde oldukça heyelan görülmüştür.

Nery ve Vieira (2015)'nin çalışmalarının amacı Serra do Mar'da yaşanan Ocak 1985'teki olaydan etkilenen drenaj havzasında sığ heyelanlara duraylılık incelemesidir. Bu amaçla çalışmada SINMAP matematiksel modeli uygulanmıştır. Yaşanan olayda 48 saat içinde 380 mm yağış görülmüştür. Alanı oluşturan litoloji Prekambriyen metamorfik ve volkanik kayalar, granit, migmatit, mikaşist ve gnayslardır. Eğim, bakı, eğrilik ve hipsometrik özellikler, 1/10.000 ölçekli 2 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modelinden türetilmiştir. Ulusal Uzay Araştırmaları Enstitüsü'nden (INPE) 1/25.000 ölçekli ortofotolar kullanılarak 1985 yılında meydana gelen heyelanlar haritalanmıştır. SINMAP modeli için gereken jeoteknik ve hidrolojik veriler daha önce bölgede Wolle ve Carvalho (1994), Amaral (2007), Mendes (2008)'in yapmış oldukları çalışmalardan alınmıştır. Yerinde ve laboratuvarında test edilen veriler zemin içerisindeki infiltrasyon dinamiği ve alanda görülen sığ heyelanlardaki rolü değerlendirilmiştir. Bu bilgilerden ve T/R oranlarından yola çıkarak her parametrenin 1, 1,5 ve 3,5 m zemin kalınlıklarına göre ilişkisi 32 şekilde simüle edilmiştir. T/R oranı modelin en hassas parametresidir. Havzaya ait jeoteknik özellikler çalışmada kullanılmamasına rağmen SINMAP modelinden Ocak 1985'te yaşanan heyelanların %90'ını tahmin ederek olumlu sonuçlar alınmıştır. Bu yüzden bu model ve

benzer modellerin oldukça büyük kayıp ve hasarlara neden olan Serra do Mar'daki sığ heyelanların tahmininde önemli bir yere sahip olduğu düşünülmektedir.

Pfeil McCullough vd. (2015) Pittsburgh, PA'da bulunan dişbudak ağaçlarının kaybının bölgedeki heyelan duyarlılığı üzerine etkisini araştırmışlar ve problemi önlemek adına araçlar geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada SINMAP modeli örtü kayıp senaryoları ile birleştirilerek konumsal bir model inşa edilmiştir. Dişbudak ağacı konumsal dağılımları Monte Carlo metodları ve mevcut bitki örtüsü verileri yardımıyla elde edilmiştir. Çalışma alanı olan Pittsburgh, Pennsylvania yerel jeoloji ve topoğrafyası nedeniyle heyelanlara meyillidir. iTree Ekosistem Analizi ve Veri (Davey Kaynak Grubu, 2012) ve Doğal Alanlar Çalışması (NAS) (Biohabitats 2010) ile dişbudak ağaçlarının Pittsburgh kent ormanında konumsal dağılımları ve oranları ortaya konmuştur. 10 m çözünürlükle sayısal yükseklik modelinden yararlanılmıştır. (Ulusal Yükseklik Veriseti, 2003). Zemine ait parametrelerin hepsi ulusal bir zemin veri tabanı'ndan (SSURGO; Soil Survey of Allegheny County) kullanılmıştır. Uniform rasgele rasterlerden seçici piksel kaldırma metodu sayesinde ağaç kayıp senaryoları yaratılmıştır. Modelden elde edilen konumsal değişkenliğin önemini ve senaryo tahminlerinin belirsizliğini değerlendirmek amacıyla bir Monte Carlo analizi yürütülmüştür. Orijinal sonuçlar ile Monte Carlo sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak kentsel örtüdeki dişbudak ağaçlarının kayıplarının artmasıyla beraber yamaç stabilitesi azalmıştır. SINMAP için gerekli parametreler doğal coğrafi konumsal değişime duyarlı değildir ve dişbudak ağaçlarının rasgele seçilerek kaldırılması neticesinde bile sonuçlar tutarlıdır.

Okalp ve Akgün (2016) coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla Türkiye'nin ulusal ölçekte heyelan duyarlılık haritasını hazırlamışlardır. Türkiye'nin 1/2.000.000 ölçekli, 500 x 500 m çözünürlüklü bir heyelan duyarlılık haritasını üretmek için eğim, engebe, yağış, litoloji, arazi kullanımı, deprensellik parametrelerini ve LSI (landslide susceptibility index) metodunu kullanmışlardır. Her faktör için ağırlıkları belirlenmiştir. Faktörlerin değişkenliğini tespit etmek için uzman görüşüne başvurulmuştur. Nihai harita 5 duyarlılık sınıfına ayrılmıştır. Sedimanter kayaçların yer aldığı, yağışın fazla ve sismik aktivitenin olduğu batı ve orta Karadeniz Bölgesi yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarında yer almaktadır.

Son vd. (2016) Güney Kore'nin Seul şehrinde heyelan duyarlılık çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada coğrafi bilgi sistemleriyle etki yarıçapı ve istatistiksel analiz modeli kullanmışlardır. İstatistiksel analizde topoğrafya, arazi ve orman özellikleri

ve arazi örtüsü gibi parametreler kullanılmıştır. Etki yarıçapıyla heyelan olasılığı tahmini ve heyelan duyarlılık indeksi (LSI) üretmek için frekans oranı (FO) yöntemi kullanılmıştır. Her bir etki yarıçapı için, 30 m aralıklı 0'dan 300 m'ye kadar heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Uygun etki yarıçapı içinde istatistiksel anomalilerin azalan büyümeye bağlı olarak artan FR indeks değerleri gözlenmiştir. FR değerleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Doğrulama aşamasında göreceli işletme faaliyeti eğrisi (AUC) altında kalan alan ile ölçülerek optimum etki yarıçapı belirlenmiştir.

Wu vd. (2016) Çin'in Gansu Bölgesi'nde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Frekans Oranı (FO), İstatistiksel İndeks (SI) ve Kesinlik Faktörü (CF) modelleri yardımıyla heyelan duyarlılık haritalaması yapılmıştır. Literatür, hava fotoğrafları ve arazi çalışmaları aracılığıyla toplam 328 heyelan tespit edilerek heyelan envanter haritası hazırlanmıştır. Rasgele seçilen %70 heyelan modelleme için, %30'u test için kullanılmıştır. Eğim, yükseklik, plan ve profil eğriliği, yamaç yönelimi, faylara-yollara-nehirlere uzaklık, yağış, NDVI, arazi kullanımı ve litoloji gibi parametreler 3 model için de kullanılarak heyelan duyarlılık haritaları üretilmiş, eğri altında kalan alan (AUC) analiziyle doğrulukları karşılaştırılmıştır. Üç yöntemle hazırlanan haritaların doğruluk değerleri birbirine çok yakın olup %75 civarındadır. Aralarında en yüksek değer SI modeline aittir. Çalışma alanının 5 sınıfa ayrılmasıyla (Çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek duyarlı) üretilen heyelan duyarlılık haritalarının olası tehlikeleri azaltmak için yarar sağlayacağı belirtilmiştir.

Akgün (2018) heyelanların sık yaşandığı Trabzon ili Tonya ilçesinde daha önce kullanılmamış olan bulanık uyarlanabilir rezonans teorisi yöntemini kullanarak heyelan duyarlılık haritası üretmiştir. Arazi dik yamaçlı, litolojik açıdan ayrılmış çoğunlukla volkanik ve volkano-klastik birimlerden oluşmaktadır. Litoloji, yükseklik, eğim, bakı, topoğrafik nemlilik indeksi ve akarsu güç indeksi parametrelerinden yararlanılmıştır. Sahanın Harita Genel Komutanlığı tarafından 1/25.000 ölçekli hazırlanan topoğrafik haritası sayısallaştırılarak, 25 m çözünürlüklü sayısal yükseklik verisi oluşturulmuştur. Bağımlı değişken olarak heyelan envanter verisi kullanılmıştır. Hazırlayıcı parametrelerin frekans oranı değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerden her parametrenin alt sınıflarına duyarlılık sınıfları oluşturulmuştur. Elde edilen sınıflar BURT yönteminde eğitim parametreleri olarak kullanılarak, her parametreye ait duyarlılık haritası üretilmiştir. Daha sonra bütün duyarlılık haritaları incelenerek alanın tek bir duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Bu haritanın doğruluk analizinin yapılabilmesi için eğri altında kalan alan (ROC-EAA)

yöntemi uygulanmıştır. Uygulama sonunda 0,72 EAA değeri ile elde edilen heyelan duyarlılık haritasının başarılı bir tahmine ulaştığı görülmektedir.

Şahin (2018) Karabük ilinin Yenice ilçesinde heyelan duyarlılık haritalaması çalışmasında optimum faktör modelini belirleyerek, değişik yöntemler ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritalarındaki rolünü araştırmıştır. Optimum faktör modelinin belirlenmesinde adımsal regresyon yöntemini tercih etmiştir. Duyarlılık haritalarının hazırlanması aşamasında rastgele orman (RO) ve lojistik regresyon (LR) yöntemleri seçilmiştir. Elde edilen duyarlılık haritalarının güvenilirliği kappa ve EAA değerlerine bakılmıştır. Optimum model ve diğer metodlar ile hazırlanan haritalar ROC eğrisi ve McNemar's testi ile istatistiksel olarak incelenmiştir. Adımsal regresyon ve rastgele orman yöntemleriyle oluşturulan optimum faktörün verdiği sonuç, lojistik regresyon modelinin verdiği sonuçtan %8 daha başarılı olduğu görülmüştür.

Keleş ve Nefeslioğlu (2021) Rize'nin Güneysu Havzası'nda yaptıkları heyelan duyarlılık çalışmasında SINMAP matematiksel modelini kullanmışlardır. Çalışma sahasında toplam 455 adet sığ heyelan haritalanmıştır. Modelin ihtiyacı olan heyelanlı alanlara ilişkin mekanik ve hidrolojik özellikler için örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmış, jeofizik araştırmalar da gerçekleştirilmiştir. Rezidüel toprak seviyelerinin farklı yüzdelerde infiltrasyon kapasitelerine sahip olabilecekleri düşünülerek modeller üretilmiştir. Üretilen modellerin ortalama doğruluk değerinin %96,7 olduğu ortaya konmuştur.

1.8.2. Heyelan Tehlike Çalışmaları

Guzzetti vd. (2005), İtalya'nın Kuzey Bölgesi'nde heyelan tehlike değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Heyelanların meydana geleceği yerler, boyutları ve ne zaman olacağına dair bir model üzerinde çalışmışlardır. Envanter haritası oluşturmak için yorumlanan hava fotoğrafları 1955-99 yıllarına aittir. Yapısal, litolojik, morfolojik ve arazi kullanımı etmenleri dikkate alınarak ayırma analizi aracılığıyla heyelanların konumsal olasılıkları hesaplanmıştır. Heyelanların tekrarlanma periyotları belirlendikten sonra, aynı periyotların tekrarlanacağı kabul edilerek Poisson modeli ile farklı zamanlarda gerçekleşme olasılıkları bulunmuştur. Modelin alan için uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Neupane ve Piantanakulchai (2006), Himalayalar ve Doğu Nepal Siwalik Tepeleri için heyelan tehlike çalışması gerçekleştirmişlerdir. Muson iklimiyle, oldukça büyük erozyonu ile beraber hızlı ve sarsıntılı bir yükselişe sahip Himalayalar, bölgenin jeodinamiğini göstermektedir. Dünyanın en genç büyük dağ sistemidir. Çalışmada çoklu karar verme metodlarından Analitik Ağ Süreci (ANP)'ni kullanmışlardır. Eğim, bakı, litoloji, kanal mesafesi, arazi kullanımı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Parametrelerin her biri için ağırlıkları hesaplanmıştır. Metodun ağırlık belirleyerek çalışması, öznel yorumlardan kaynaklı hataları minimize etmektedir. Model tehlike değerlendirmesinde başarıyla uygulanmıştır.

Fourniadis vd. (2007) Çin'in Wushan-Badong Bölgesi'nde heyelan tehlike çalışmalarını uzaktan algılama verisiyle ASTER uydu görüntüleri kullanarak gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Bu uydu görüntüleri yardımıyla heyelan parametreleri üretilmiştir. Eğim, drenaj ağlarına ve tektonik hatlara uzaklık gibi parametreler arazi çalışmalarıyla elde edilmiştir. Tehlike arz eden bölgelerin sınıflandırılmasında geometrik ortalama bazlı çoklu tanımlama ve belirleme (çıkarma/karakterizasyon) modelinden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmada jeoteknik verilerin birçoğunun eksik olmasına rağmen, yüksek derecede tehlikeli tespit edilen alanlar ile şev yenilmeleri arasında tutarlı bir ilişki olduğu görülmektedir. ASTER uydu görüntüleriyle heyelan tehlike çalışmalarının bölgesel ölçekte olumlu sonuç verdiği belirtilmiştir.

Pradhan ve Lee (2007) Yapay sinir ağları yöntemini kullanarak heyelan tehlike analizi üzerine çalışmışlardır. Çalışma alanları Malezya'nın Selangor Bölgesi'dir. Litoloji, topoğrafya ve yağış verileri kullanılmıştır. Uydu görüntüleri yardımıyla arazi ve bitki örtüsü, çizgisellik verileri elde edilmiştir. Arazi çalışmaları ve hava fotoğrafları ile heyelanlar belirlenmiştir. Elde edilen tüm veriler coğrafi bilgi sistemleri aracılığıyla işlenmiştir. Kullanılan faktörlerin ağırlığı eğitilmiş geri yayılma yöntemiyle ortaya konmuştur. Elde edilen haritanın doğruluğu için heyelan yerleriyle kontroller yapılmış, yüksek bir doğruluk gözlenmiştir. Kullanılan heyelan parametreleri arasında eğimin diğer parametrelere göre daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmanın bölgenin genel planlaması için uygun olduğu, tüm bölgeye uygulanabilmesi için daha çok heyelan verisine ve çalışma alanına ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Corominas ve Moya (2008) çalışmalarında istatistiksel bir yaklaşımla heyelan tehlike değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Heyelanların tekrarlanma aralığı tetikleyicileri ile birlikte hesaba katılmıştır. Büyüklük- sıklık ilişkisi göz önüne alınmıştır. Bu ilişki ile

yapılan tehlike değerlendirmesi büyük bir avantaj sağlamaktadır. Heyelan kaynağı için duraylılık çalışmalarına ihtiyaç duyulmadan doğrudan tehlike değerlendirmesi yapılabilmektedir. M/f eğrilerinin (M; büyüklük, f; frekans) ekstrapolasyonunun dikkatli yapılması gerektiğini, vurgulamışlardır. Heyelan alanları veya tetikleyici parametrenin analiz edilmesiyle frekans temelli tehlike değerlendirilmesi gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Dahal vd. (2008) Nepal'in Himalaya Kathmandu Vadisi'nde gerçekleştirdikleri heyelan tehlike değerlendirmesinde coğrafi bilgi sistemlerini kullanmışlardır. Kanıt ağırlık modelinin yordayıcı gücünü incelemeyi amaçlamışlardır. Bölgedeki heyelanların tetikleyicisi aşırı günlük yağışlardır. Kullanılan tüm parametreler cbs ortamında 1/10.000 ölçekli olarak hazırlanmıştır. 2002 yılında meydana gelen aşırı yağışlardan sonra ve önceki yıllara ait hazırlanan iki tür envanter haritası mevcuttur. Nihai haritada yeni ve eski heyelan tehlike değerleri bir araya getirilerek %88,4 tutarlı oranda heyelan oluşumları belirlenmiştir.

Pradhan (2010) bu çalışmasında uzaktan algılama ve CBS yardımıyla Malezya'nın Cameron, Selangor ve Penang bölgelerinde heyelan tehlike değerlendirmesi yapmıştır. Mantıksal regresyon metodunun çapraz doğrulama yöntemini kullanmıştır. Uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları ile heyelanlar belirlenmiş, arazi çalışmalarıyla kontrolleri yapılmıştır. Eğim, baki, eğrisellik,... gibi kullanılan parametrelerin mantıksal regresyon katsayıları belirlenmiştir. Model doğruluğu için elde edilen sonuçlar, saha çalışmalarıyla belirlenen yerler ile mukayese edilmiştir. Mevcut olan geçmiş yağış kayıtları sayesinde  bölge için de iyi bir değerlendirme yapılmış, sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

Nefeslioğlu vd. (2011), Rize ilinin Çayeli ilçesinin güneyindeki Büyükköy havzasında sığ heyelanlar için tehlike değerlendirmesinde bulunmuşlardır. Envanter aşamasında 1955-2007 yılları arasında meydana gelmiş 251 sığ heyelan haritalanmıştır. Sonrasında havzadaki koşullandırma faktörleri değerlendirilmiş, duyarlılık çalışması için yapay sinir ağları yöntemi kullanılmıştır. Yükseklik, eğim eğişimi, eğim eğriliği, yıllık güneş radyasyonu ve topoğrafik hidroloji faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Heyelan başlangıcını tanımlamak için "rnekleme dairesi" yaklaşımı önerilmiştir. Eğitim ve test veri setleriyle yapılan değerlendirme sonucu performanslarının çok yüksek olduğu görülmüştür. Heyelanların oluşum sıklığının değişimi ve vaka büyüklüğünün zamanla arttığı ortaya konmuştur. Hidrolojik parametrelerden olan akarsu güç indeksi ve sediment taşıma indekslerinin örnekleme çemberinin yarıçapı artışına fazlasıyla tepki verdiği sonucuna

varılmıştır. 33 yıllık yağış verilerinin analiziyle 1, 2, 5, 10, 50 ve 100 yıllık tehlike haritaları elde edilmiştir.

Hadji vd. (2013) Cezayir'in Souk Ahras bölgesi'nde heyelan tehlike çalışması yapmışlardır. Coğrafi bilgi sistemleri tabanında olasılıksal metodlardan mantıksal regresyon metodu kullanılmıştır. Yağış tetiklemeli olarak meydana gelen heyelanlar için, aylık yağış verileri (1981-2011), iklim faktörü, jeolojik ve topoğrafik parametreler dikkate alınmıştır. Hava fotoğrafları ve arazi çalışmalarıyla belirlenen heyelanların dairesel, düzlemsel ve karışık hareketli olarak gerçekleşmiş olduğu gözlemlenmiştir. Zamansal olarak sınıflandırılan toplam 603 heyelanın aylık yağış verileriyle ilişkisi incelenmiştir. İnceleme neticesinde aralarında ilişkinin kuvvetli olduğu görülmüştür. Heyelanlar ile diğer parametreler arasında da aynı bağ tespit edilmiştir. Sayısal yükseklik modelinden türetilen ikincil topoğrafik verilere ek olarak nehirler, yollar ve ormanlık alanlar da belirlenerek her biri için oranları hesaplanıp veri katmanları oluşturulmuştur. LR yöntemi ile yapılan değerlendirme sonucu, elde edilen tehlike haritasının doğruluğu %79 olduğu, çalışma bölgesinin kuzey tarafının daha yüksek tehlike sınıfında yer aldığı görülmüştür. Jeoteknik özellikler ve yer altı suyu durumunun çalışmaya eklenerek daha kapsamlı hale getirilebileceği vurgulanmıştır.

Luca vd. (2014) moloz akmalara yönelik tehlike değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Jeolojik-jeomorfolojik arazi çalışması ve istatistiksel analiz ile birleştirilmiş sayısal simülasyonlar kullanılmıştır. Çalışma bölgeleri İtalya'nın Sorrento bölgesidir. Duyarlılık değerlendirmesinde eğim vd. parametreler ile birlikte piroklastik örtü kalınlığının heyelanların sıklığı ile ilişkisi incelenmiştir. Çalışmada SCIDDICA hücreli otomat heyelan modeli kullanılmıştır. Benzer ölçek ve türdeki önceki vakalardan hareketle model kalibrasyonu yapılmıştır. Heyelan tehlike haritalaması her senaryonun konumsal, zamansal ve büyüklük olasılık ilişkileri gözetilerek gerçekleştirilmiştir.

Lee vd. (2015) Güney Kore'nin Deokeokri ve Karisanri bölgelerinde lojistik regresyon yöntemini kullanarak coğrafi bilgi sistemleri aracılığıyla heyelan tehlike değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. 1/50.000 ölçekli topoğrafik haritalardan 5 m hücre boyutlu sayısal yükseklik modeli oluşturulmuş, ikincil topoğrafik veriler üretilmiştir. Zemin drenajı-materyali-kalınlığı-dokusu, ağaç yaşı-çapı-tipi-yoğunluğu ve jeoloji, ikincil topoğrafik veriler ile kullanılan diğer verilerdir. Yağış olasılıkları için Gumbel dağılımı kullanılmıştır. Bölgedeki heyelanların günlük 202 mm veya 3 günlük 449 mm'lik yağışların

sebepe olduğu düşünülerek belirli yıllık periyotlar için olasılıklar hesaplanmıştır. Lojistik regresyon analizi sonucu 3 günlük 449 mm'lik yağışın doğruluğu daha yüksek çıkmıştır.

Yi-min vd.'nin (2015) çalışmalarının temel amacı Çin'in Shaanxi Bölgesindeki Yan'an şehrinde belirsiz Naive Bayesian ve NBU algoritmasına dayalı sınıflandırma metodları ile heyelan konumsal modellerinin yordayıcı gücünü değerlendirmektir. Eğim, yükseklik, bakı, morfoloji ve kaya/zemin yapısı, NDVI ve yağış parametreleri değerlendirilmiştir. 25 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli ve SPOT-5 uydu görüntüleri kullanılarak tehlike haritası elde edilmiştir. Haritalanan toplam 293 heyelanın bir kısmı eğitim bir kısmı test amaçlı kullanılmıştır. Çalışma bölgesinde 293 heyelandan 196'sı eğitim, 97'si sınaama verisi olarak analize sokulmuştur. Eğri altında kalan alan metoduna göre kesinlik sonuçları NBU metodu için %87,29, NB metoduna göre %82,47'dir. Yağış tetiklemeli heyelan çalışmalarında NBU algoritması ile değerlendirme yapılmasının olumlu sonuçlar gösterdiği kanısına varılmıştır.

Bourenane vd. (2016) Cezayir'in Constantine şehrinde heyelanların çok sık görülmesinden dolayı bölgedeki riskleri azaltmak amacıyla heyelan tehlike haritası hazırlanması gerektiğini düşünmüşlerdir. Çalışmalarında; lojistik regresyon, analitik hiyerarşi, ağırlık faktörü, kanıt ağırlığı ve frekans oranı metodlarını kullanmışlardır. Öncelikle şehrin 1/10.000 ölçekli heyelan envanter haritası hazırlanmıştır. Bunun için literatür, hava fotoğrafları ve uydu görüntülerinden faydalanılarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Eğim, bakı, litoloji, yağış, fay-drenaj-yola uzaklık, arazi kullanımı parametreleri dikkate alınmış, heyelan tehlike haritası elde edilmiştir. Kullanılan yöntemlerin performans değerlendirmesi Alıcı işletim karakteristik eğrisi ile yapılmıştır. Frekans oranı yönteminin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Tüm modellerin şehir için iyi bir sonuç gösterdiği ortaya konmuştur.

Razifard vd. (2019) İran'da 12 Ağustos 2012 yılında $M_w=6.4$ ve $M_w=6.2$ olan ikiz Ahar-Varzeghan depremlerinin tetiklediği heyelanlar neticesiyle, bulanık mantık metodu kullanarak bölgede heyelan tehlike çalışması gerçekleştirmişlerdir. Şev duraysızlık haritası ile gerçekleştirilen saha çalışmalarında 9 kayma ve 47 kayma düşmesi olayı gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bulanık mantık yöntemi için eğim, yer kuvvet sınıfı, normalleştirilmiş fark bitki örtüsü ve nem indeksleri, sarsıntı yoğunluğu, yollara ve nehirlere uzaklık parametreleri değerlendirilmiştir. Kullanılan çeşitli bulanık operatörler arasında bulanık birlik operatörünün doğruluğunun daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tekin (2019) Göksu Nehri havzasının jeomorfometrik analizi ile birlikte olası heyelan tehlikesini değerlendirmiştir. Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı çalışma 1/25.000 ölçeklidir. Havzada 559 adet heyelan, 240 farklı bölgede kaya düşmesi haritalanmıştır. Duyarlılık çalışmasında yapay sinir ağları, mantıksal regresyon ve karar ağaç yöntemlerini kullanmıştır. Elde edilen duyarlılık haritalarının doğruluk değerlendirmeleri için Başarı-Tahmin ve Alıcı işletim karakteristik eğrisi altında kalan alan yöntemleri kullanılmıştır. En yüksek doğruluk Mantıksal regresyon yöntemi ile elde edildiği için tehlike değerlendirmesinde altlık olarak seçilmiştir. Alansal ve zamansal olabilirlik parametreleri kesikli ve sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonları ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak; 0.05, 0.20 ve 0.50 km²'lik alanlardan daha büyük heyelanların 1, 5, 10, 25, 50 ve 100 yıllık zaman aralıklarında aşılma olasılıklarını gösteren tehlike haritaları üretilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Öncelikle alanda daha önce meydana gelmiş heyelanlara ait çok zamanlı bir envanter verisi üretilmiştir. Bu verinin üretilmesi için literatürde birçok yöntem yer almaktadır (Guzetti vd., 2012). Hava fotoğrafları ve dijital uydu görüntüleri bu yöntemlerin başında gelmektedir. İki yöntemin de faydaları ile birlikte birtakım kısıtları da bulunmaktadır. Alana ait yeterli sayıda görüntü olmaması, alana ait hava fotoğrafı veya uydu görüntüsünün büyük ölçüde bulutluluk içermesiyle yorum yapılmasının zorlaşması, alandaki kütleli yenilme boyutları ile hava fotoğrafı veya uydu görüntüsü mekânsal çözünürlüklerinin uyum sağlamaması, alanda meydana gelecek hızlı arazi örtüsü değişimleri vb. bu kısıtlar arasında yer almaktadır. Bu husus nedeniyle, çalışma alanının 2000 ile 2018 yılları arasını kapsayan ve farklı tarihlerde çekilmiş Google Earth uydu görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntüler üzerinden görsel yorumlama ve ekran sayısallaştırma yöntemleri ile çok zamanlı bir envanter verisi üretilmiştir. Envanter haritası üretildikten sonra arazi çalışmaları ile denetlenmiştir. Bölgede yaşayan halk ile görüşmeler yapılarak, tespit edilen kütleli yenilmenin tam oluşma zamanı (gün, ay, yıl, saat) belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen çok zamanlı envanter bilgileri hem eşik yağış değerlerinin belirlenmesinde, hem de duyarlılık haritalarının hazırlanmasında baz veri teşkil etmesiyle çalışmadan sağlıklı sonuçlar elde edilmesi noktasında oldukça önemli olarak kabul edilmektedir.

Kütleli yenilmelerin meydana gelme anlarına karşılık gelecek zamanlardaki yağış değerleri süre (saat, gün, hafta) ve miktar (mm) olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Yağış verileri temin edildikten sonra yağış-frekans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Gerek fiziksel modele dayalı gerekse de olasılıksal duyarlılık değerlendirmelerindeki en önemli parametrelerin başında sayısal yükseklik modeli (SYM) gelmektedir. Bu modelin mekansal çözünürlük noktasındaki kalitesi, kurulacak diğer modellerin de kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle SYM modelinin oluşturulması için 1:25.000 ölçeğinde sayısal topoğrafik haritalar kullanılmıştır. Söz konusu haritalar Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Oluşturulan SYM'den itibaren ikincil topoğrafik veriler olan yamaç eğimi, yamaç yönelimi (bakı), akarsu güç indeksi (AGİ), topoğrafik nemlilik indeksi (TNİ), plan ve profil yamaç eğriselliği parametreleri üretilmiştir. Üretilen bu haritalar ArcGIS 10.6.1 coğrafi bilgi sistemleri yazılımı kullanılarak raster veri formatında

ve 10 m konumsal çözünürlüğe sahip olarak elde edilmiştir. Alanda yapılan detay arazi çalışmaları ile MTA Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 1:25.000 ölçeğindeki jeoloji haritası üzerinde litolojik birimler yerinde gözlenmiştir.

Elde edilen heyelan envanter verisinden itibaren alandaki yamaç birimlerinin duyarlılık durumlarını belirlemek amacıyla fiziksel veriye dayalı Shalstab matematiksel modeli ile olasılıksal modeller olan Lojistik Regresyon (LR) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) yöntemleri kullanılmıştır.

2.1. Shalstab Matematiksel Modeli

Sonsuz şev ve kararlı hidrolojik modellerin birleşimine dayalı bir matematiksel modeldir (Dietrich ve Montgomery, 1998). SYM üzerinden yükseklik, eğim, drenaj ağı verilerinin değerlendirilmesiyle duraylılık sınıfları belirlenmektedir.

Kütlesel yenilme gelişimi için gerekli olan doyumluk miktarını sonuçlayan h/z (doygun zemin tabakası) değeri anlamında Eşitlik 1'in çözümü yapılmaktadır:

$$h/z = \delta_s/\delta_w (1-\tan\theta/\tan\phi) + c/\cos^2\theta \tan\phi \delta_w g z \quad (1)$$

Eşitlik 1'in bir yamaca uygulanmasıyla mutlak duraysız ve mutlak duraylı koşullar ortaya çıkarılır. Birinci durum, h/z 'nin 0'a eşitlenmesi (su tablasının var olmaması) durumunda meydana gelir ve zemin parametreleri arasındaki ilişki yüksek eğimin olumsuz etkisini telafi edemez. İkinci koşul ise h/z 'nin 1'e eşit olması durumunda (tamamen doyumluk durumu) meydana gelir ve zemin parametreleri arasındaki ilişki eğimin etkisi azaltılmaktadır. Mutlak duraysızlık ve duraylılık koşulları oluşmadığı zaman kısmi zemin doyumluğu şev yenilmesine öncülük eder. Bu nedenle sonsuz şev ve kararlı hidrolojik modelleri aşağıda verildiği şekilde birleştirilir:

$$q a/T b \sin\theta = \delta_s/\delta_w (1-\tan\theta/\tan\phi) + c/\cos^2\theta \tan\phi \delta_w g z \quad (2)$$

Bu denklemin q ve T parametrelerine göre modifikasyonu ile Shalstab modelinin nihai formülü üretilmektedir:

$$q/T = b/a \sin\theta [\delta_s/\delta_w (1 - \tan\theta/\tan\phi) + c/\cos^2\theta \tan\phi \delta_w g z] \quad (3)$$

Shalstab modelinin kullanımında gerekli parametreler kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ), kuru yoğunluk (δ_s) ve toplam zemin kalınlığı (z)'dir. Diğer değişkenler olan yamaç drenaj alanı (a), kontur uzunluğu (b) ve yamaç eğimi (θ) ise sayısal yükseklik modeli üzerinden belirlenmektedir. Dolayısıyla, Shalstab modeli alanı, duraysızlığın sağlanması için gerekli hidrolojik oran (q/T) değerinin bir fonksiyonu olarak sınıflamaktadır. Bu anlamda yedi duraysızlık sınıfı belirlenmekte ve en uç sınıflar-mutlak duraysız ve mutlak duraylı- ve bunlar arasında q/T'nin bir fonksiyonu olarak diğer beş sınıf ortaya çıkmaktadır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Shalstab matematiksel modelinde elde edilen duraylılık sınıflarının gösterimi (Michel vd., 2014)

Duraylılık Sınıfları
Mutlak duraysız
$\log q/T < -3.1$
$-3.1 > \log q/T > -2.8$
$-2.8 > \log q/T > -2.5$
$-2.5 > \log q/T > -2.2$
$\log q/T > -2.2$
Mutlak duraylı

Alınan örselenmiş zemin numuneleri ile yıkamalı elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri deneyleri yapılarak zemin türleri "Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS)"ne göre tespit edilmiş (ASTM D2487-11, 2011), zemin türlerine karşılık gelen geçirimsizlik (permeabilite) katsayıları belirlenmiştir. Permeabilite katsayısı (K) (m/s) kullanılarak T (Transmisibilite) değerleri hesaplanmıştır. Söz konusu bu hesaplanan değer, eşitlik 4'te sunulmuştur.

$$T = K * z \quad (4)$$

Burada K değerinin birimi (m/gün) olarak alınmış olup, z değeri ortalama zemin profili kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Shalstab modeli ile üretilen heyelan duyarlılık haritası için açık kaynak kodlu bir yazılım olan SAGA GIS programının 2.3.2 versiyonu (Conrad vd. 2015) kullanılmıştır. Shalstab yardımıyla üretilen model çıktılarından elde edilen duyarlılık sınıfları (7 sınıf), LR ve DVM yöntemleri ile elde edilen duyarlılık sınıflarıyla karşılaştırılabilir duyarlılık sınıf sayılarına (çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde 5 sınıf olacak şekilde) göre yeniden sınıflandırılmıştır. Bu amaçla, Akgün ve Erkan (2016)'da önerilen yaklaşım kullanılmıştır.

Sözü edilen Shalstab modelinde kullanılan fiziksel parametreler laboratuvar deneyleri yardımıyla belirlenmiştir. Deneyler, üretilen duyarlılık haritalarının çakıştırılması ile tüm haritalardan ortak olarak “yüksek” ve “çok yüksek” duyarlı alanlar içinde yer alacak yamaç birimlerinden temsil edici sayıda örneklem noktasından alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Uygulamalı Jeoloji laboratuvarında mevcut deney olanaklarından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir.

Zeminlerin kayma dayanımı parametreleri olan c ve ϕ değerleri için ASTM D3080/D3080M – 11 (2011) deney standardına göre konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) direkt kesme deneyinden yararlanılmıştır. Arazideki zemin koşullarında konsolidasyon yaratacak bir durum olmaması ve zemin suyunun drenajına olanak kalmaması nedeniyle UU deneyinin seçilmesi uygun görülmüştür.

2.2. Lojistik Regresyon (LR) Yöntemi

Bağımlı bir değişken ile bağımsız birçok değişken arasında çok değişkenli bir regresyon ilişkisi kuran istatistiksel bir yöntemdir (Lee, 2005). Lojistik Regresyon yönteminin heyelan duyarlılık haritalaması çalışmalarında amacı, bir heyelan varlığı veya yokluğu, bağımlı değişken ve eğim, litoloji vb. bir dizi bağımsız parametre arasındaki ilişkiyi tanımlamak için en uygun modeli bulmaktır (Ayalew ve Yamagishi 2005).

Sayısal olarak, meydana geliş ve bunun birçok değişken üzerindeki bağımlılığı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Hosmer ve Lemeshow, 1989):

$$p = \frac{1}{(1+e^{-z})} \quad (5)$$

Burada “p” olayın (heyelan) meydana gelme olasılığını ifade etmektedir. Olasılık, 0’dan 1’e değişen S-şekilli bir eğri biçiminde olup, “z” doğrusal kombinasyonu göstermektedir. Lojistik regresyon, aşağıdaki biçimde gösterilen bir denklem içerir ve bu denklem yukarıda verilen z değerine karşılık gelir:

$$z = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (6)$$

Burada “ b_0 ” modelin sabiti, b_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) değerleri lojistik regresyon modelinin eğim katsayıları, x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) değerleri ise bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. Bu oluşturulan lineer model, heyelanın bağımsız değişkenler üzerindeki (meydana geliş öncesi koşullar) meydana geliş durumunu (var/yok) göstermektedir.

2.3. Destek Vektör Makineleri (DVM) Yöntemi

İstatistiksel teoriler üzerine kurulmuş bir makine öğrenmesi yöntemidir (Vapnik, 1995). Veri seti üzerinde ortalama hata karesini en aza indirgeyerek türetilen ampirik risk azaltma metodundan çok, istatistiksel öğrenme teorisindeki yapısal risk azaltma niteliğine yakın çalışmaktadır (Song, vd., 2002).

Eğitim setindeki tüm örneklerin bağımsız olması ve aynı şekilde dağıtılması yöntemin temel varsayımlarındandır. Fakat birçok pratik mühendislik uygulamasında eğitim verileri gürültü ile kirlenmektedir. Dahası, eğitim veri setindeki bazı örnekler kazayla yanlış tarafa yerleştirilebilir.

Bu durumda, standart DVM eğitim algoritması, karar sınırının optimal hiper düzlemden ciddi şekilde sapmasına neden olur, DVM gürültüye ve özellikle karar sınırına yakın olan aykırı değerlere çok duyarlıdır. Bu, standart DVM'nin artık seyrek olmamasına, aykırı değerler sebebiyle destek vektörlerinin sayısının oldukça artmasına neden olur (Song vd., 2002).

Destek vektör makinelerinde veriler lineer olarak ayrılacakları bir yapıda veya lineer olarak ayrılamayan yapıda olabilirler.

Doğrusal olmayan özellik uzayı: $x \in R^n$ gözlem vektörünü daha yüksek dereceden bir uzayda z vektörüne dönüştürerek, bu yeni uzayda doğrusal sınıflandırıcıları elde etmek söz konusu olabilir. Bu z vektörünün yer aldığı özellik uzayı F ile gösterilsin.

Bu durumda \emptyset ifadesi $R^n > R^F$ eşlemesini yapmak üzere $z = \emptyset(x)$ biçiminde ifade edilebilir (Yakut, 2012).

$$x \in R^n \rightarrow z(x) = [a_1, \phi_1(x), \dots, a_n, \phi_n(x)]^T \in R^F \quad (7)$$

2.4. Fiziksel Tabanlı Model İçin Verilerin Hazırlanması

Fiziksel tabanlı model için arazi çalışmalarıyla toplam 11 heyelan noktasından örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Örselenmemiş numune alımı

2.4.1. Birim Yoğunluk Tayini

Araziden alınan örselenmemiş zemin örneklerinin birim yoğunlukları (Şekil 2.4) ASTM (D7263-09, 2018) standardına göre belirlenmiştir (ASTM genel olarak “yoğunluk” kavramını kullanmaktadır). Öncelikle $6*6*3 \text{ cm}^3$ ebadında örnek alıcılar ile numuneler tüpten çıkarılmış, doğal kütleleri tartılmıştır.

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (8)$$

δ : Yoğunluk

m: Örnek kütlesi

V: Örnek hacmi

Doğal yoğunlukları belirlenen örnekler, 105 °C’de 24 saat etüvde kurutularak kuru yoğunlukları hesaplanmıştır.

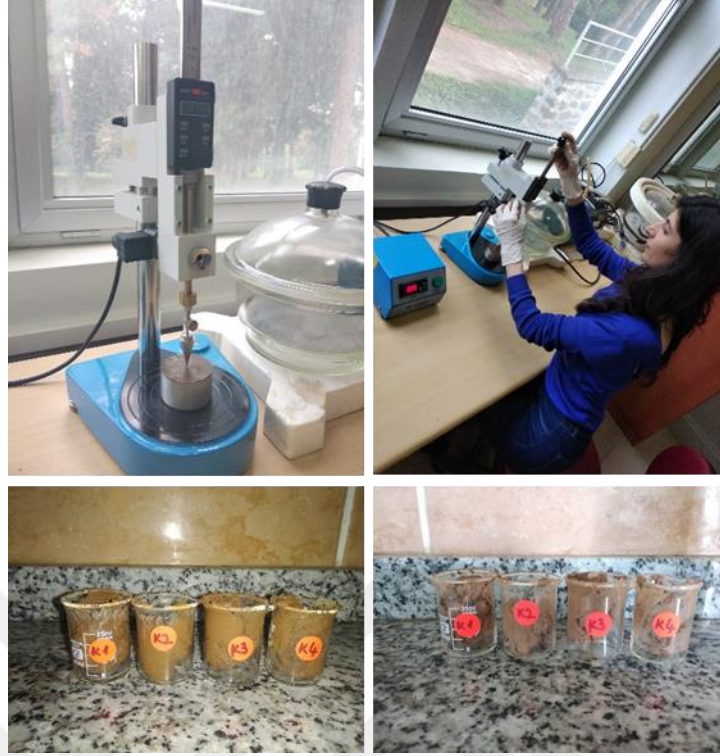


Şekil 2.4. a) Doğal numune b) Numunelerin etüvde kuruması c) Kuru numune

2.4.2. Kıvam Limitleri

2.4.2.1. Likit Limit Deneyi

Örselenmiş zemin örnekleri üzerinde British Standardı (BS 1377-2:4.3, 1990)’na göre “Düşen Koni Yöntemi (Penetrasyon)” uygulanmıştır. 40 nolu elekten geçen yaklaşık 200 g numune, su içerikleri arttırılarak (her seferinde yaklaşık 5-10 ml damıtılmış su kullanılarak) 4 kez tekrarlanmıştır. Koni en az 30 mm mesafeden 5 sn serbest düşmeye bırakılarak batma miktarları ölçülmüştür (Şekil 2.5). Su içerikleri ile birlikte bir doğru elde edilerek, 20 mm batma miktarına karşılık gelen su muhtevası değeri örneğin likit limit değerini vermektedir.



Şekil 2.5. Likit limit deneyi

2.4.2.2. Plastik Limit Deneyi

Örselenmiş zemin örnekleri ile plastik limit deneyi ASTM (D4318-17e1, 2017) standardına göre yapılmıştır. Likit limit deneyi için hazırlanmış zemin örneğinden yaklaşık 20 g alınarak bir miktar saf su katılarak, el ayası ile yaklaşık 3 mm çapına gelene kadar çatlama ve kopmaların başladığı ana kadar yuvarlanmıştır. Kırılma ve kopmaların başladığı noktada su içeriklerinin belirlenmesi için 6 g'dan az olmayacak şekilde cam kaplara toplanarak yaş ve etüvden sonraki kuru kütleleri tartılmıştır (Şekil 2.6). Aynı işlemler 3 kez tekrarlanmıştır. Su içeriklerinin ortalaması zemine ait plastik limit değeri vermektedir.



Şekil 2.6. Plastik limit deneyi

2.4.3. Yıkamalı Elek Analizi

Örselenmiş zemin örnekleri ile yıkamalı elek analizi ASTM (D422-63, 1998) standardına göre yapılmıştır. Yaklaşık 1 kg numune etüvde 105 °C’de 24 saat kurutulduktan sonra 500 g alınan örneğe 2 g sodyum hegzametaphosfat ve 1 lt saf su eklenerek 24 saat bekletilmiştir. Hazırlanan karışım elek setine aktarılarak alttan temiz su akana kadar yıkanmıştır. Elekler üzerinde kalan numuneler, elek numaralarına göre kaplara alınıp tekrar 105 °C’de 24 saat kurutulduktan sonra tartılmıştır (Şekil 2.7). Elek göz açıklığı ile birlikte kaydedilerek geçen yüzdeler hesaplanmış, granülometri eğrisi çizilmiştir.



Şekil 2.7. Yıkamalı elek analizi

2.4.4. Hidrometre Deneyi

Örselenmiş zemin ile ASTM (D422-63, 1998) standardına göre 200 nolu elek altında kalan malzemenin dane boyu analizi için yapılmıştır. Elek altına geçen malzeme etüvde kurutulduktan sonra 50 g alınarak üzerini örtecek şekilde saf su dökülüp 24 saat bekletilmiştir. Örneğin üzerine daha önceden 1 lt saf su ve 40 g sodyum hegzametapfosfat ile hazırlanmış solüsyondan 125 ml alınıp mikser yardımıyla yaklaşık 10 dk boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım mezürün içine alınıp, mezürün üstüne 1000 ml çizgisine gelene kadar saf su eklenmiştir. Okumalara başlamadan önce mezürün ağzı avuç ile kapatılıp çalkalanmış homojen bir karışım elde edilmiştir. Daha sonra 0.25, 0.5, 1, 2 dakikalarda hidrometre süspansiyondan çıkarılmadan okumalar alınmıştır. Daha sonraki okumalarda hidrometre her seferinde süspansiyona daldırılmıştır. Karışımın sıcaklığı ölçülerek, gerekli hidrometre okumaları ve düzeltmeleri yapılarak kaydedilmiştir (Şekil 2.8).

$$r = r_a - d \quad (9)$$

Burada,

r: Süspansiyondaki düzeltilmiş hidrometre okuması

r_a: Deney sırasında süspansiyondaki hidrometre okuması

d: Hidrometre düzeltme değeridir.

Elde edilen ölçüm değerleriyle dane çapı hesabı iki şekilde yapılır.

İlk 2 dakikadaki ölçümler için dane çapı hesabı Stokes kanununa göre sıvı içindeki serbest düşen bir kürenin hızı aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$V = \frac{(\gamma_s + \gamma_w) * 980}{30 * \mu} * D^2 \quad (10)$$

$$D = \sqrt{\frac{30 * \mu}{(\gamma_s - \gamma_w) * 980}} * \sqrt{\frac{Z_r}{t}} \quad (11)$$

2 dakikadan sonraki ölçümler için dane çapı hesabı;

$$D = \sqrt{\frac{30 * \mu}{(\gamma_s - \gamma_w) * 980}} * \sqrt{\frac{Z_r - \frac{V_H}{2 * A_j}}{t}} \quad (12)$$

D: Dane boyu (mm)

μ: Deney sıcaklığındaki suyun viskozitesi



Şekil 2.8. Hidrometre deneyi

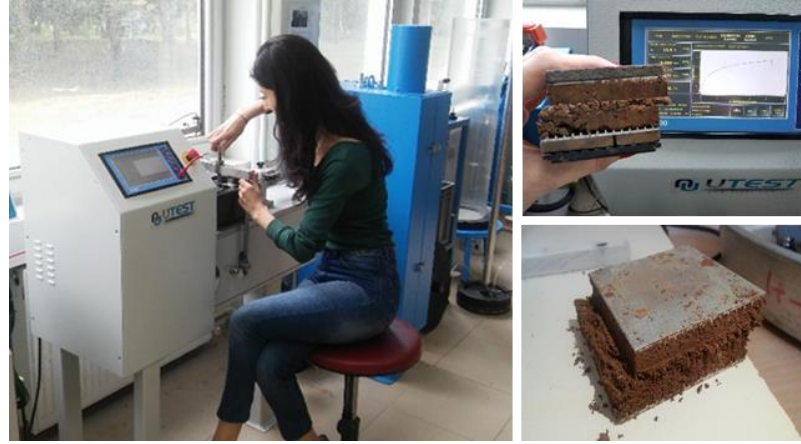
2.4.5. Kesme Kutusu Deneyi

Toplam 11 heyelan lokasyonundan alınan örselenmemiş zemin örneklerine ait kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kesme kutusu deneyi ASTM (D3080/D3080M-11, 2011) standardına göre konsolidasyonsuz- drenajsız (UU) olarak yapılmıştır.

Deney, sabit bir yük altında kesilmenin gerçekleştiği anda yük halkası ekranından okunan değer kesme kuvvetini verir. İşlem düşey yük artırılarak 3 kez tekrarlanmıştır. Okunan yük değerleri ile kayma gerilmesi değerleri belirlenmiştir.

Örneklerin oturmasına ve suyun çıkışına izin verilmeyen konsolidasyonsuz- drenajsız kesme kutusu deneyinde, örnekler hızlı kesilir.

Deney, farklı düşey yükler altında üç kez yapılmıştır. Cihazın 1, 2 ve 3 kg'lık yükler altında kayma gerilmeleri ekrandan okunup grafikler yardımıyla kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerine ulaşılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Kesme kutusu deneyi

2.5. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performansı

2.5.1. Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC)

Yapılan bir çalışmanın performansı açısından düzenlemek, seçmek ve görsel bir sunum yapmak için kullanılan araçtır. Çarpık sınıf dağılımı ve eşit olmayan sınıflandırma hatası maliyetlerine sahip alanlarda oldukça faydalı ve kullanışlıdır (Fawcett, 2006a). ROC yöntemini bir sınıflandırıcı ve bir dizi örnek ile açıklayacak olursak; örnekler dizisinin düzenlerini temsilen ikiye iki bir karışıklık matrisi kurulabilir. ROC grafiklerinde X ekseninde yer alan FP (yanlış pozitif) oranı “özgüllük” değerini, Y ekseninde yer alan TP (doğru pozitif) oranı ise “duyarlılık” değerini göstermektedir. Modelde sayısal olarak eğri altında kalan alan “EAA” hesaplanır (Fawcett, 2006b). EAA değerinin 1’e yakın olması model doğruluğunun mükemmel olduğunu, 0.5 ve daha küçük değerde olması kötü sonuç verdiğini göstermektedir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. ROC eğrisi modeli doğruluk sınıflaması (Hosmer vd., 2013)

Eğri altında kalan alan (EAA)	Model iyiliği
0,9	Mükemmel
0,8-0,9	Çok iyi
0,7-0,8	İyi
0,6-0,7	Ortalama

2.6. Zamansal Olabilirlik

Heyelan tehlike haritalarının oluşturulması aşamasında zamansal olabilirliğin belirlenmesi için heyelan tetikleyici faktörlerinin frekans analizlerinin yapılması gerekmektedir. Çalışma alanındaki heyelanların tetikleyicisi aşırı yağışlar olduğu için yağış frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme yapılabilmesi için bazı istatistiksel parametrelere ve olasılık fonksiyonlarının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Heyelanların zamansal olabilirliklerinin hesaplanmasında “kesikli olasılık fonksiyonları” yaygın olarak kullanılmaktadır (Çil, 2009; Tekin, 2019). Kesikli olasılık dağılımı, sayılabilir sayıda değer alabilen bir dağılımdır (Çınlar, 2011). Poisson, Binom, Bernoulli, Geometrik, Negatif Binom dağılımları bilinen kesikli olasılık dağılımlarıdır (Evans ve Rosenthal, 2010). Heyelanların zamansal olasılıklarının belirlenmesinde genellikle Poisson dağılımı kullanılmaktadır.

Poisson modeli, doğal olarak sürekli olan herhangi bir zamanda rastgele noktasal olayların (heyelanların) meydana gelmesiyle ortaya çıkar. Bu model bazı varsayımlar içermektedir. Bu varsayımlar;

- Ayrık zaman aralıklarında yaşanmış olay (heyelan) sayıları bağımsızdır.
- Çok kısa bir zaman aralığında gerçekleşmiş bir olayın (heyelanın) olasılığı zaman aralığının uzunluğu ile orantılıdır.
- Olay (heyelan) sayısının olasılık dağılımı, sabit uzunluktaki tüm zaman aralıkları için aynı kalmaktadır.

Poisson denklemi;

$$P(N(T) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{dir.} \quad (13)$$

λ : Olayların (heyelanların) oluşma oranı, n : olay (heyelan) sayısı, t : zaman.

$$P(N(t) \geq 1) = 1 - P(N(t) = 0) = 1 - e^{-\mu} \quad (14)$$

μ : gelecekte ortalama tekrarlanma aralığı

Tetikleyici faktörlerin tekrarlanma periyotları ise “sürekli olasılık fonksiyonları” ile hesaplanmaktadır (Crovelli, 2000). Olasılık yoğunluk fonksiyonu, örnek uzaydaki herhangi bir örnekteki değerin olabilen bir fonksiyondur (Grinstead ve Snell, 2009).

Öncelikle tetikleyici faktör verileri için frekans analizleri yapılarak hangi fonksiyonun daha uygun frekans dağılımı verdiği belirlenmelidir. Log Normal, Burr, Frechet, Gumbel, Log Gumbel, Pearson Tip III, Log Pearson Tip III, Gamma, Exponential gibi dağılımlar en çok kullanılan dağılımlar arasındadır (Çil, 2009; Tekin, 2019).

Çalışma kapsamında yağış verileri değerlendirmeleri neticesinde tüm dağılım sonuçları incelenmiş, bunlar arasındaki en uygun frekans dağılım modeli seçilmiştir.

2.6.1. Uygunluk Testi

Kolmogorov (1933) tarafından tek örnek sınaması olarak önerilen, daha sonra Smirnov (1939) tarafından iki bağımsız örnek sınaması olarak geliştirmiş olan Kolmogorov-Smirnov testi kullanılmıştır. Bu testin tercih edilmesinin sebebi χ^2 (Ki-kare) testi gibi beklenen frekansların 5'ten büyük olması istenmemektedir. Herhangi bir alt limit istenmediği için uygulanması daha kolaydır (Kartal, 1998).

2.7. Alansal Olabilirlik

Heyelanların alansal olabilirlikleri için hangi büyüklükte meydana geleceklerinin tahmininde frekans-büyüklik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bunun için heyelan envanter haritaları kullanılmaktadır.

Doğa olayları kimi durumda normal (Gauss) kimi durumda güç yasası dağılımı göstermektedir. Malamud vd. (1999) yaptıkları bir çalışmada güç yasası frekans-alan dağılımlarını, ölçek değişmezliği olarak açıklamışlardır. Belli bir ölçek gerektirmeyen tek dağılım kanaatine varılmıştır.

Heyelan frekans-alan istatistiklerini, heyelan envanterine dayanan bir güç yasası ile kuvvetli bir ilişki içinde olduğunu gösteren Guzzetti vd. (2002) güç yasası dağılımının çok çeşitli heyelan alanları için geçerli olduğu sonucuna varmışlardır.

Malamud vd. (2004) farklı bölgelerdeki heyelan envanterleri ile heyelanların sıklık-alan arasındaki ilişkiyi irdelemiş, olasılık yoğunluk fonksiyonunu tanımlamışlardır.

$$p(A_L) = \frac{1}{N_{LT}} \frac{\delta N_L}{\delta A_L} \quad (15)$$

Üç parametrelili ters gama olasılık dağılımı ile bu bölgelerdeki heyelan olasılık yoğunlukları arasındaki ilişki incelenmiştir.

$$p(A_L; \rho, a, s) = \frac{1}{a\Gamma(\rho)} \left[\frac{a}{A_L-s} \right]^{\rho+1} \exp\left[-\frac{a}{A_L-s} \right] \quad (16)$$

$\Gamma(\rho)$, ρ 'nin gama fonksiyonu

ρ , orta ve büyük alanlar için güç yasası azalışını kontrol eden parametre

a , maksimum olasılık değerini kontrol eder

s , küçük heyelan alanları için üstel azalmayı kontrol eder.

Söz konusu çalışmada üç parametrelili ters gama dağılımı kullanılmış, 300'den fazla istatistiksel dağılımın karşılaştırmalı testi en iyi uyumu göstermiştir. Eşitlik 19'un integralinin alınmasıyla belirli büyüklükteki heyelanın meydana gelme olasılığı hesaplanmaktadır.

$$PA_L \int_{aL}^{\infty} p(A_L; \rho, a, s) dA_L = \int_{aL}^{\infty} \frac{1}{a\Gamma(\rho)} \left[\frac{a}{A_L-s} \right]^{\rho+1} * \exp\left[-\frac{a}{A_L-s} \right] dA_L \quad (17)$$

Heyelanlar için uygun büyüklüğün,

$$mL = \log N_{LT} \quad (18)$$

Eşitliği ile hesaplandığını belirtmişlerdir (N_{LT} : Olaydaki toplam heyelan sayısı).

Nihai olarak frekans yoğunluğu;

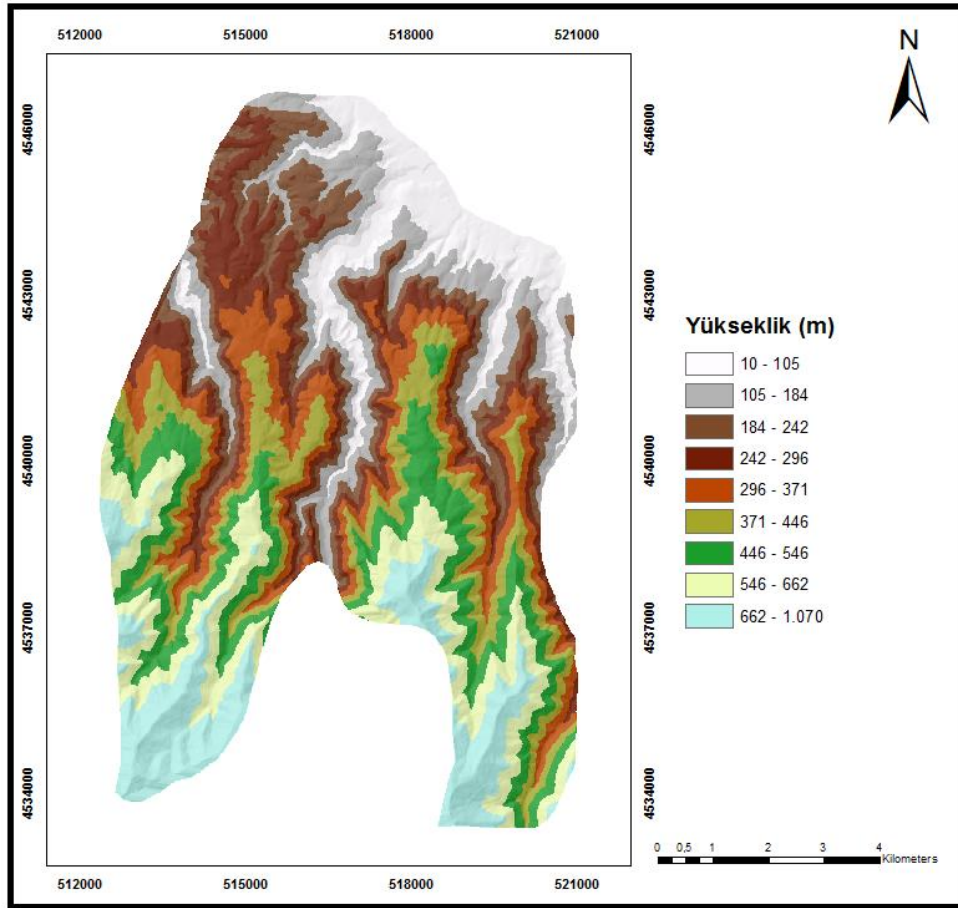
$$f(A_L) = \frac{\delta N_L}{\delta A_L} = N_{LT} p(A_L) \quad (19)$$

Eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

3. BULGULAR

3.1. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)

Çalışma alanında bir heyelan duyarlılık değerlendirmesi için ihtiyaç olan girdi parametreleri gerek arazi ve laboratuvar çalışmaları, gerekse mevcut veriler kullanılarak elde edilmiştir. İlk olarak, inceleme alanına ait 1:25.000 ölçekli ve Harita Genel Müdürlüğü tarafından üretilen sayısal topoğrafik haritalarından yararlanarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında 10 m mekânsal çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (SYM) üretilmiştir (Şekil 3.1). Çalışma alanında yükseklik 1070 m'ye varmaktadır.

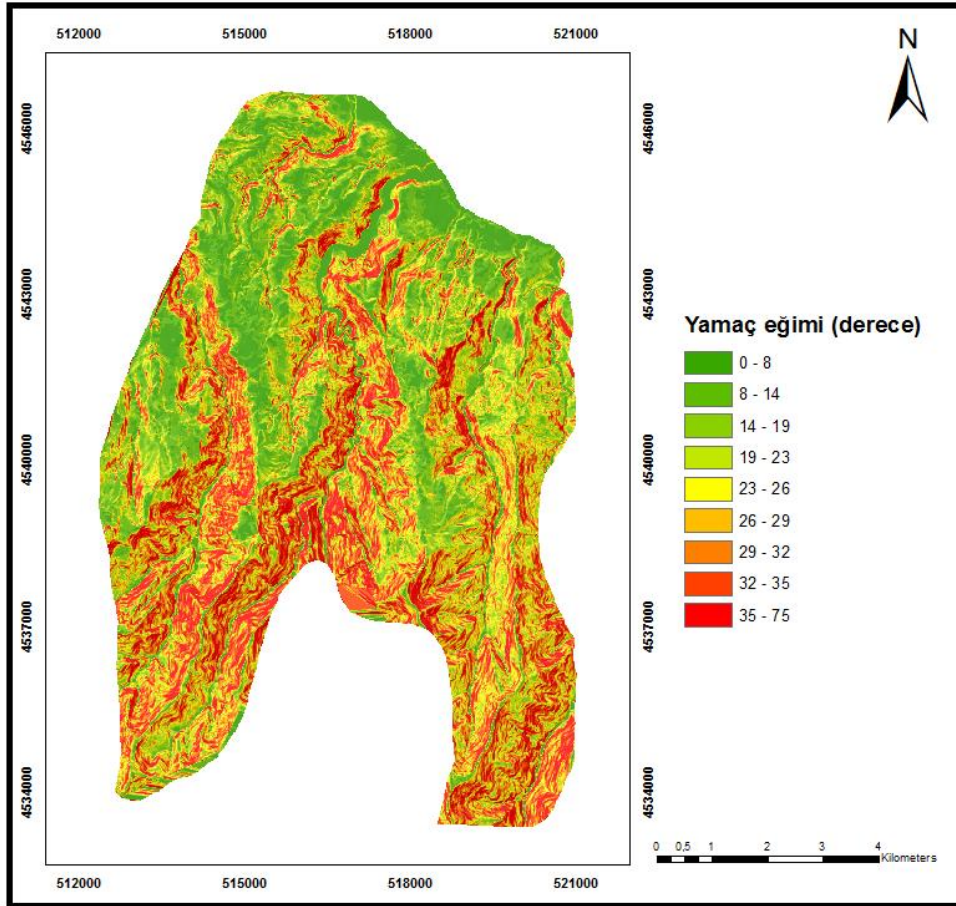


Şekil 3.1. Çalışma alanına ait sayısal yükseklik modeli

3.2. İkincil Topoğrafik Veriler

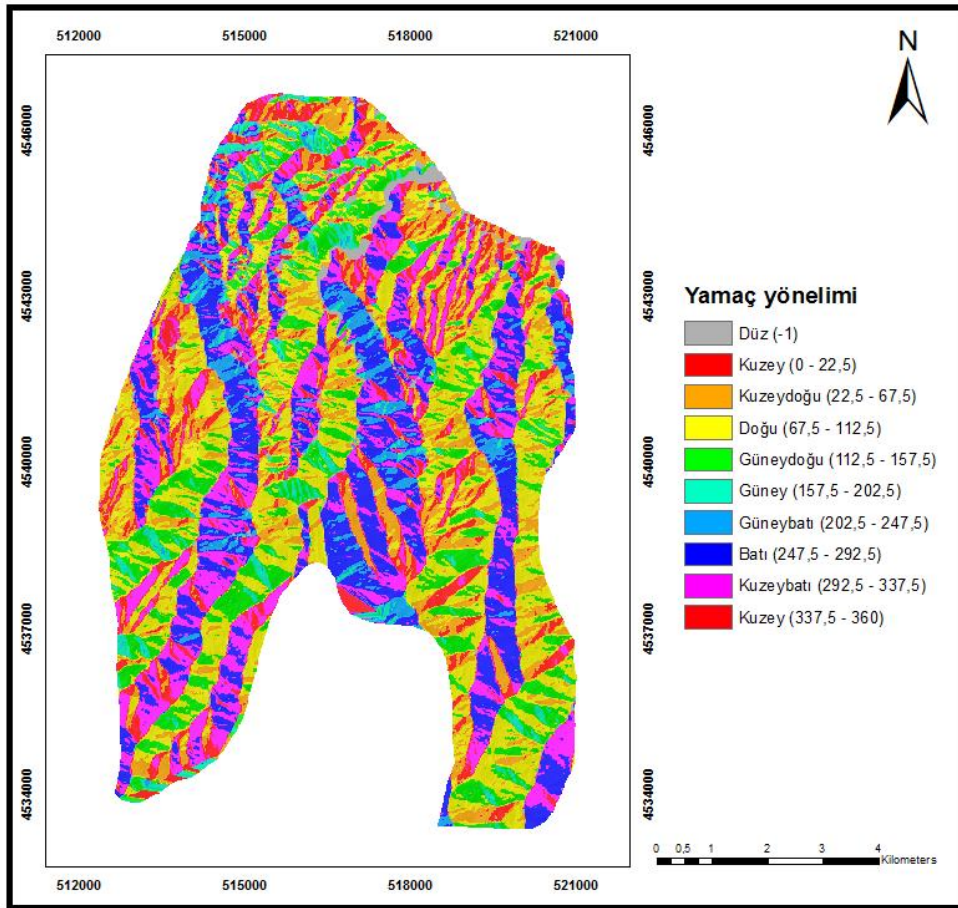
Sayısal yükseklik modelinden üretilen bu veriler heyelan duyarlılık çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Bunların başında “yamaç eğimi haritası” gelmektedir. Eğim, topoğrafik dikliğin azaldığı yönde yükseklik değerlerinin değişmesidir (Wilson ve Gallant, 2000).

Eğim, heyelan duyarlılığı üzerinde büyük bir öneme sahiptir. Özellikle konsolide olmamış zeminlerde kayma gerilimini direkt etkilemektedir. Eğim açısı arttıkça heyelan duyarlılığı artmaktadır (Foumelis vd., 2004). Çalışma alanında eğim 75 dereceye kadar ulaşmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Çalışma alanına ait yamaç eğimi haritası

Yamaç yönelimi, eğimin azaldığı doğrultu ile kuzeyin arasındaki açıdır. Bölgenin güneş ışığını daha yoğun alması ve/veya genel yağış yönü ile heyelanlar belli yönelimlerdeki yamaçlarda yoğunlaşabilir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Çalışma alanına ait yamaç yönelimi haritası Şekil 3.3'te verilmiştir.

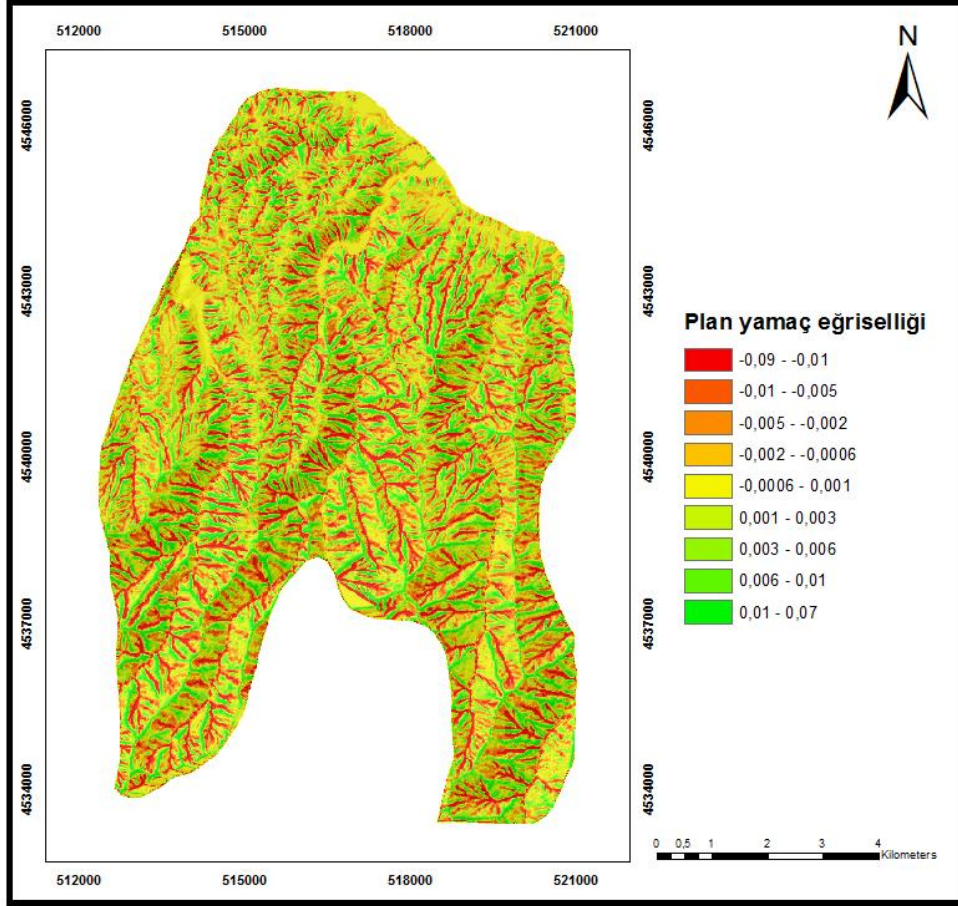


Şekil 3.3. Çalışma alanına ait yamaç yönelimi (bakı) haritası

Yamaç eğriselliği, iki cephesel yüzey noktası arasındaki mevcut eğimlerden hesaplanır (Saleem vd, 2019).

Plan, profil ve standart olmak üzere 3 tür yamaç eğriselliği tanımlıdır. Tez kapsamında yapılan değerlendirmelerde plan ve profil yamaç eğriselliği parametreleri kullanılmıştır. Plan yamaç eğriselliği, maksimum eğim yönüne diktir ve bir yüzey boyunca akışın yakınsaması ve ıraksamasını ifade etmektedir. Pozitif değerler yüzeyin o hücrede yanal olarak dışbükey, negatif değerler yüzeyin yanal olarak içbükey, sıfır değeri ise

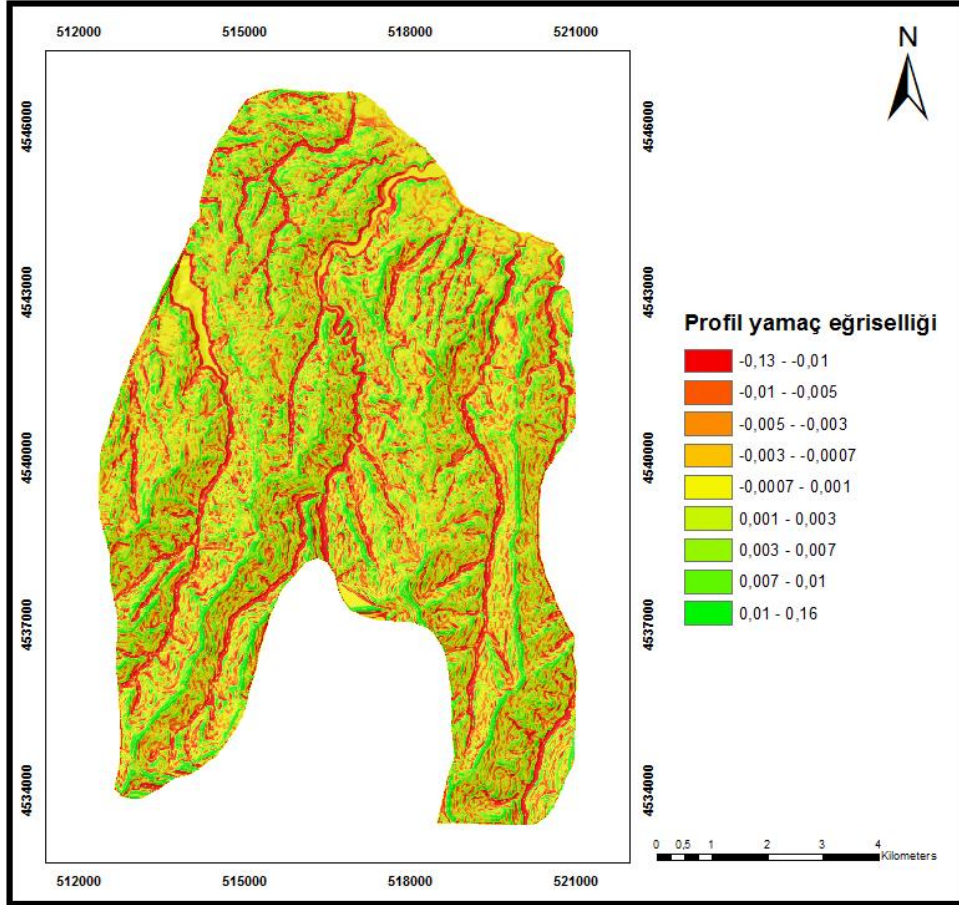
yüzeyin doğrusal olduğunu göstermektedir (URL-2, 2020). Çalışma alanına ait plan yamaç eğriliği haritası Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışma alanına ait plan yamaç eğriliği haritası

Profil yamaç eğriliği, maksimum eğim yönünü gösteren, yüzey boyunca akışın hızlanmasını ve yavaşlamasını etkileyen eğim tipidir. Negatif değerler yüzeyin o hücrede yukarı doğru dışbükey olduğunu ve akışın yavaşlayacağını, pozitif değerler yüzeyin o hücrede yukarı doğru içbükey olduğunu ve akışın hızlanacağını, sıfır değeri yüzeyin

doğrusal olduğunu göstermektedir (URL-2, 2020). Çalışma alanına ait profil yamaç eğriselliği haritası Şekil 3.5'te verilmiştir.

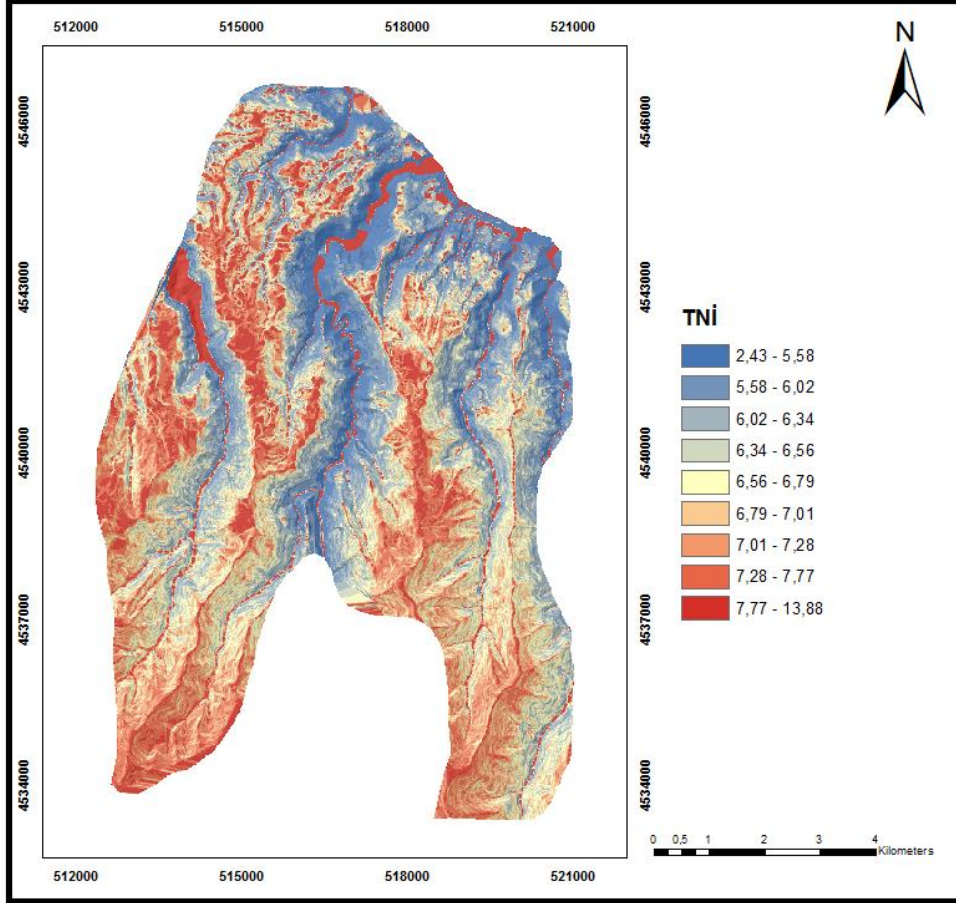


Şekil 3.5. Çalışma alanına ait profil yamaç eğriselliği haritası

Topoğrafik nemlilik indeksi, yamaç eğimine bağlı hidrolojik bir parametredir. Topoğrafyanın, yüzey akışı oluşumunun doymuş kaynak alanlarının konumu ve boyutu üzerindeki etkisini açıklamada kullanılır (Moore vd., 1991). Yüzeysel akış yaklaşımı ilk olarak Beven ve Kirkby (1979) tarafından ortaya atılarak,

$$TWI = \ln(a/ \tan\beta) \quad (20)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada; a , bir nokta boyunca kümülatif yukarı eğim alanı ve $\tan\beta$ ise o noktanın eğim açısını ifade etmektedir. Çalışma alanına ait topoğrafik nemlilik haritası Şekil 3.6'da verilmiştir.



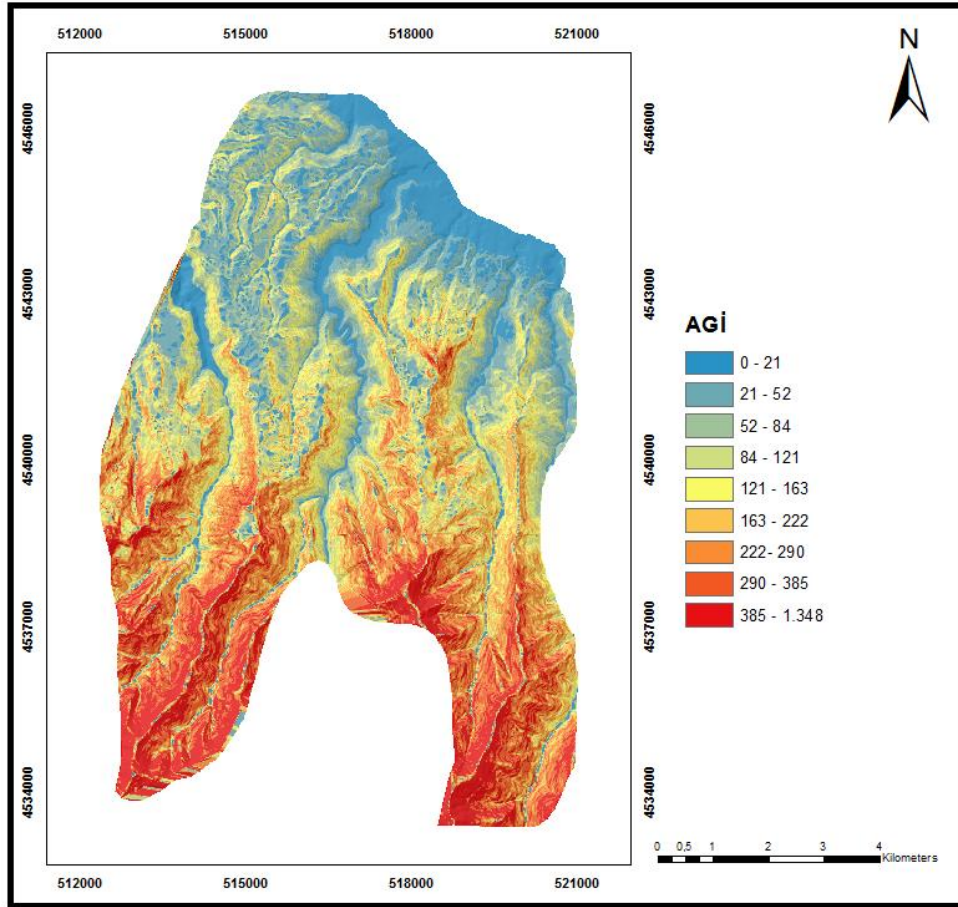
Şekil 3.6. Çalışma alanına ait topoğrafik nemlilik indeksi haritası

Akarsu güç indeksi, akarsuyun aşındırma gücünü ölçen hidrolojik bir parametredir. Moore ve Grayson (1991) tarafından tanımlanan eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$SPI = A_s * \tan\beta \quad (21)$$

A_s , havza alanı (m^2m^{-1}) ve β , yamaç eğimidir (derece).

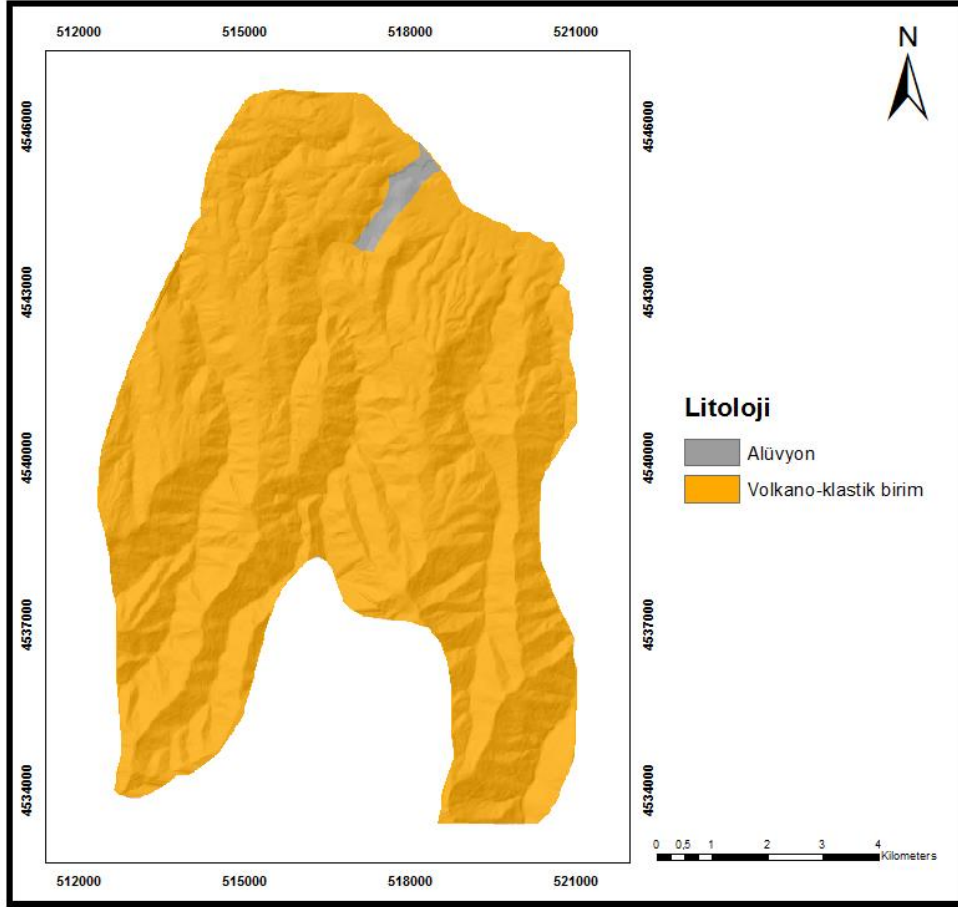
Çalışma alanına ait akarsu güç indeksi haritası Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Çalışma alanına ait akarsu güç indeksi haritası

3.3. Litoloji

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yine 1:25.000 ölçekli olarak üretilen sayısal jeoloji haritası bir girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Çalışma alanına ait sayısal jeoloji haritası Şekil 3.8’de verilmiştir.

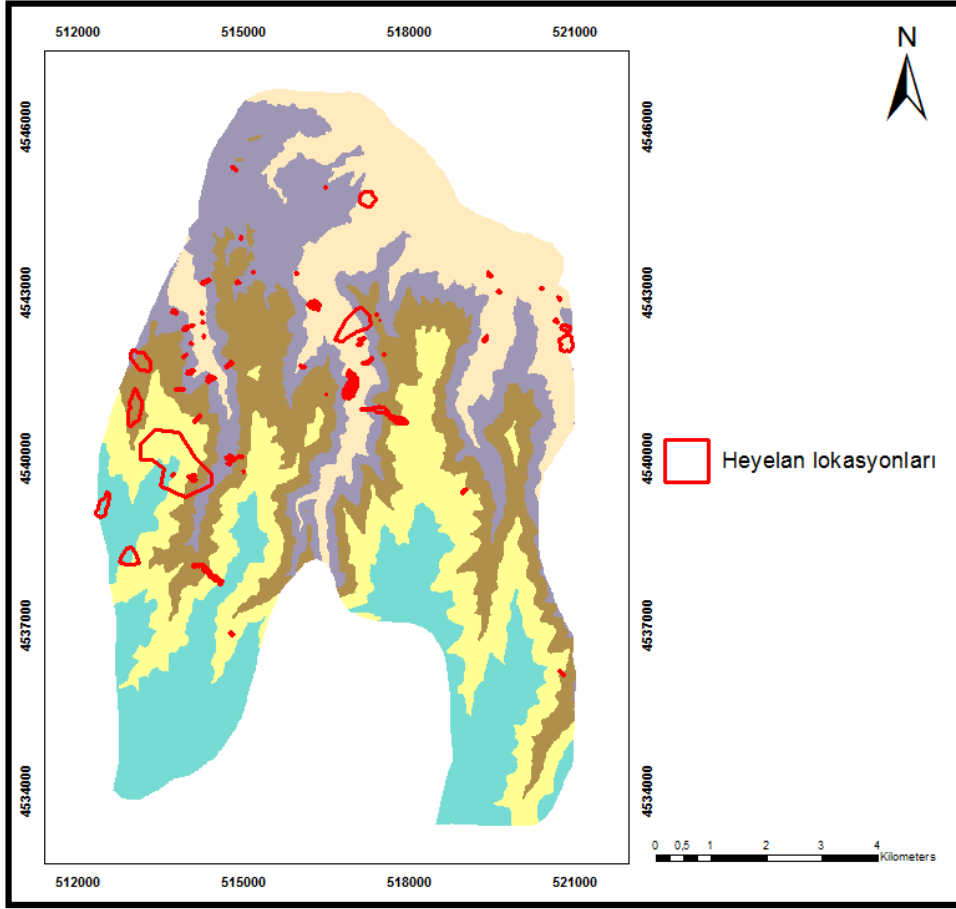


Şekil 3.8. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 1:25.000 ölçekli olarak üretilen sayısal jeoloji haritası

3.4. Heyelan Envanteri

Heyelan tehlike haritalarının hazırlanabilmesi için gerekli aşamalar sırasıyla heyelan envanter ve duyarlılık haritalarının hazırlanmasıdır. Bu amaçla tez kapsamında çalışma alanına ait Google Earth çok zamanlı uydu görüntüleri kullanılmış, arazi çalışmaları yapılmış, MTA heyelan envanterinden ve olay zamanı belirlenmesi amacıyla AFAD raporlarından da yararlanılmıştır.

Beşikdüzü ilçe sınırlarında Google Earth uydu görüntüleri ve arazi çalışmalarıyla 117 adet ve MTA heyelan envanterinden 8 adet ile birlikte toplam 125 adet heyelan haritalanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Çalışma alanı heyelan envanter haritası

Çalışma alanındaki heyelanlar Varnes (1984) sınıflamasında önerilen sınıflandırma uyarınca tanımlanmış ve Şekil 3.10'da bazı örnekler verilmiştir.



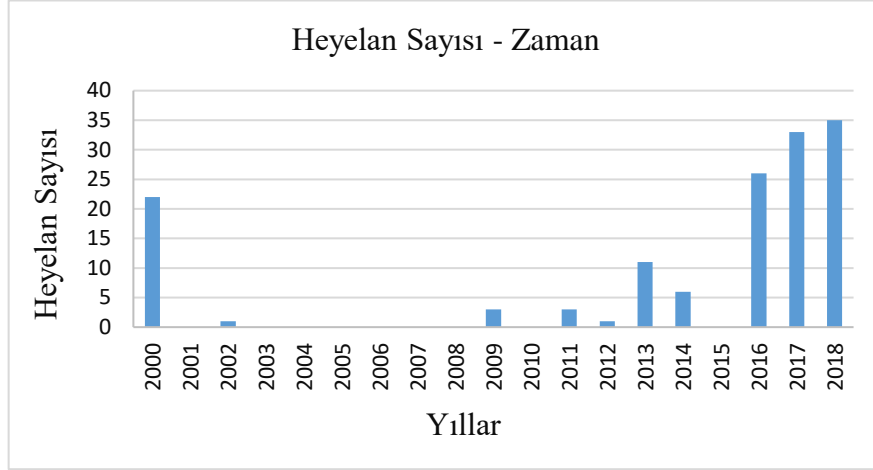
Şekil 3.10. Arazide tanımlanan heyelanların bazılarından örnekler

Google Earth üzerinden yapılan çok zamanlı envanter çalışmasında heyelanların meydana geliş zamanları Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. a) 2013 b) 2014 c) 2018 yılında gözlemlenen heyelanlar

2000- 2018 yılları arasını kapsayan envanter çalışmasında haritalanan 125 adet, AFAD raporlarında koordinatsız olarak yer alan 16 adet olmak üzere toplam 141 heyelan yıllarına göre kategorik bir şekilde sınıflandırılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Yıllara göre dağılımın grafiksel gösterimi

3.5. Laboratuvar Sonuçları

Yapılan arazi çalışmaları sonucunda 11 lokasyonda meydana gelmiş heyelan alanlarından alınan malzemelerin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar deneyleri ASTM (D7263-09, 2018) standardına göre gerçekleştirilmiştir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Birim yoğunluk değerleri

Örnek No	Doğal Yoğunluk	Kuru Yoğunluk
	gr/cm ³	gr/cm ³
1	1,50	1,06
2	1,34	0,99
3	1,61	1,11
4	1,54	1,02
5	1,79	1,30
6	1,14	0,79
7	1,72	1,24
8	1,24	0,80
9	1,69	1,26
10	1,58	1,18
11	1,66	1,12

Alınan zemin numunelerinin dane boyu dağılımını belirlemek amacıyla ASTM (D422-63, 1998) standardına göre yapılan yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmış (Ek Şekil 1, Ek Tablo 1), British Standardı (BS 1377-2:4.3, 1990)'na göre uygulanan likit limit ve ASTM (D4318-17e1, 2017) standardına göre gerçekleştirilen

plastik limit deneyleri ile (Tablo 3.2) zemin sınıfları USCS'ye göre (ASTM D2487-11, 2011) belirlenmiştir (Tablo 3.3). (Likit limit deneyi grafikleri Ek Şekil 2'de verilmiştir).

Tablo 3.2. Kıvam limitleri değerleri

Örnek No	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
1	32,5	-	32,5
2	53	34,13	18,87
3	52	35,19	16,81
4	78	49,32	28,68
5	45,5	39,93	5,57
6	59	-	59
7	60	39,75	20,25
8	51,5	32,1	19,4
9	51	39,51	11,49
10	41,5	27,49	14,01
11	62	42,79	19,21

Tablo 3.3. Zemin türleri (USCS'ye göre sınıflandırılmış)

Örnek No	Zemin Türü
1	SC
2	MH veya OH
3	MH veya OH
4	MH veya OH
5	SM
6	SC
7	MH veya OH
8	MH veya OH
9	MH veya OH
10	MH veya OH
11	MH veya OH

SM: Siltli kumlar

SC: Killi kumlar

MH: İnorganik siltler (yüksek plastisiteli)

OH: Organik killer (yüksek plastisiteli)

Zeminlere ait kayma direnci parametreleri ASTM (D3080/D3080-11, 2011) standardına göre belirlenmiş, sonuçlar Tablo 3.4'te (kesme kutusu deneyi grafikleri Ek Şekil 3) verilmiştir.

Tablo 3.4. Kayma direnci parametreleri

Örnek No	c (kPa)	ϕ (°)
1	32	21
2	33	16
3	32	16
4	23	20
5	17	24
6	18	33
7	37	26
8	39	27
9	24	29
10	13	23
11	8	30

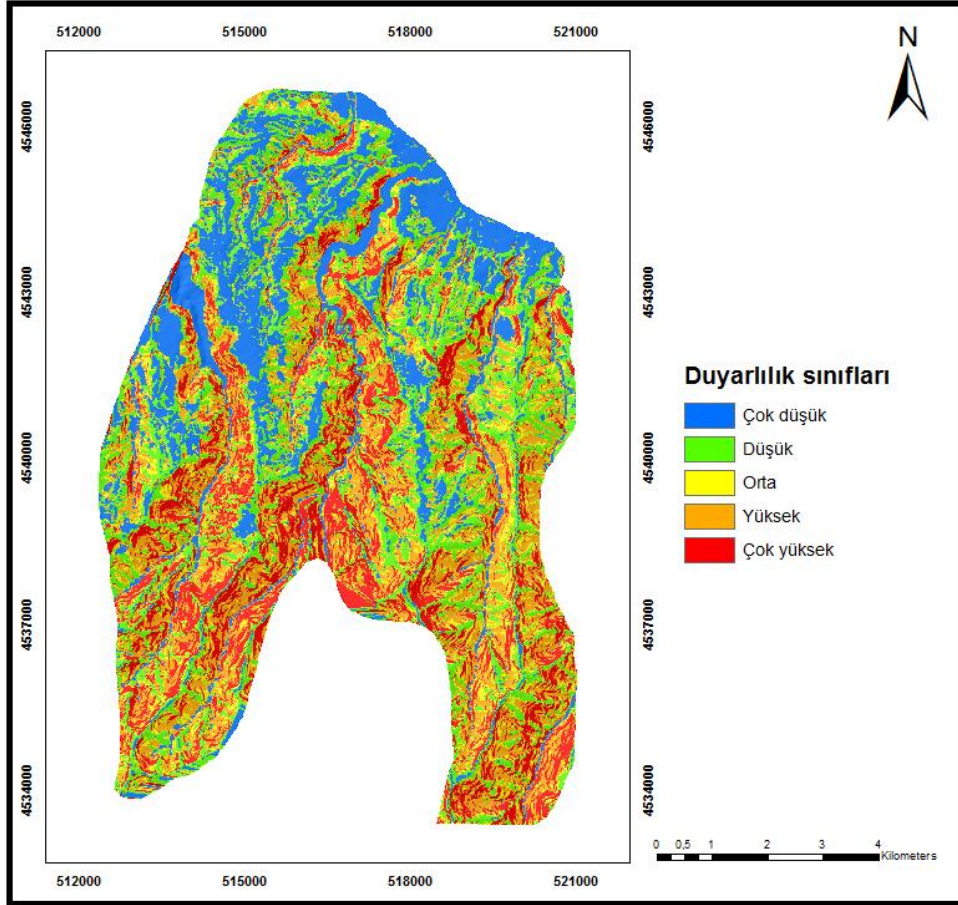
3.6. Heyelan Duyarlılık Haritaları

Duyarlılık değerlendirmeleri için heyelanlar “tohum hücre örnekleme stratejisi” yöntemiyle (Suzen ve Doyuran, 2004) hazırlanmıştır. Suzen ve Doyuran (2004) bu yöntemle, en iyi örselenmemiş morfolojik koşulların heyelan poligonun çevresinden elde edilebileceğini ve bunun için de heyelanların tepe ve yanlarına tampon bölge eklenerek sağlanacağını açıklamışlardır. Tampon mesafenin, kayma sınırı ile mikrohavza ayırma hattı arasındaki uzaklık ve mekânsal çözünürlüğe göre seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Dagdelenler vd. (2015) yaptıkları bir heyelan duyarlılık çalışmasında, Suzen ve Doyuran (2004)’ün önermiş olduğu bu yöntemle farklı tampon mesafeleri ve mekânsal çözünürlükler kullanmışlardır. Sonuçlara bakıldığında en uygun tampon mesafesinin 50 m olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan yola çıkarak, heyelanların tepe ve yanlarına 50 m’lik tamponlar çizilerek duyarlılık değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

3.6.1. Shalstab Matematiksel Modeli

Yerinde gözlenen heyelan alanlarından yapılan malzeme örnekleme ve bu malzemeler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri yardımıyla modelin ihtiyacı olan, yamaç malzemesine ait kohezyon, içsel sürtünme açısı ve kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Toplam zemin kalınlığı arazide gözlemlenmiş, yamaç drenaj alanı, kontur uzunluğu ve yamaç eğimi parametreleri sayısal yükseklik modelinden elde edilmiştir. Üretilen haritaya göre çalışma alanının %20,61’i çok düşük, %24,56’sı düşük, %11,58’i orta, %23,44’ü

yüksek ve %19,81'i çok yüksek duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür. Model ile elde edilen duyarlılık haritası Şekil 3.13'de verilmiştir.



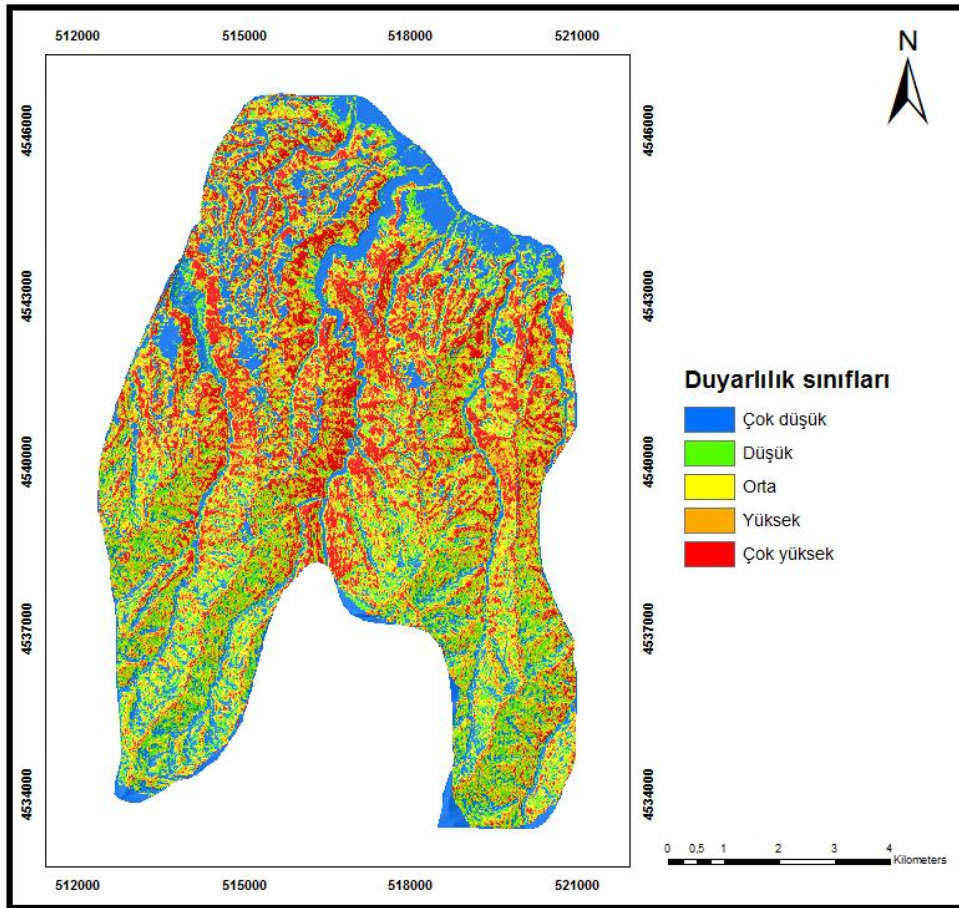
Şekil 3.13. Shalstab modeli ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası

Haritalanan heyelanların %14,29'u düşük, %28,13'ü düşük, %11,77'si orta, %22,13'ü yüksek ve %23,68'i çok yüksek duyarlı alanlarda bulunmaktadır.

3.6.2. Lojistik Regresyon (LR) Yöntemi

LR yöntemi ile heyelan duyarlılık haritası hazırlanırken, CBS tabanlı ArcGIS programı ve Şahin (2021) tarafından yürütülen ve sonuçlandırılan bir "Tübitak Projesi" sonucu üretilmiş "R programlama dili yardımıyla oluşturulmuş ArcGIS araçları" kullanılmıştır (Şahin vd., 2021). Öncelikle heyelan noktaları ve girdi parametreleri yardımıyla "heyelan olmayan alan" verisi üretilmiştir. Rastgele seçim yapılarak model için

%70 eğitim, %30 doğrulama verisi kullanılmış, duyarlılık sınıfları 5 gruba ayrılmıştır. Üretilen haritaya göre çalışma alanının %19,42'si çok düşük, %20,28'i düşük, %20,98'i orta, %19,22'si yüksek ve %20,11'i çok yüksek duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür. Elde edilen duyarlılık haritası Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. LR yöntemi ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası

Haritalanan heyelanların %19,77'si düşük, %20,46'sı düşük, %19,65'i orta, %20,50'si yüksek ve %19,62'si çok yüksek duyarlı alanlarda bulunmaktadır. Modelin istatistiksel sonuçlarına bakıldığında beta katsayısının en yüksek "litoloji", en düşük "topoğrafik nemlilik indeksi" parametrelerine ait olduğu görülmektedir (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. LR yöntemi sonucu elde edilen istatistiksel sonuçlar

Değişken	Beta katsayısı	Standart hata	z değeri	p değeri
Yamaç yönelimi	1.10483	0.15356	7.195	6.26e-13
Plan yamaç eğriselliği	4.62404	0.52932	8.736	2e-16
Profil yamaç eğriselliği	5.19821	0.25077	20.729	2e-16
Yamaç eğimi	5.21897	0.22048	23.671	2e-16
Akarsu güç indeksi	2.02706	0.10889	18.616	2e-16
Topoğrafik nemlilik indeksi	0.05779	0.10699	0.540	0.589
Litoloji	7.30645	189.01717	0.039	0.969

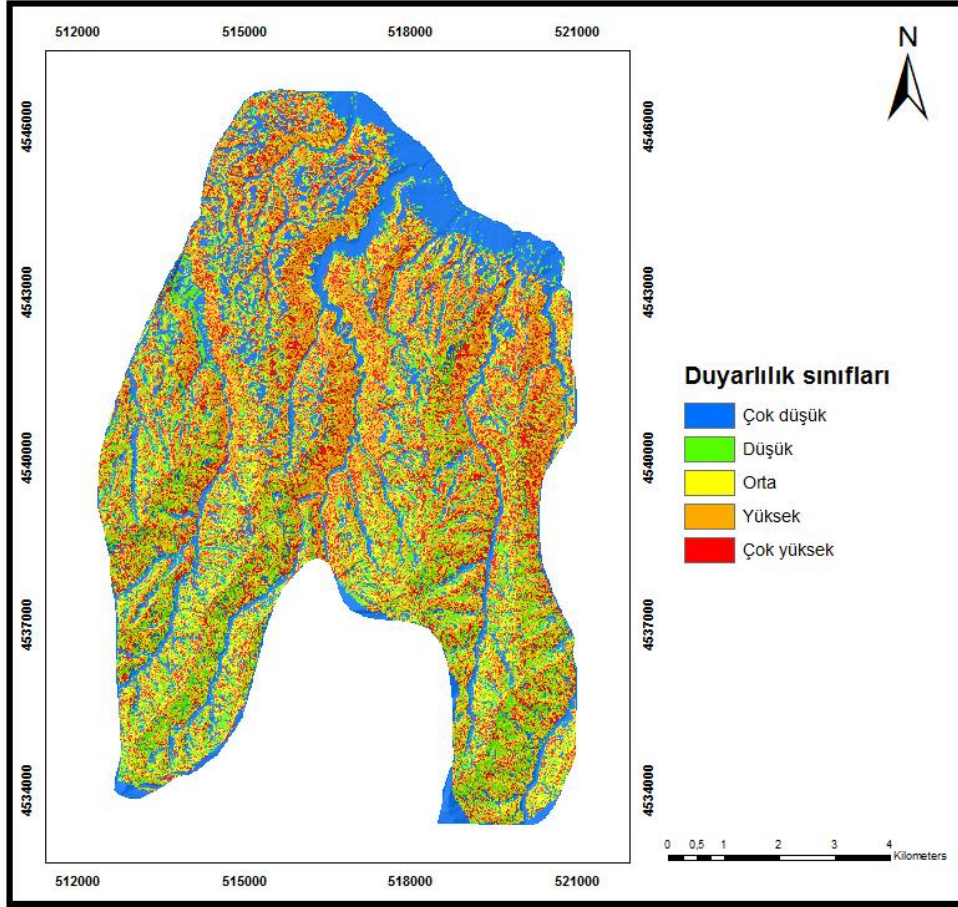
Modele ait regresyon denklemi:

$$\text{Logit} = -26.933 + 1.10483 * \text{Yamaç yönelimi} + 4.62404 * \text{Plan yamaç eğriselliği} + 5.19821 * \text{Profil yamaç eğriselliği} + 5.21897 * \text{Yamaç eğimi} + 2.02706 * \text{Akarsu güç indeksi} + 0.05779 * \text{Topoğrafik nemlilik indeksi} + 7.30645 * \text{Litoloji}$$

3.6.3. Destek Vektör Makineleri (DVM) Yöntemi

DVM yöntemi ile hazırlanan duyarlılık haritası da LR yöntemi ile hazırlanan duyarlılık haritası gibi CBS ortamında ve yine aynı aracın kullanılmasıyla (Şahin vd., 2021) elde edilmiştir. Aynı şekilde %70 eğitim, %30 doğrulama verisi kullanılmıştır.

DVM uygulamasında önemli olan nokta “çekirdek tipi fonksiyonu” seçimine göre işlem yapmasıdır. Literatür incelendiğinde Ayhan ve Erdoğan’ın (2014) çekirdek fonksiyon seçimi üzerine yapmış oldukları çalışmada, en iyi performansın “Radyal” tabanlı olduğu, ayrıca kısa sürede çözüme ulaşması sebebiyle daha avantajlı olduğu görülmüştür. Dolayısıyla tez kapsamında yapılan çalışmada “Kernel tipi” olarak “Radyal” seçilmiştir. Modelde kullanılan Gamma değeri 0,3 ve n_u 0,05’tir. Üretilen haritaya göre çalışma alanının %19,96’sı çok düşük, %19,98’i düşük, %17,97’si orta, %22,51’i yüksek ve %19,58’i çok yüksek duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür. Elde edilen duyarlılık haritası Şekil 3.15’te verilmiştir.

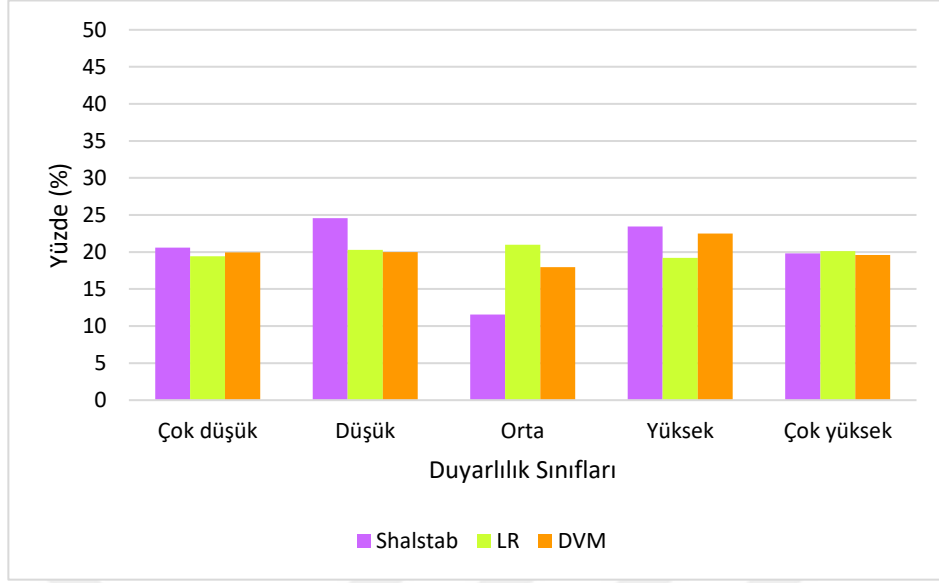


Şekil 3.15. DVM yöntemi ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritası

Haritalanan heyelanların %18,81'i düşük, %22,42'si düşük, %21,42'si orta, %17,92'si yüksek ve %19,43'ü çok yüksek duyarlı alanlarda bulunmaktadır.

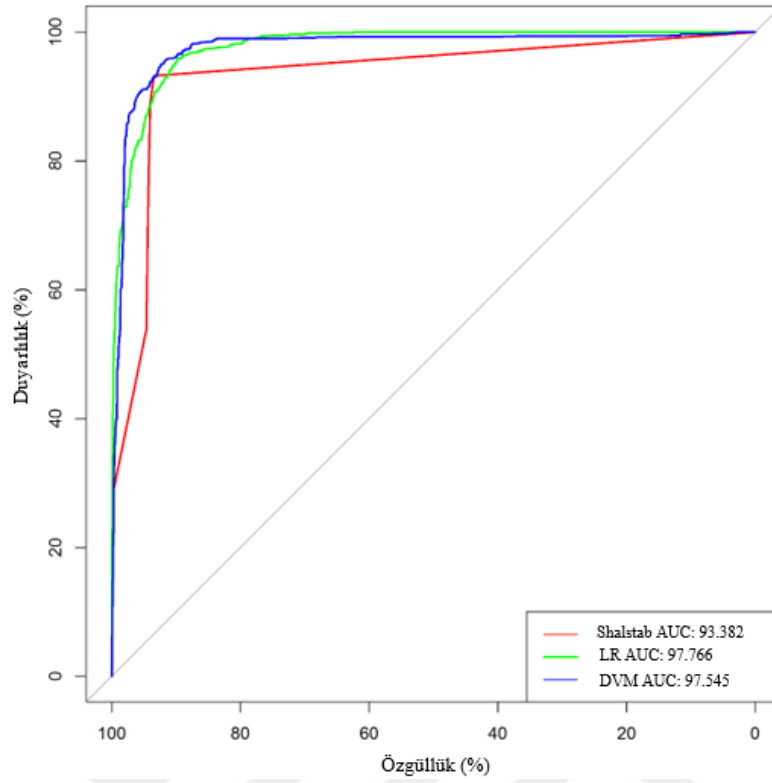
3.7. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Karşılaştırılması

Elde edilen duyarlılık haritalarının duyarlılık sınıflarına göre yüzde dağılımları kıyaslanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Duyarlılık sınıfları yüzde dağılımları

Yukarıda sözü edilen her üç modelde elde edilen duyarlılık haritalarının doğruluk değerlendirmeleri öncelikli olarak işlem karakteristik eğrisi (ROC) altındaki alan (EAA) yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. EAA yaklaşımı, heyelan duyarlılık değerlendirmesi çalışmalarında literatürde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir (Lee, 2005; Yılmaz 2010; Akgün ve Türk, 2010, Nefeslioğlu vd., 2010). EAA yaklaşımında 0.5 ile 1.0 arasında değişen değerlere sahip olacak eğri altında kalan alan kurulan modeldeki doğruluğu değerlendirmek için kullanılır. EAA olasılıksal modelin kalitesini olayın oluşma veya oluşmama durumunu güvenli biçimde tahmin etme yeteneğini tanımlamak suretiyle belirler (Remondo vd., 2003; Nandi ve Shakoore, 2010). İdeal bir modelde EAA değeri 1.0'e yaklaşırken, tersi olarak 0.5 değerine yakınlık modeldeki yanlışlığı işaret etmektedir (Fawcett, 2006b). EAA değerlendirmesi, Şahin (2021) tarafından yürütülen ve sonuçlandırılan bir "Tübitak Projesi" kapsamında üretilmiş "R" istatistik yazılım dili yardımıyla oluşturulmuş ArcGIS araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şahin vd., 2021) (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Duyarlılık haritalarının Alıcı İşletim Karakteristik Eğrisi ile karşılaştırılması

Eğri altında kalan alan değerleri sırasıyla; Shalstab yöntemi için 0,933 Lojistik Regresyon yöntemi için 0,977 ve Destek Vektör Makineleri yöntemi için 0,975'dir. Tüm yöntemler ile hazırlanan haritaların performanslarının yüksek olduğu görülmüştür. Tehlike haritaları, Shalstab ve istatistiksel yöntemlerden performansının daha yüksek olması sebebiyle LR yöntemi uygun görülerek hazırlanmıştır.

3.8. Zamansal Olabilirlik

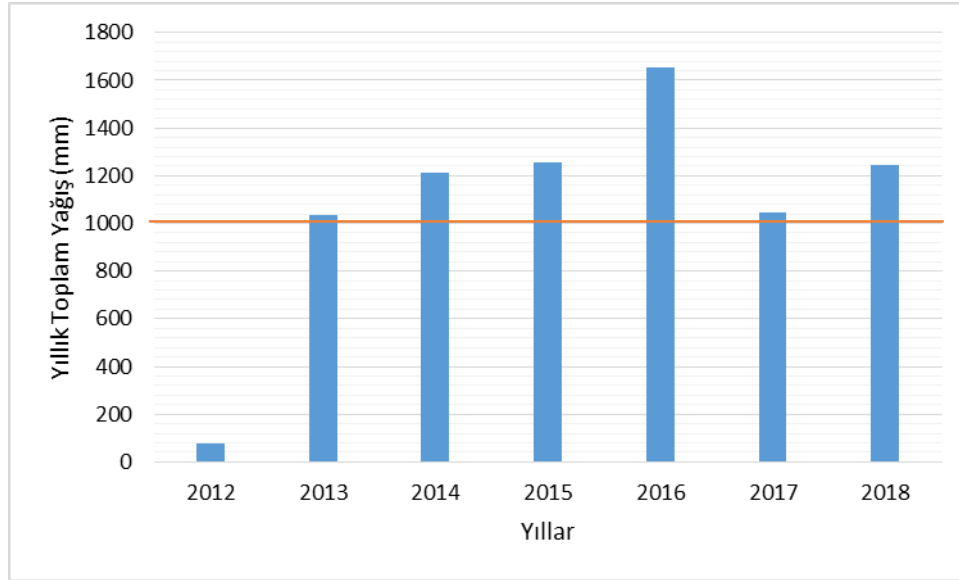
Heyelanların zamansal olarak tekrarlanma periyotlarının hesaplanabilmesi için, tetikleyici faktörlerin frekans-büyüklik ilişkilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Heyelanlar, yağış, deprem ve hızlı kar erimeleri ile tetiklenmektedir. Çalışma alanındaki heyelanların aşırı yağışların tetiklenmesi sonucu meydana gelmesi nedeniyle, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Beşikdüzü istasyonuna ait en eski kayıt tarihi olan 2012 yılından 2018 yılına kadar saatlik olarak elde edilmiş ve tüm veriler detaylı bir şekilde incelenerek istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır.

3.8.1. Yağış Analizleri

İklim koşulları ve topoğrafik yapısından dolayı çalışma alanında meydana gelen heyelanların tetikleyici faktörü aşırı yağışlardır.

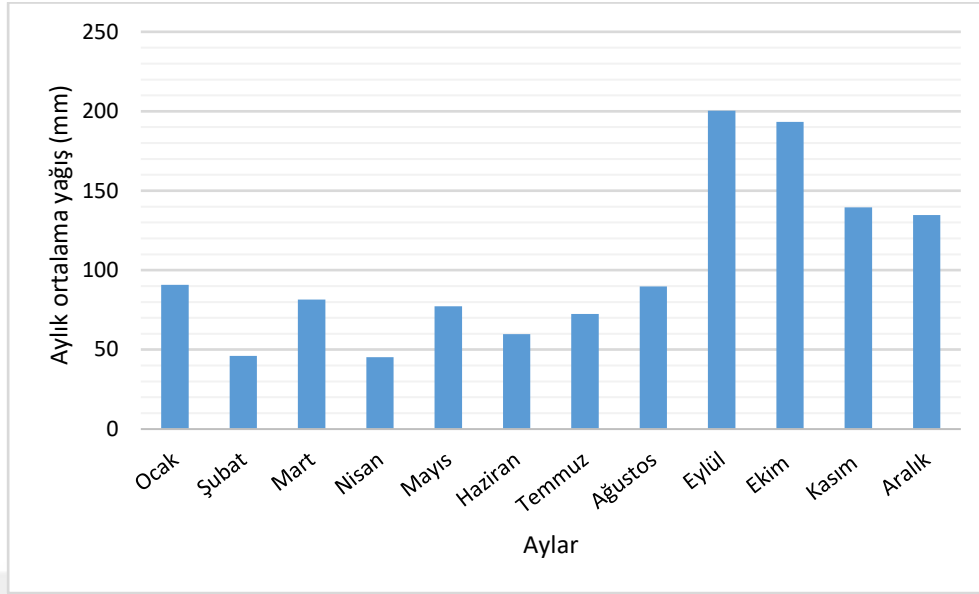
Çalışma kapsamında olayların gerçekleştiği tarihlerin belirlenebilmesi amacıyla AFAD raporları, yerel halk ile yapılan görüşmeler, Beşikdüzü Belediyesi ve diğer internet sayfalarına yansıyan haberler incelenmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden sağlanan Beşikdüzü istasyonuna ait yağış verileriyle karşılaştırılmıştır. Bunun neticesinde AFAD raporlarına göre 21 Eylül 2016 tarihi itibarıyla kayıt edilen fakat koordinatları olmaması sebebiyle konumsal olarak belirlenemeyen 16 heyelanın, o güne ait 271,5 mm'lik ekstrem yağış ile gerçekleştiği görülmüştür. Diğer heyelanların kayıt edilen tarihleri ve günlük yağış değerlerine bakıldığında kimisinde olayın meydana geldiği gün yağış olmasa bile öncesinde gerçekleşen 3-4 günlük yağış periyotları sonucunda olabileceği kanaatine varılmıştır.

Beşikdüzü istasyonuna ait 2012-2018 yılları arasında saatlik yağış verileri incelenmiş, en yüksek yıllık toplam yağışın 1655,7 mm ile 2016 yılına ait olduğu görülmüştür (Şekil 3.18).



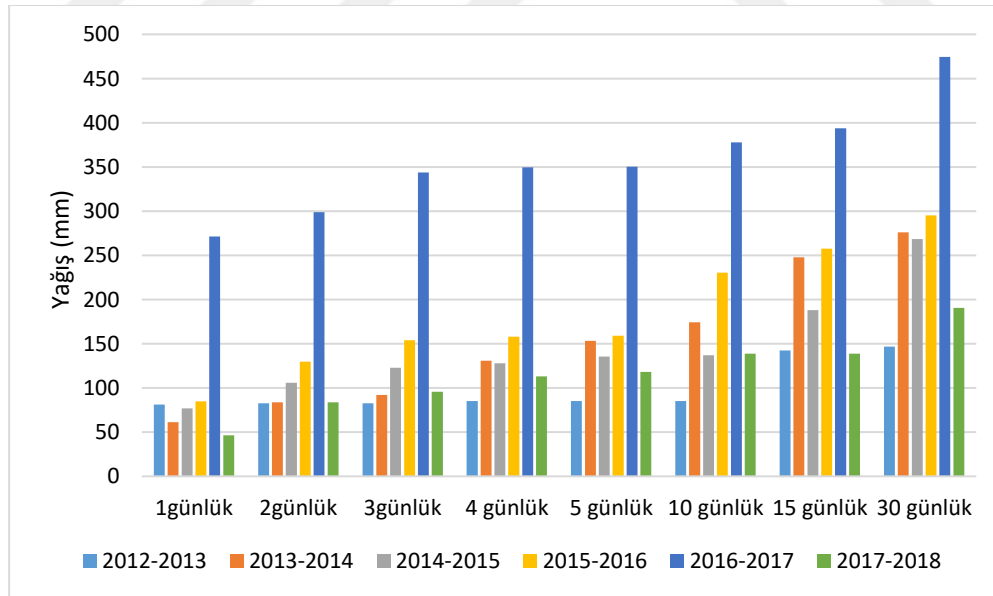
Şekil 3.18. Beşikdüzü İstasyonu yıllık yağış verileri

12 aylık yağış değerlerine bakıldığında Eylül ve Ekim aylarının en yağışlı geçen aylar olduğu görülmektedir (Şekil 3.19).



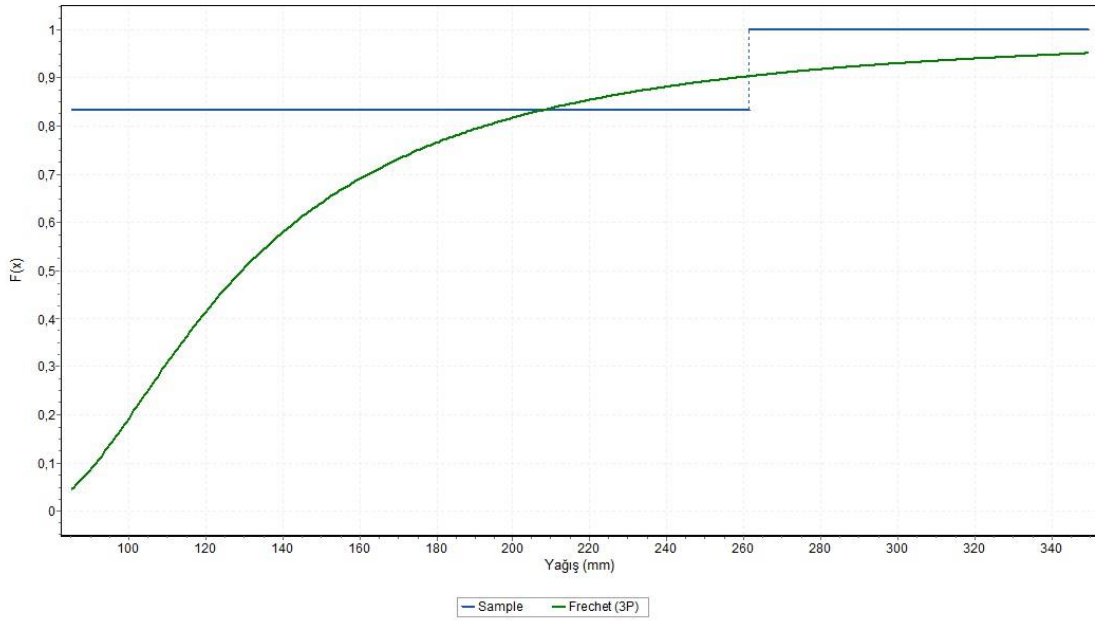
Şekil 3.19. 2012-2018 yılları için Beşikdüzü İstasyonu aylık ortalama yağış verileri

2012-2018 yıllarını kapsayan günlük yağış verileri için 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 ve 30 günlük ekstrem yağışlar hesaplanmıştır (Şekil 3.20).



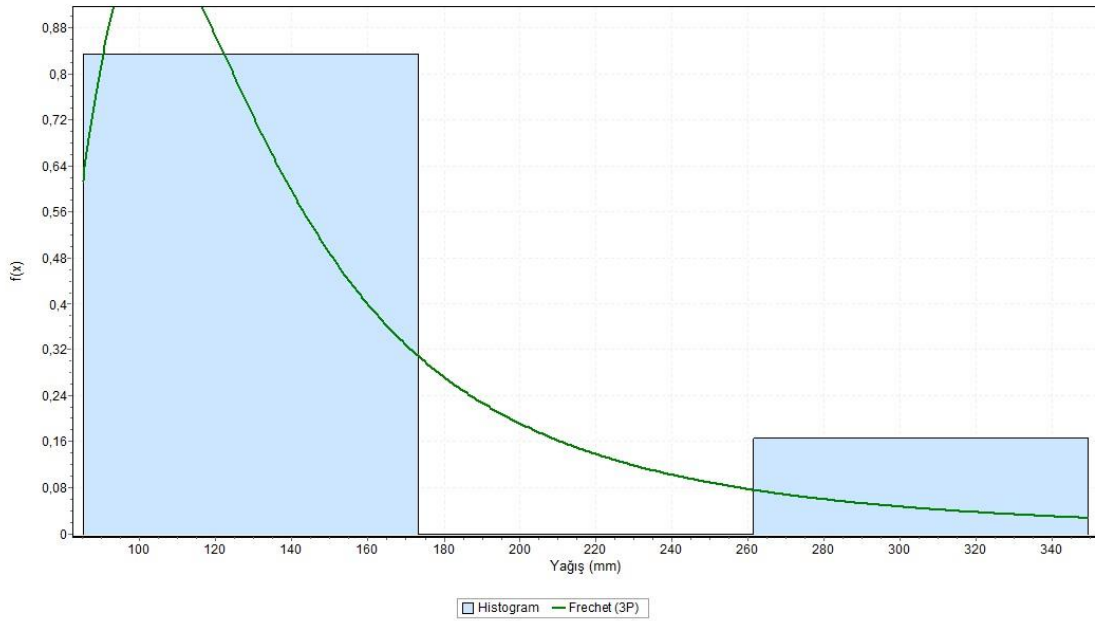
Şekil 3.20. Beşikdüzü İstasyonu 2012-2018 yılları günlük maksimum yağış değerleri

2012-2018 yılları yağış verilerine göre 4 günlük maksimum yağış verilerine bakıldığında dağılımın kuvvet yasasına uygunluğu incelenmiş, sürekli kuvvet yasasına göre birikimli dağılım fonksiyonu hesaplanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Birikimli dağılım fonksiyonu (CDF)

Kolmogorov-Smirnov testi ile veriler için uygun dağılımlar belirlenmiş (Şekil 3.22), 4 günlük maksimum yağış verileri için en uygun dağılımın Frechet 3P olduğu görülmüştür (Tablo 3.6).



Şekil 3.22. 4 günlük maksimum yağış verileri için en uygun dağılım modeli

Tablo 3.6. Kolmogorov-Smirnov Testine göre en uygun yoğunluk fonksiyonu

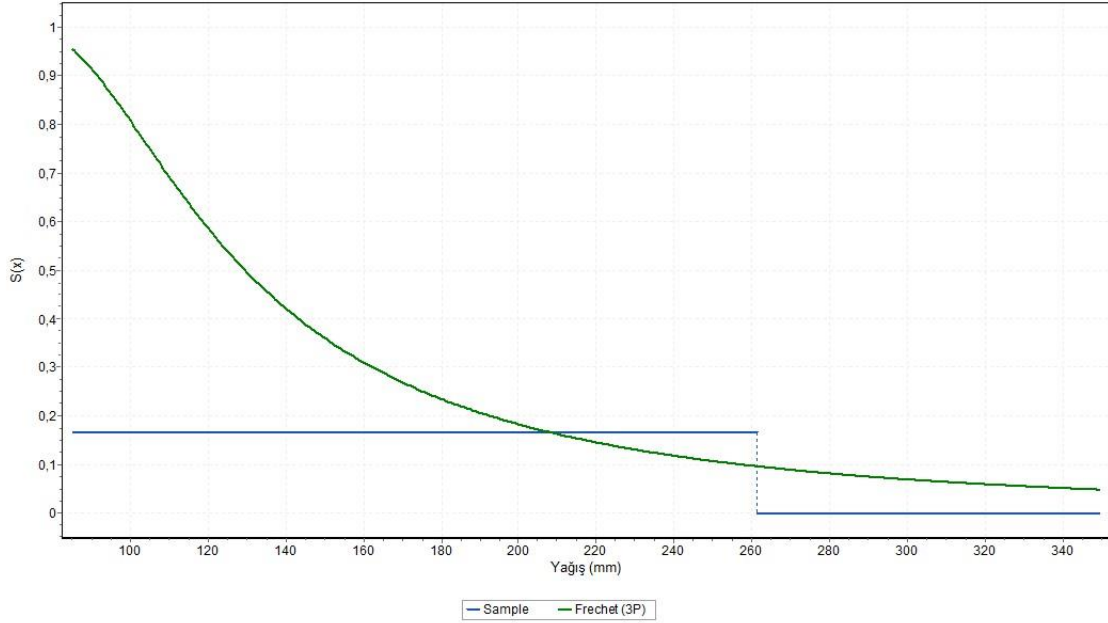
Veri sayısı	6				
D- istatistiği	Frechet (3P) (0.17314)				
Olasılık değeri	Frechet (3P) (0.97)				
Aşılma olasılığı	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Kritik Değer	0,41037	0,46799	0,51926	0,57741	0,61661
H- Hipotezi	Kabul	Kabul	Kabul	Kabul	Kabul

En uygun dağılım modeli olan Frechet 3P'e ait istatistiksel sonuçlara bakıldığında;

$\alpha=2,673$, $\beta=72,352$ ve $\gamma=43,173$ olduğu görülmektedir.

Bölgede 157,8 mm'den büyük yağışların olma olasılıkları 0,32037 (Şekil 3.23)

157,8 mm'lik yağışın tekrarlanma periyodu 3 yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.23. 4 günlük maksimum yağış verileri için elde edilen yaşam fonksiyonu eğrisi

Poisson dağılımına göre tekrarlanma periyotları hesaplanmış, heyelanların 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 yılda en az bir kere oluşması için aşılma olasılıkları belirlenmiştir (Tablo 3.7).

Tablo 3.7. Poisson Dağılımına göre yağış değerlerinin 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 yıl için gerçekleşme olasılıkları

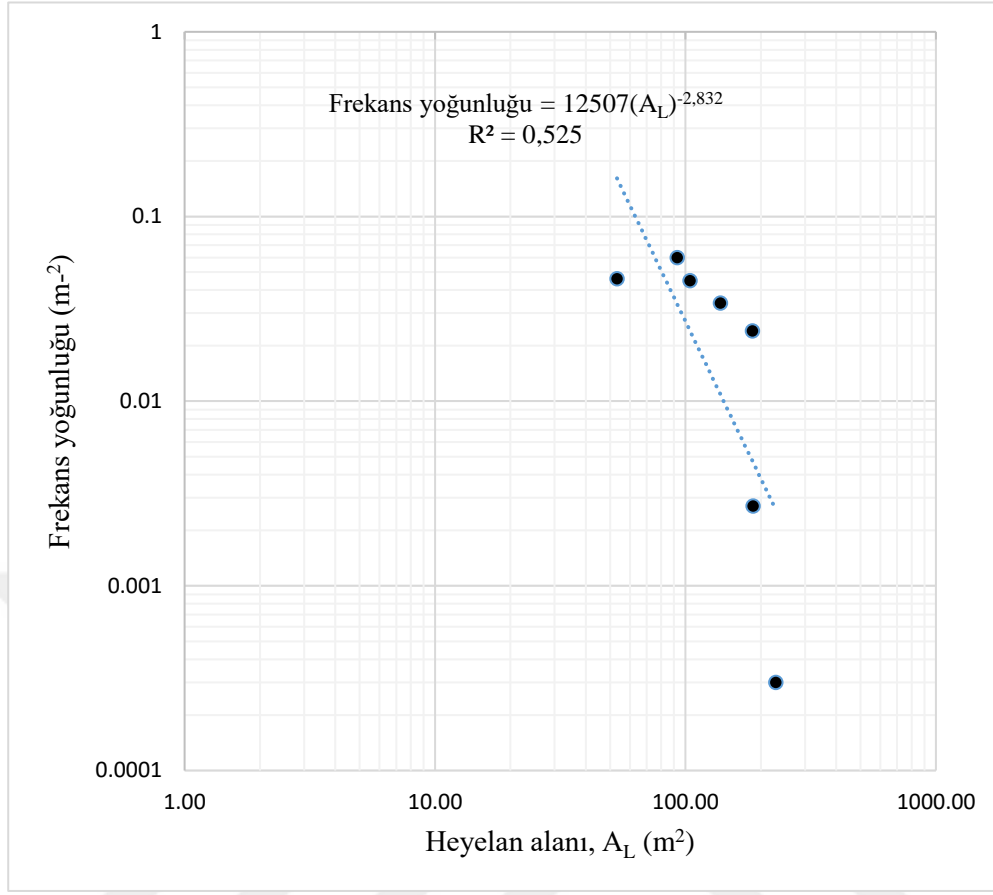
Yağış (mm)	Olasılık	1 Yıl	2 Yıl	5 Yıl	10 Yıl	20 Yıl	30 Yıl	50 Yıl	100 yıl
85,1	0,954480	0,615	0,852	0,992	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
130,7	0,490620	0,388	0,625	0,914	0,993	1,000	1,000	1,000	1,000
128	0,513110	0,401	0,642	0,923	0,994	1,000	1,000	1,000	1,000
157,8	0,320370	0,274	0,473	0,798	0,959	0,998	1,000	1,000	1,000
349,5	0,049350	0,048	0,094	0,219	0,390	0,627	0,772	0,915	0,993
112,9	0,660190	0,483	0,733	0,963	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000

3.9. Alansal Olabilirlik

Söz konusu haritalanmış heyelanların alansal olarak en fazla hangi sıklıkta görüleceğinin belirlenmesi amacıyla, Basitleştirilmiş Çift Pareto, Çift Pareto ve Ters Gama dağılımları kullanılarak heyelan alan veri seti incelenmiştir (Şekil 3.25). Söz konusu değerlendirme için, Rossi ve Malamud (2014) tarafından “R” istatistiksel yazılım dili ortamından üretilmiş “LStats” uygulamasından yararlanılmıştır.

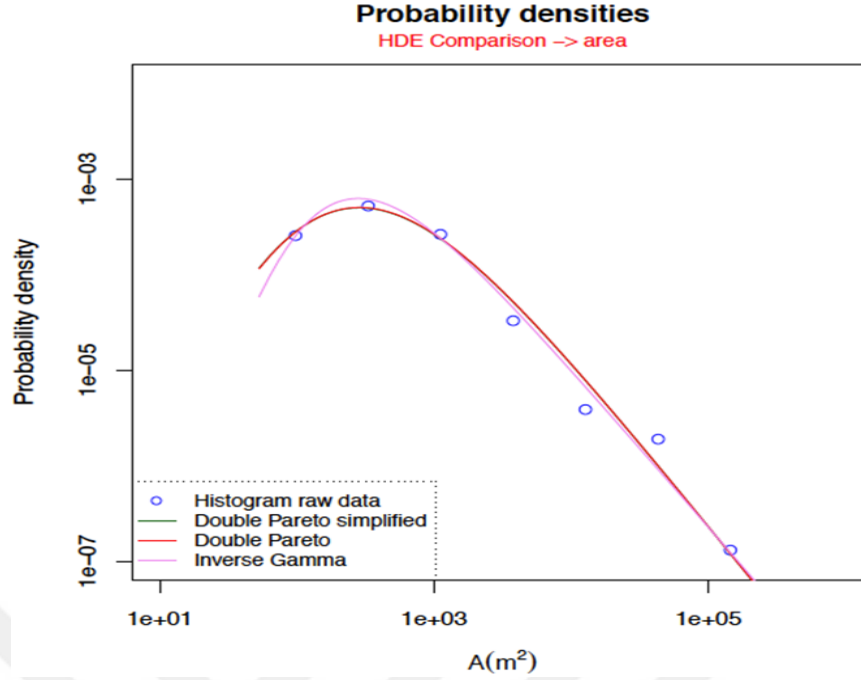
Çalışma alanında tez kapsamında konumu belirlenmiş ve haritalanmış 125 adet heyelan bulunmaktadır. Bu heyelanların en küçük alanı 53,28 m², en büyük alanı ise 902809,6 m²'dir. Heyelan alanı-frekans yoğunluğu grafiği Şekil 3.24'te verilmiştir. Söz konusu grafik uyarınca, pik değişim (rollover) değeri 223 m² olarak belirlenmiştir. Bu değer, alanda sıklıkla görülebilecek heyelan alanı olarak anlamlandırılmaktadır.

Şekil 3.25'te sunulan değerlendirme sonucunda en iyi uygunluğun, Kernel yoğunluk kestirimine göre üç parametrelili Çift Pareto dağılımı ile elde edildiği görülmüştür.



Şekil 3.24. Alanın kuvvet kanunu ilişkisine göre heyelan alanı-frekans yoğunluğu grafiği

“Çift Pareto” dağılımı sonucu elde edilen dağılım parametreleri; alfa değeri 0.76, beta değeri 300.6 ve t değeri 185.3 olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında belirli bir büyüklükten daha büyük bir heyelanın oluşması için aşılma olasılıkları hesaplanmıştır. Kolmogorov- Smirnov testine göre en uygun dağılımın Frechet olduğu görülmüştür. Yukarıda sözü edilen değerlendirmeler sonucu elde edilen 223 m² değeri göz önüne alınarak 250, 500 ve 1000 m²’den büyük heyelan meydana gelme olasılıkları incelenmiş ve sonuç olarak söz konusu olasılık değerleri sırasıyla 0.90, 0.74 ve 0.56 olarak bulunmuştur.



Şekil 3.25. Kernel yoğunluk tahminine göre heyelan boyutu olasılık dağılımları.

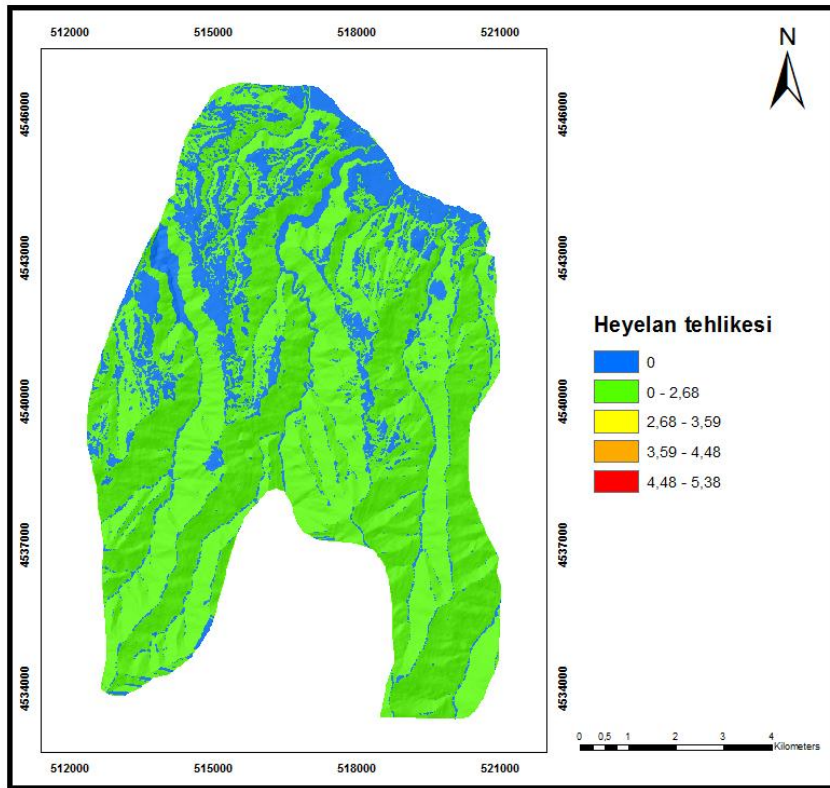
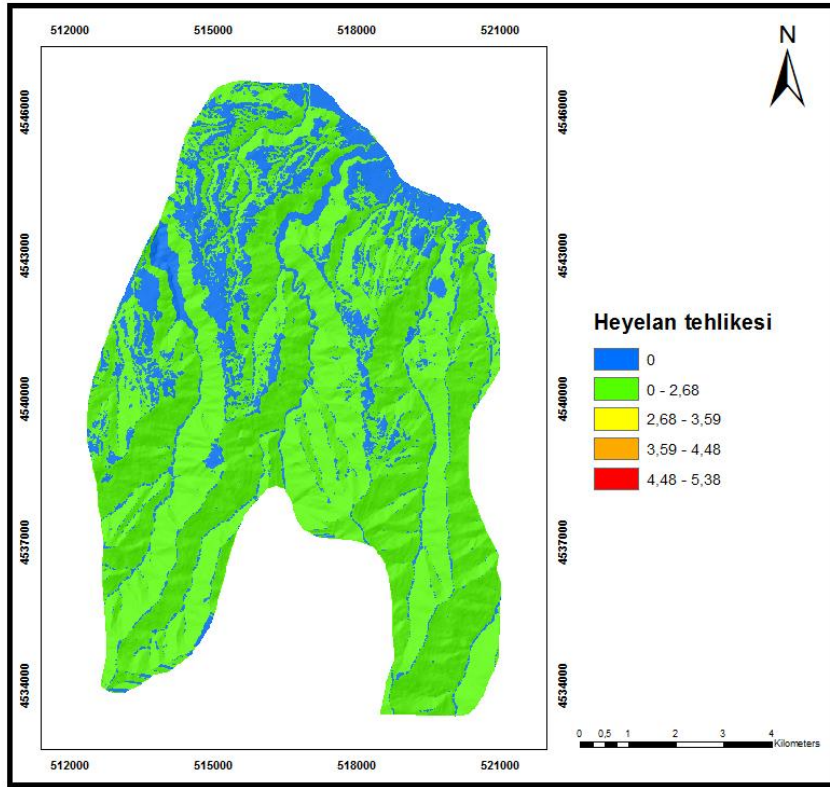
3.10. Heyelan Tehlike Haritaları

Heyelan tehlike haritaları mekânsal, zamansal ve alansal büyüklük olasılıklarının çarpılması sonucu elde edilmiştir. 1, 2, 5, 10 ve 20 yıllık zaman aralıkları ve farklı alansal büyüklükler için (250 m^2 , 500 m^2 , 1000 m^2) olası tehlike haritaları Shalstab matematiksel modeli tabanlı ve LR yöntemi tabanlı olarak hazırlanmıştır. Tehlike haritalarının alansal ve zamansal gerçekleşme yüzdeleri Shalstab matematiksel modeli tabanlı hazırlananlar Ek Şekil 4'te, Lojistik Regresyon yöntemi tabanlı hazırlananlar Ek Şekil 5'te verilmiştir.

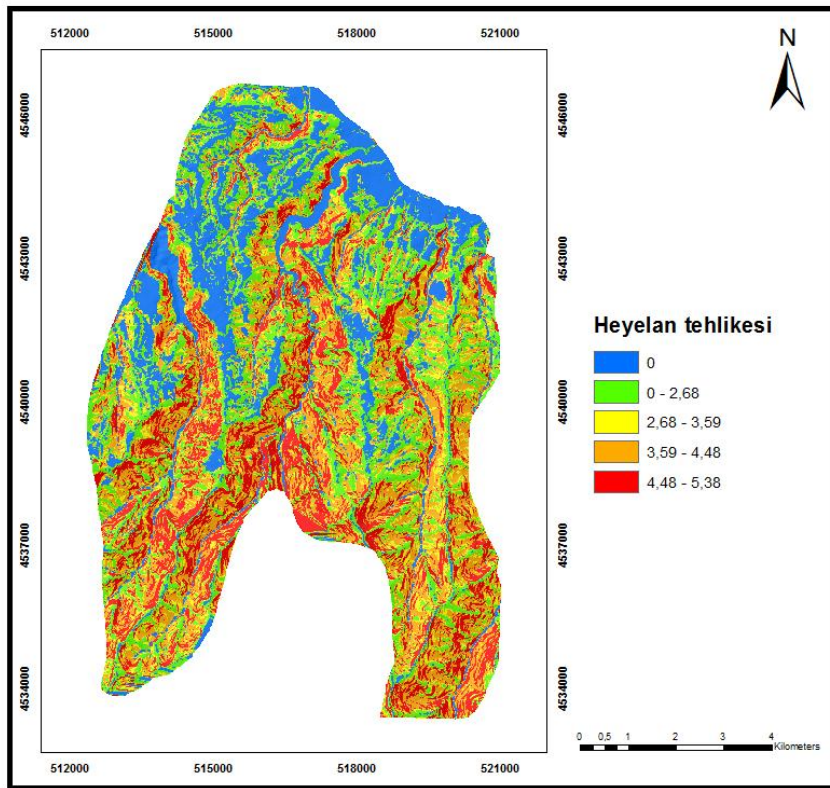
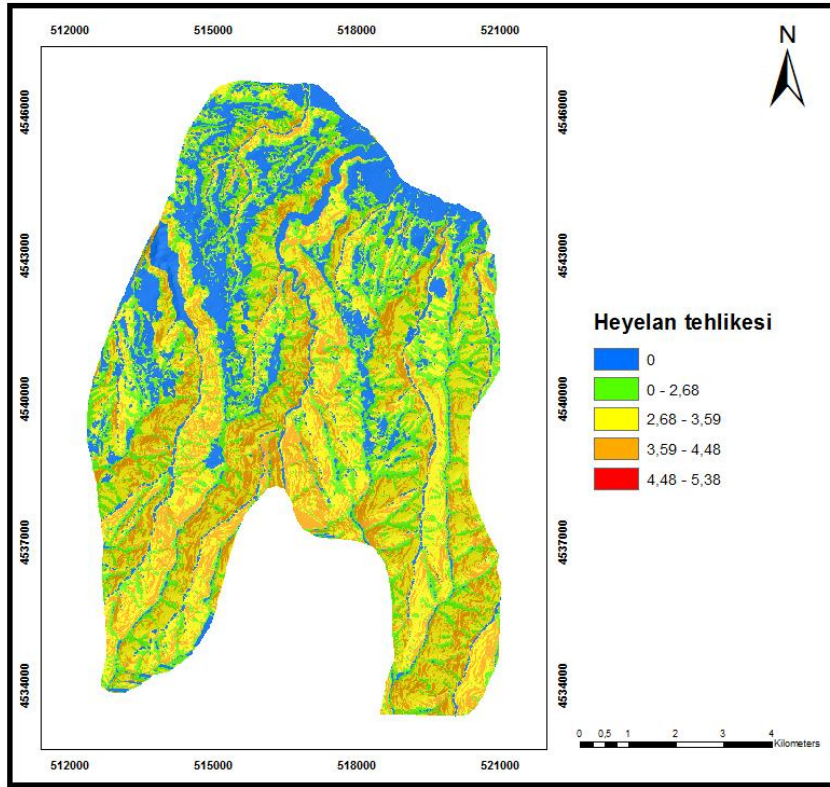
3.10.1. Shalstab Matematiksel Modeli Tabanlı Tehlike Haritaları

Tez kapsamında inceleme alanı için hazırlanan ve yukarıdaki bölümlerde detayları sunulan duyarlılık haritalaması ile zamansal ve alansal olay olasılık değerlendirilmeleri sonucunda Shalstab matematiksel modeline dayalı üretilen duyarlılık haritasından itibaren tehlike modelleri, aşağıda sunulan şekillerde (Şekil 3.26-3.34) elde edilen haritalar ile sonuçlanmıştır.

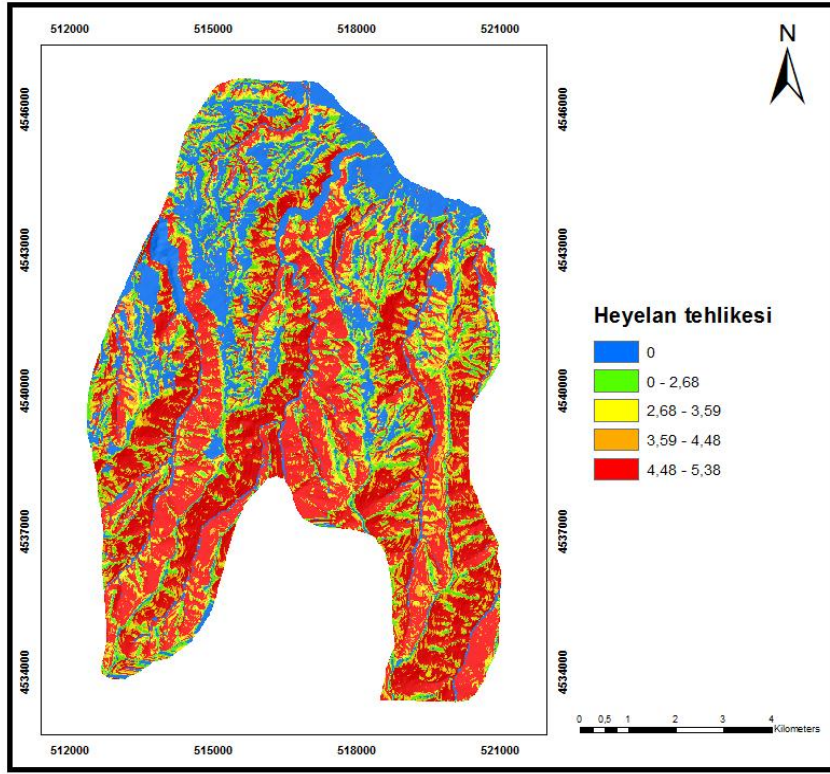
Buna göre, 1,2,5,10 ve 20 yıllık tekrarlanma periyotlarında alanda 250 , 500 ve 1000 m^2 'lik sığ akma ve kayma tehlikesi haritaları elde edilmiştir.



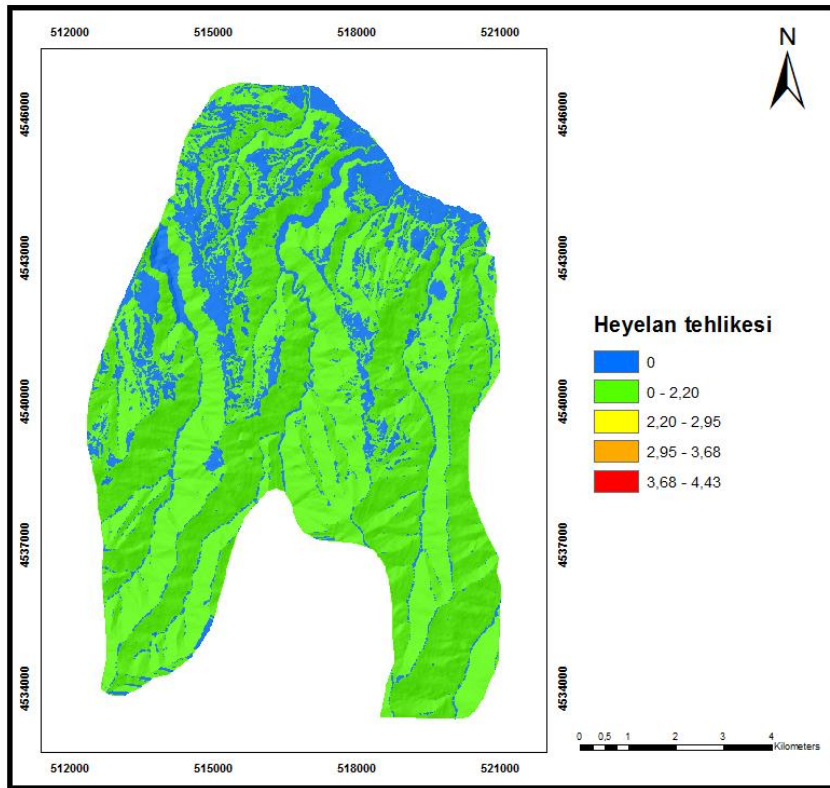
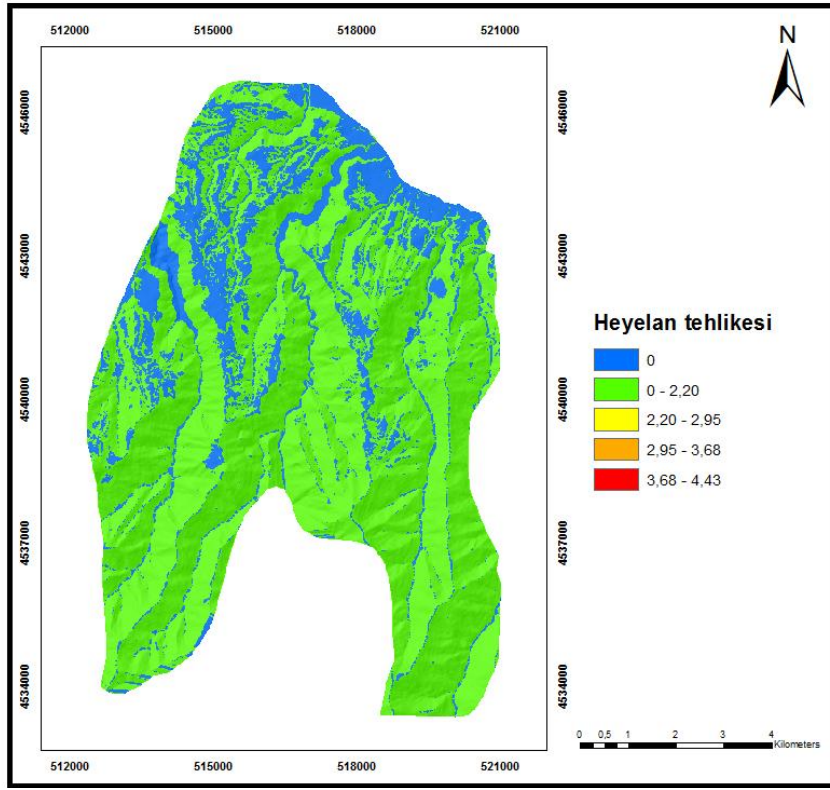
Şekil 3.26. 250 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



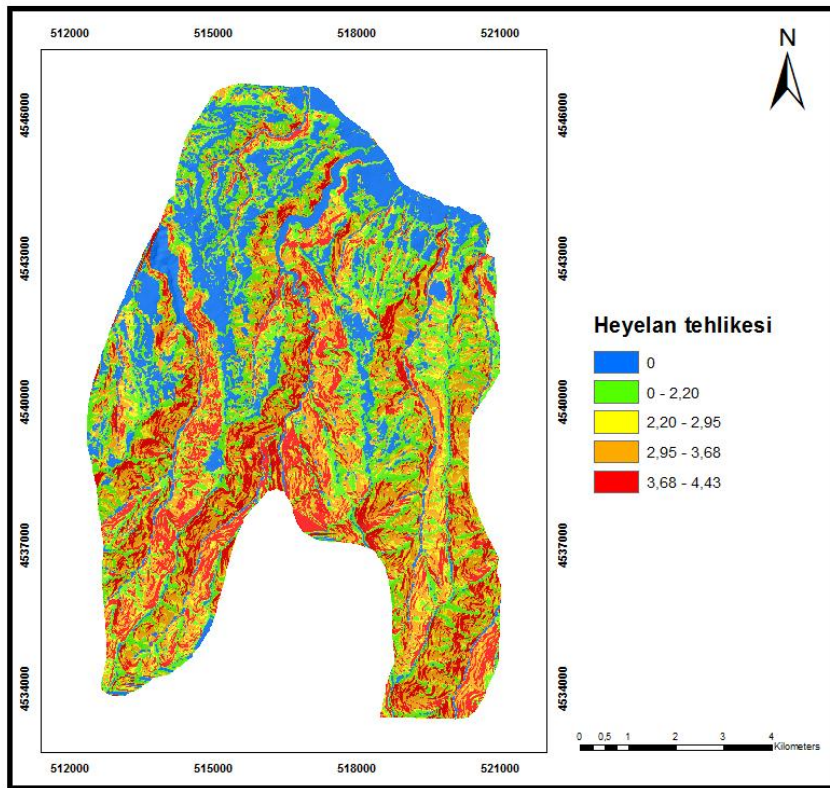
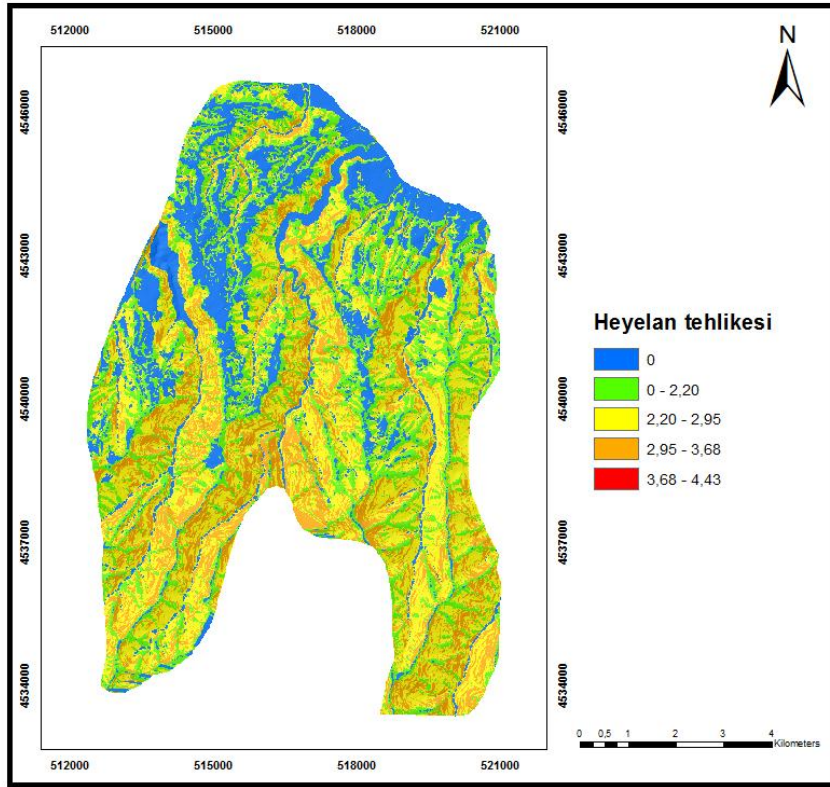
Şekil 3.27. 250 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



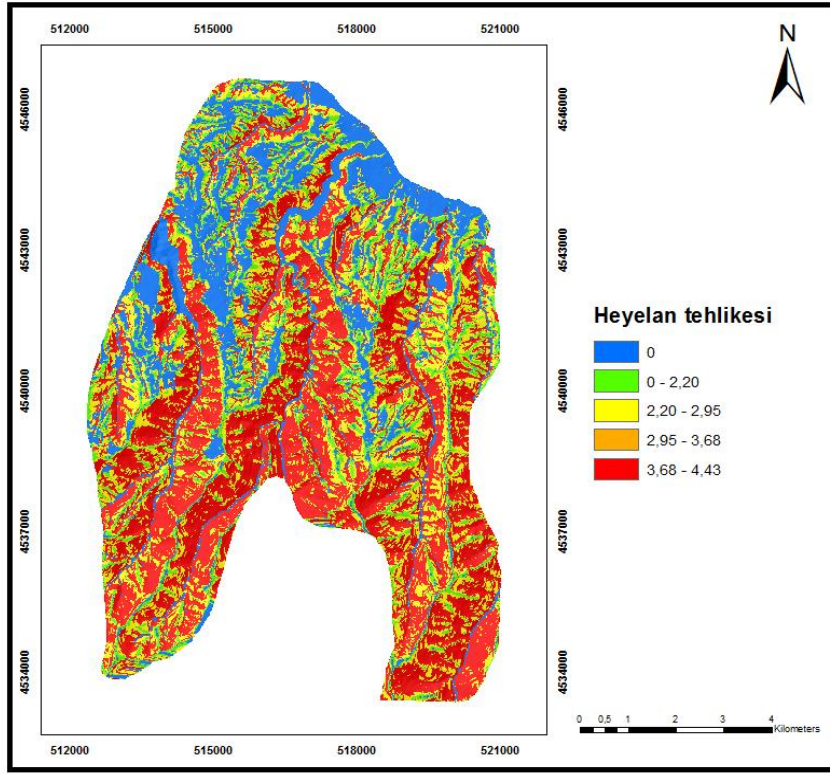
Şekil 3.28. 250 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası



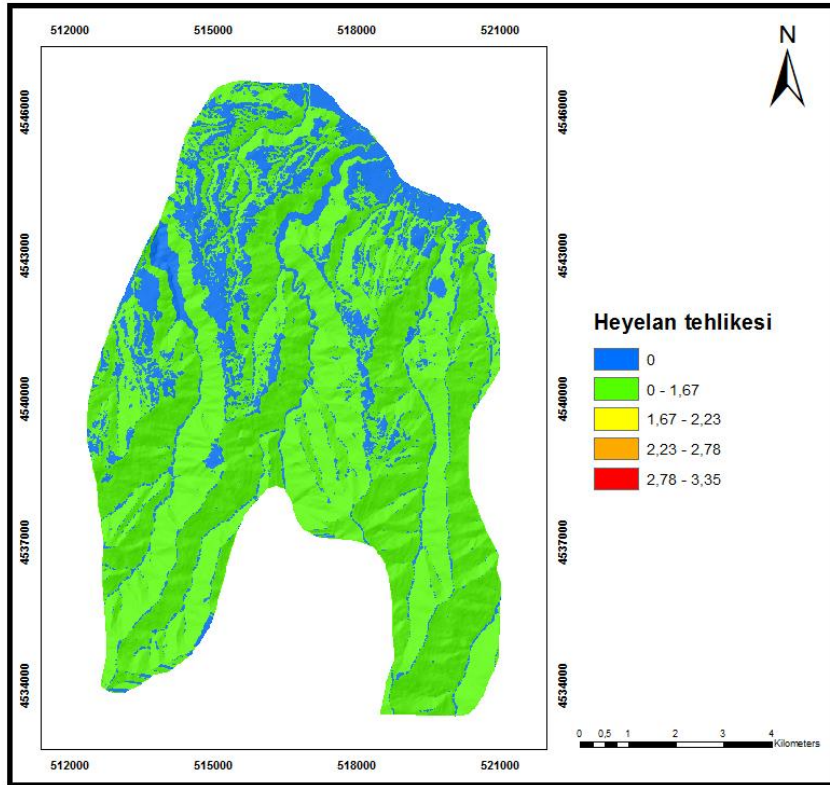
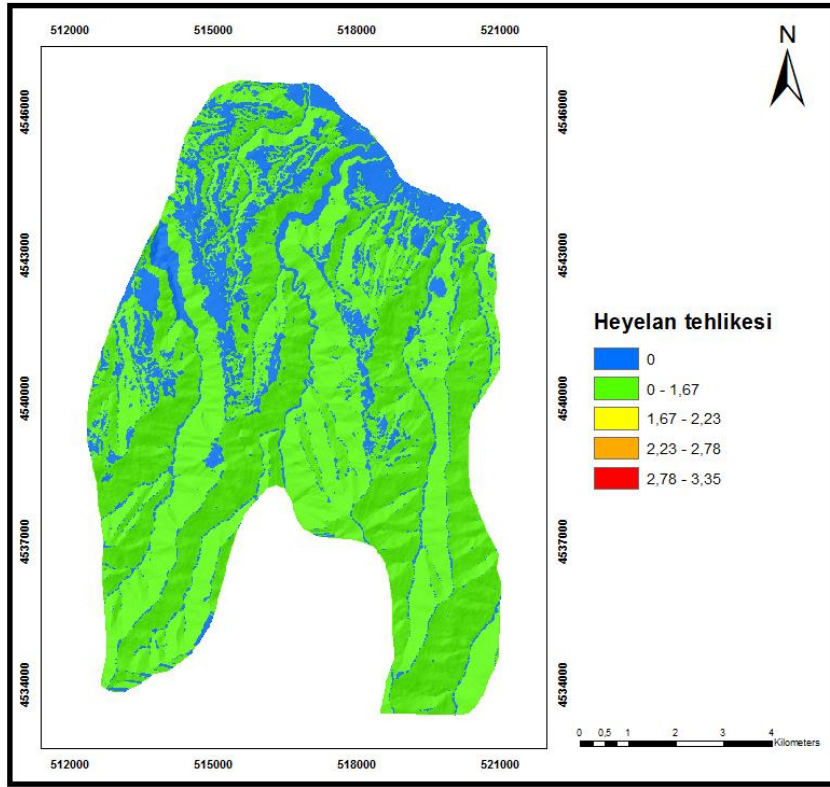
Şekil 3.29. 500 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



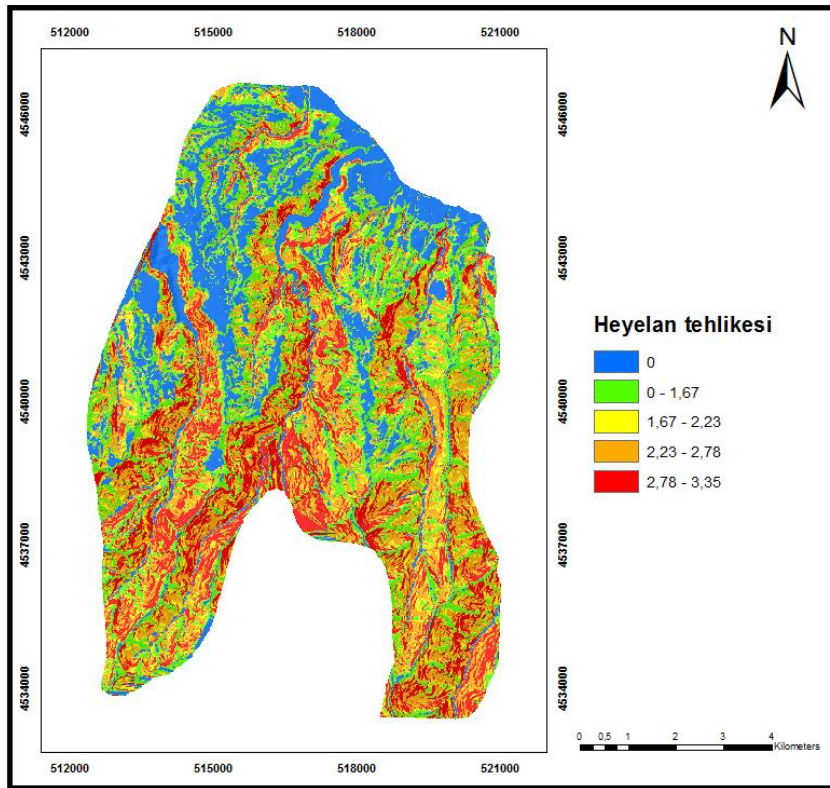
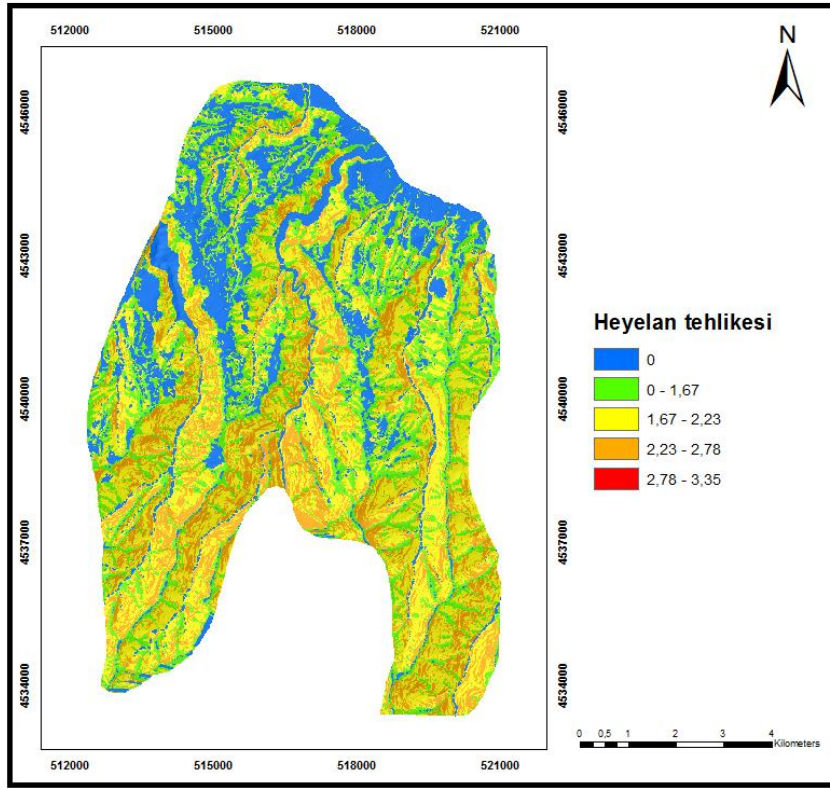
Şekil 3.30. 500 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



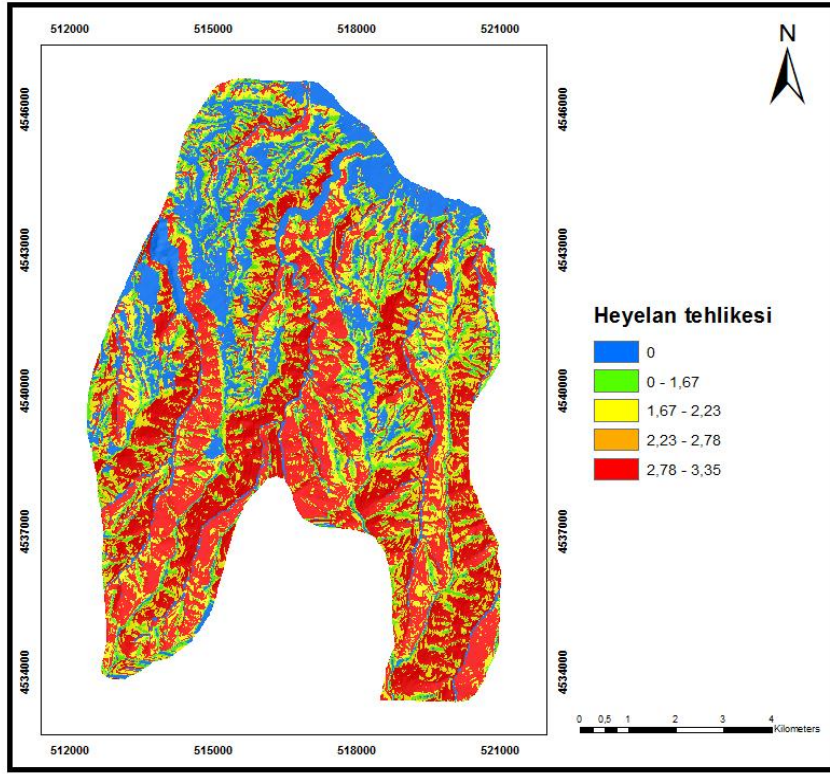
Şekil 3.31. 500 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası



Şekil 3.32. 1000 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



Şekil 3.33. 1000 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları

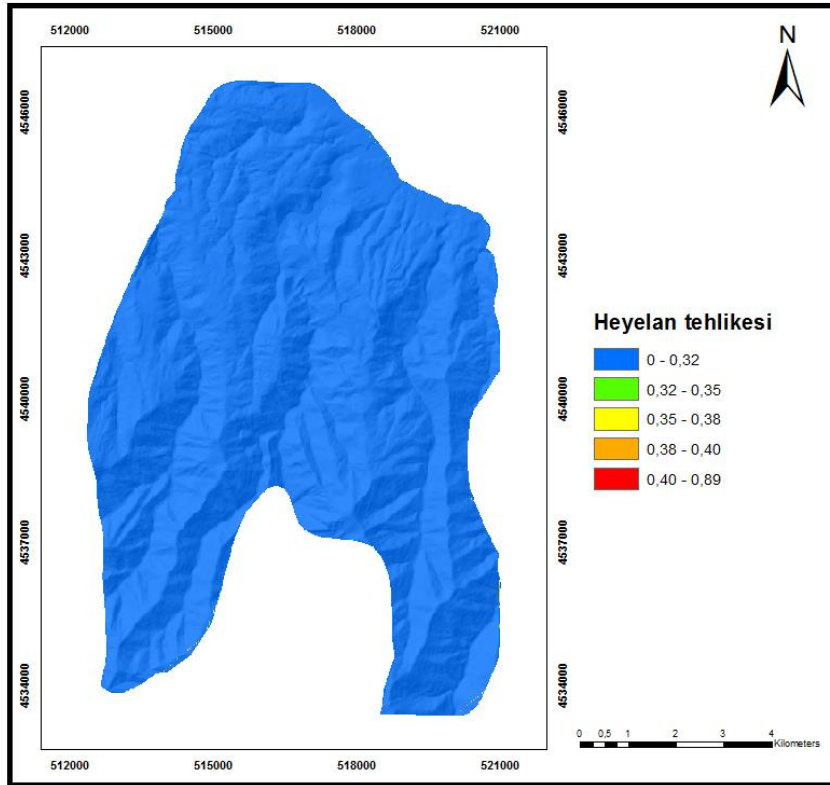
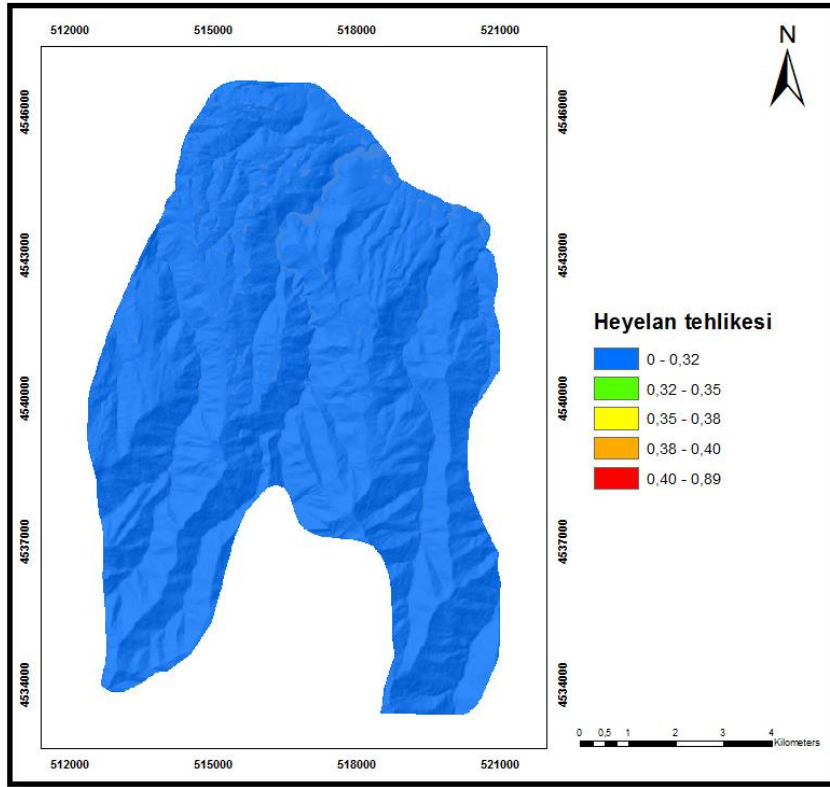


Şekil 3.34. 1000 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası

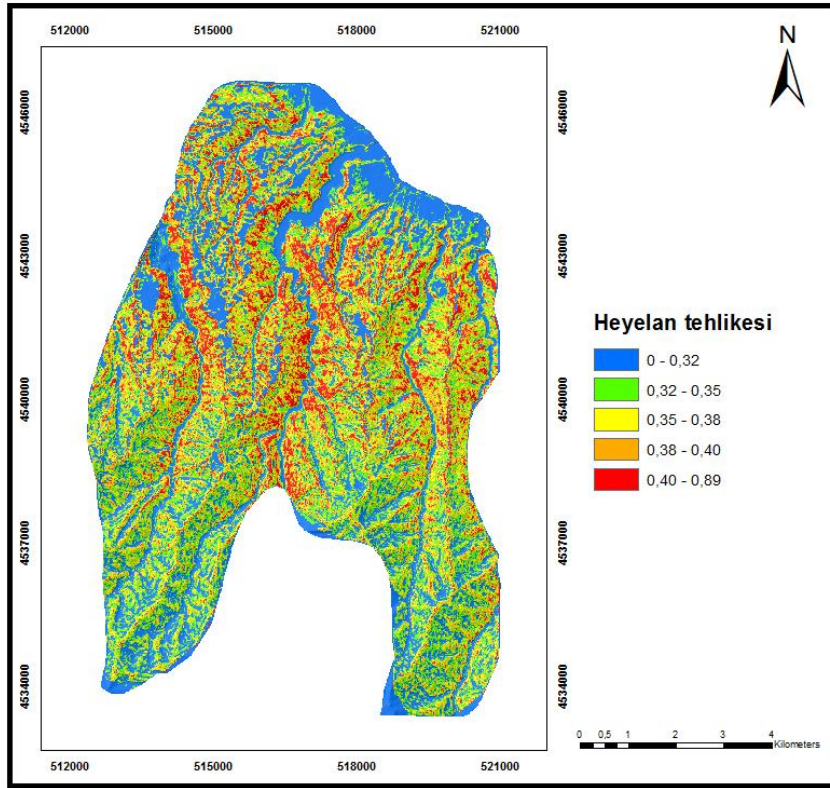
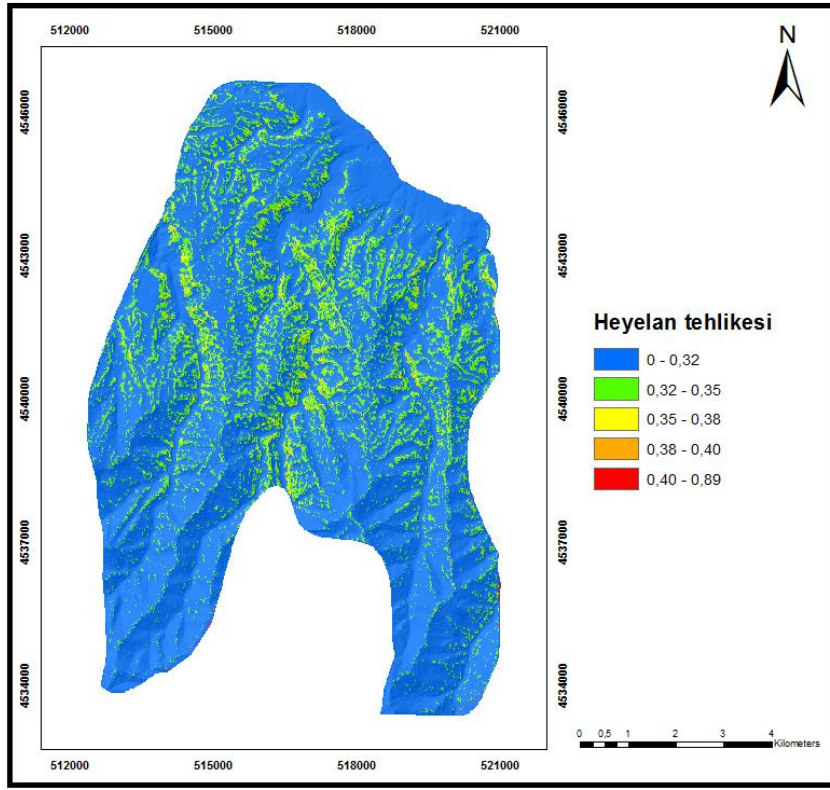
3.10.2. Lojistik Regresyon Yöntemi Tabanlı Tehlike Haritaları

Shalstab matematiksel modelinden sonra lojistik regresyon modeli tabanlı üretilen üretilen duyarlılık haritasından itibaren de tehlike modelleri üretilmiş ve aşağıda sunulan şekillerde (Şekil 3.35-3.43) elde edilen haritalar ile sonuçlanmıştır.

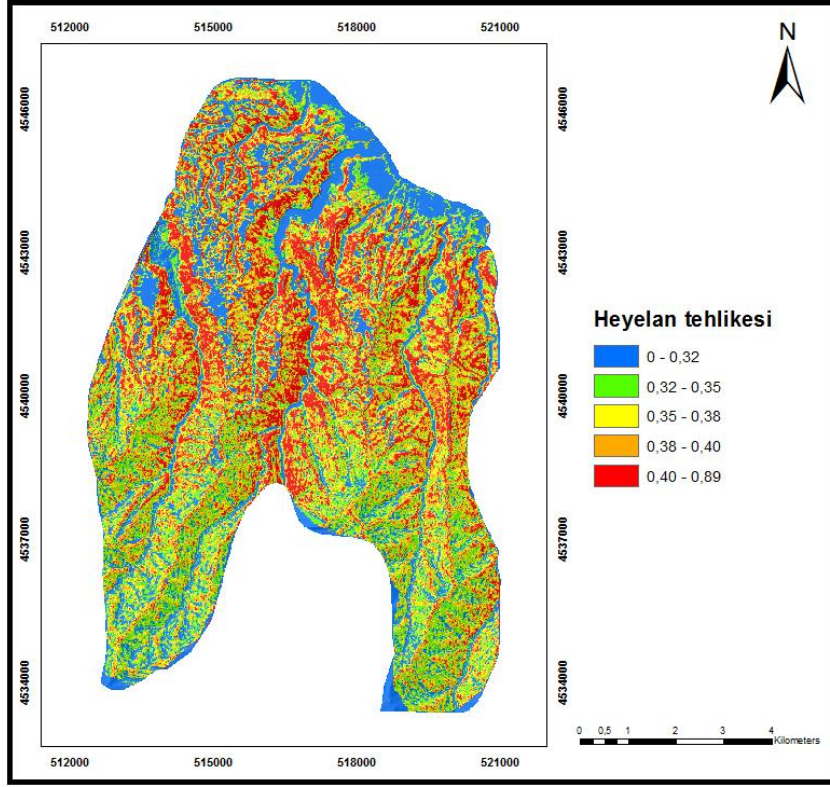
Yine bu kapsamda aynı şekilde 1,2,5,10 ve 20 yıllık tekrarlanma periyotlarında ve 250, 500 ve 1000 m²'lik alansal meydana gelme sıklıklarında sığ akma ve kayma tehlikesi haritaları elde edilmiştir.



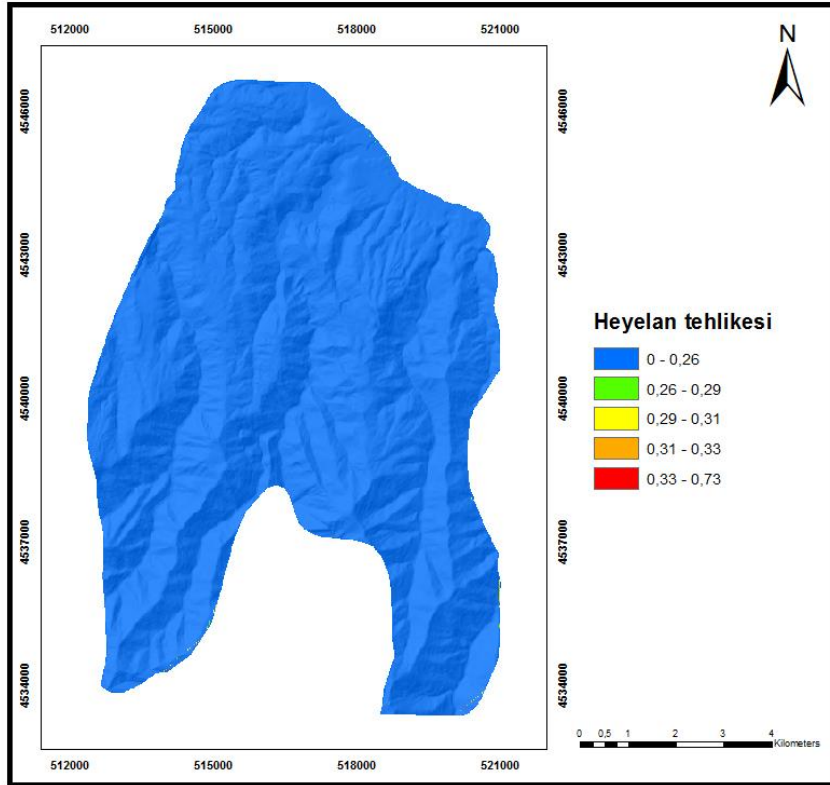
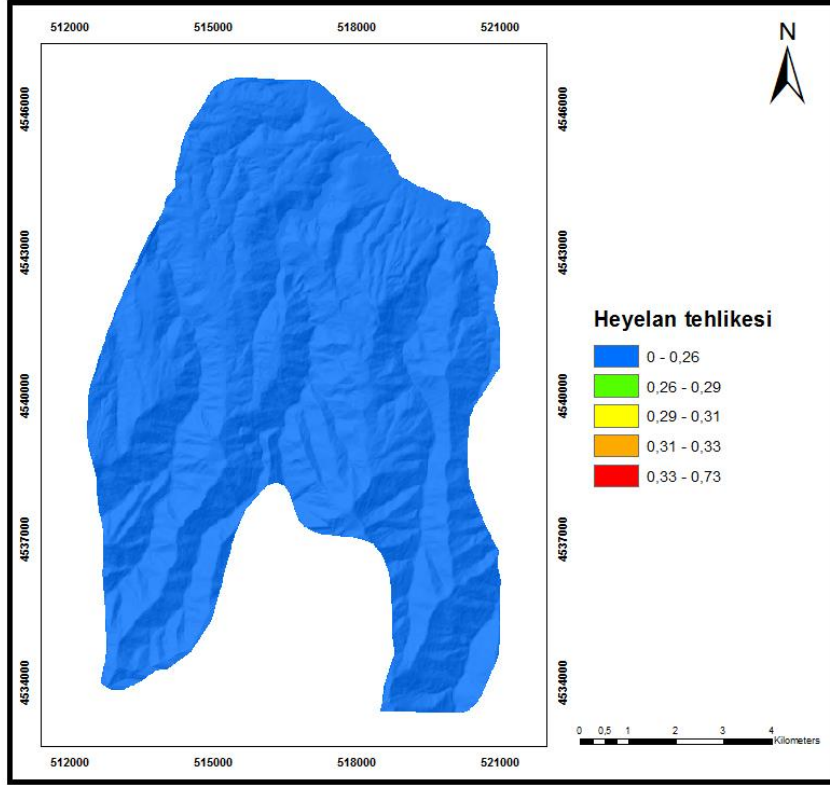
Şekil 3.35. 250 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



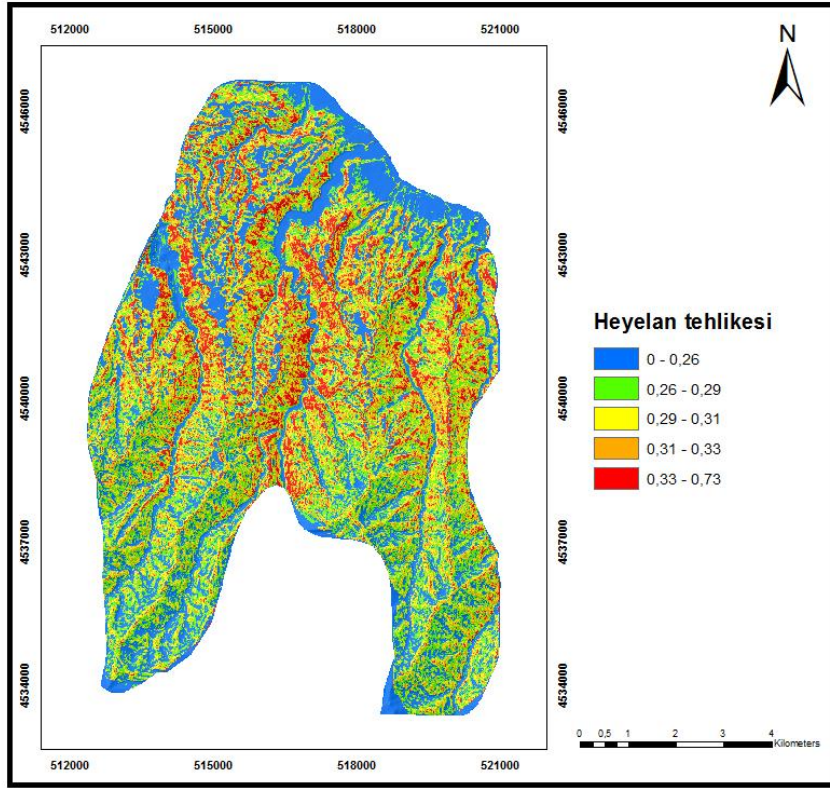
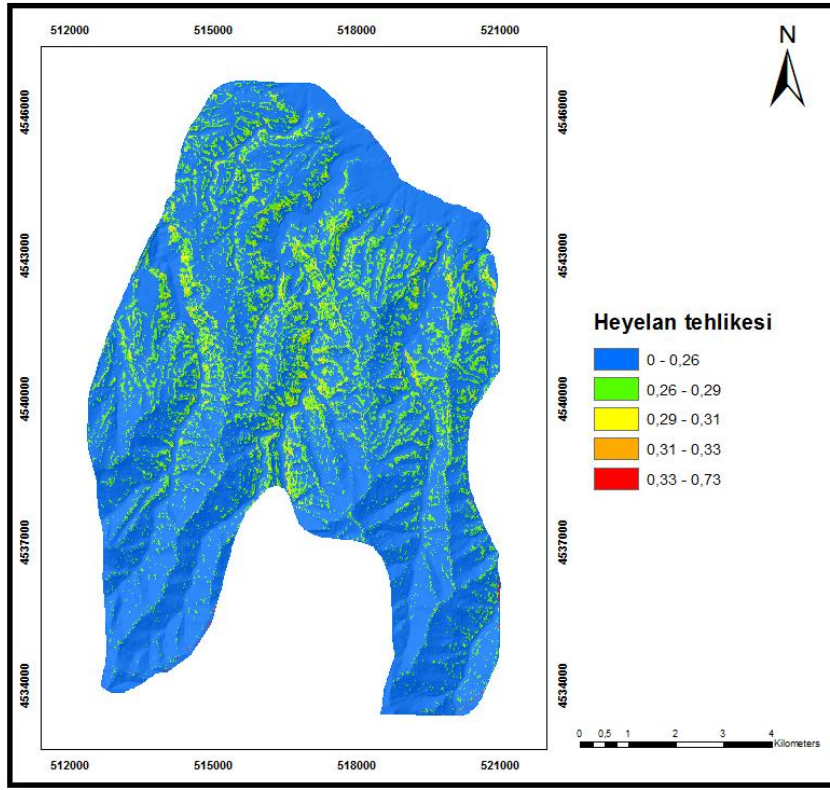
Şekil 3.36. 250 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



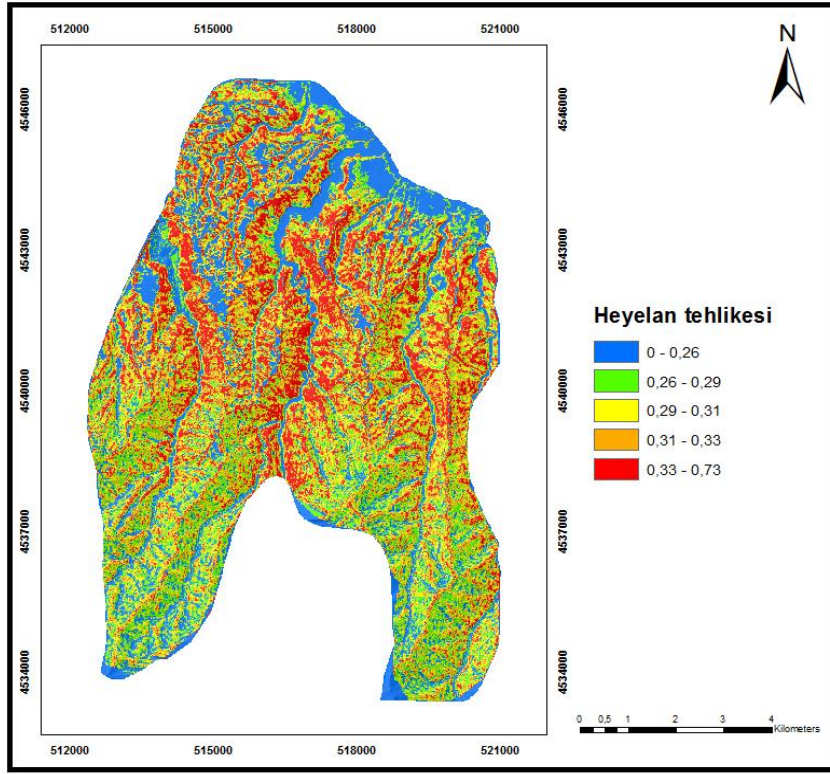
Şekil 3.37. 250 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası



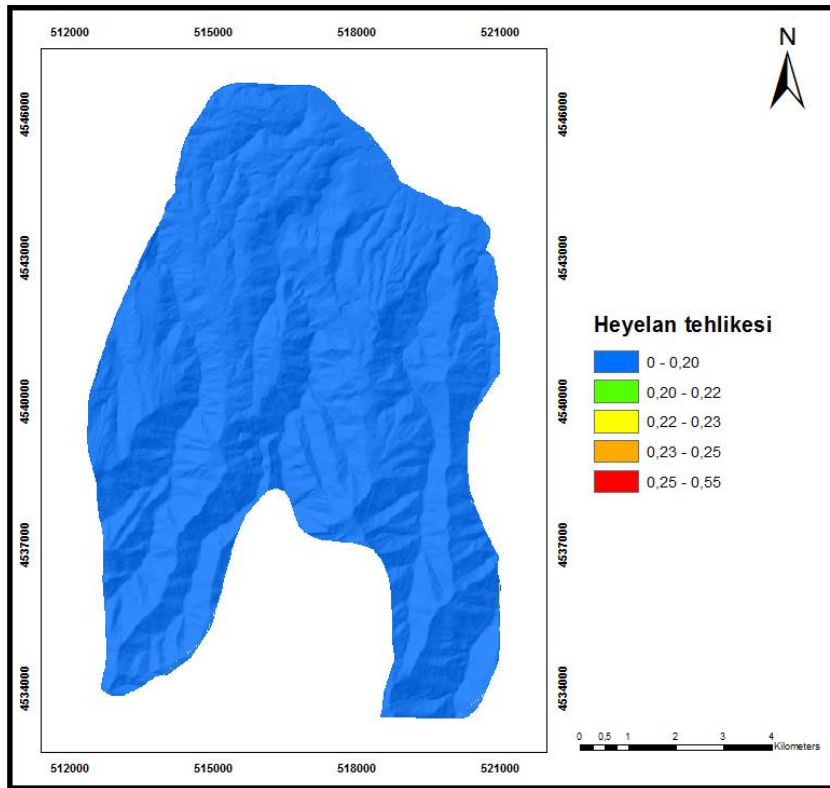
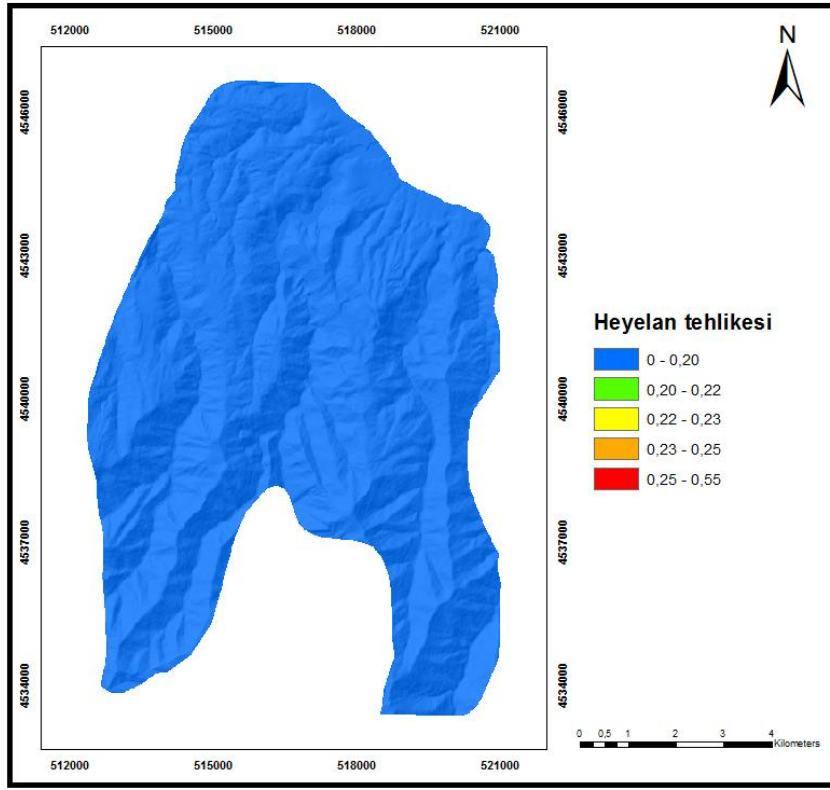
Şekil 3.38. 500 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



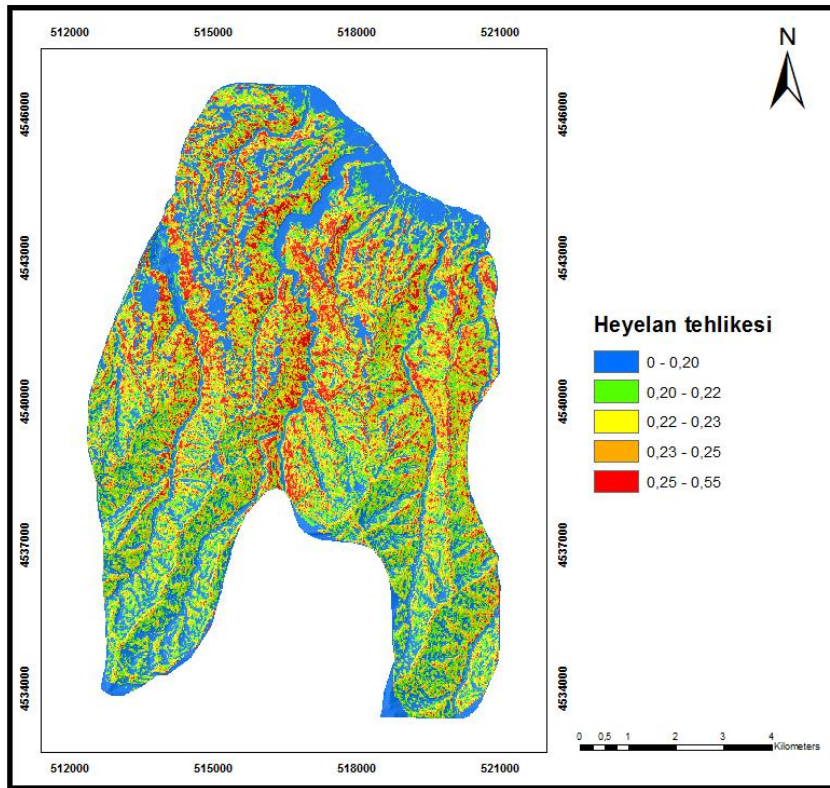
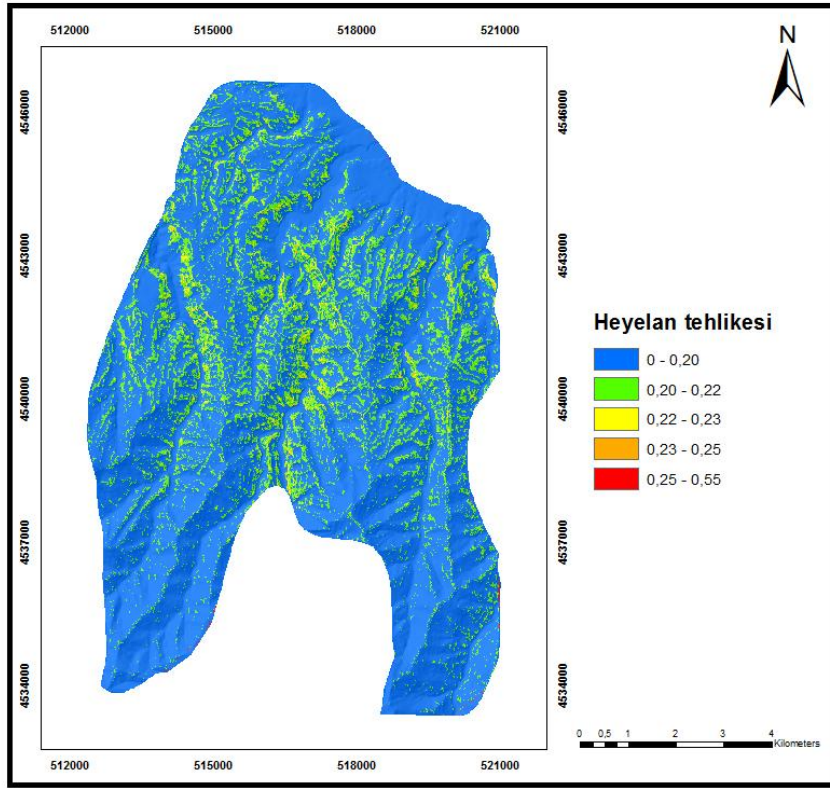
Şekil 3.39. 500 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



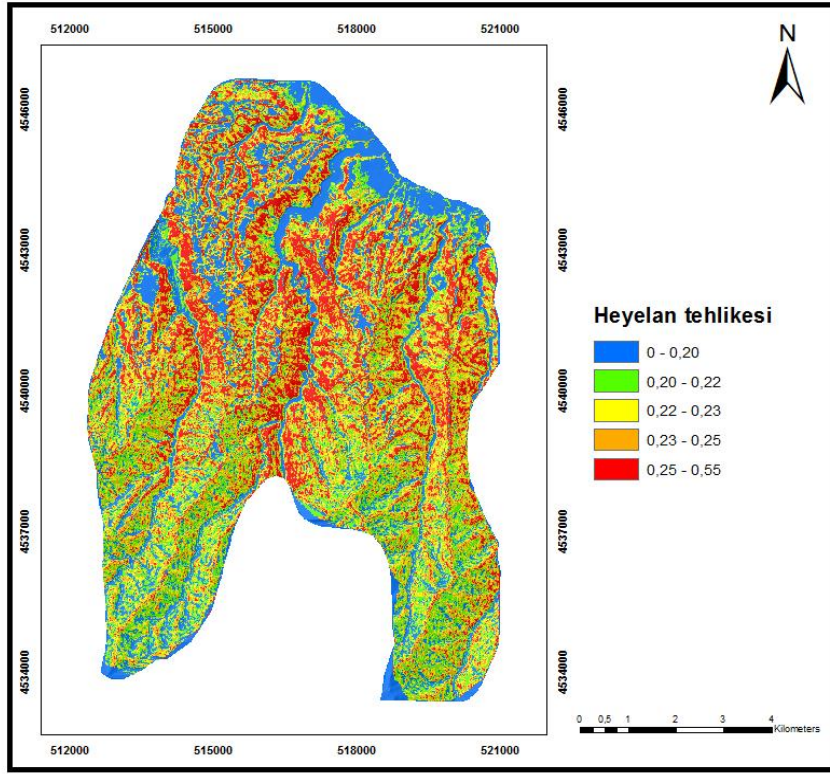
Şekil 3.40. 500 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritalası



Şekil 3.40. 1000 m²'den büyük 1 ve 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



Şekil 3.41. 1000 m²'den büyük 5 ve 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre olası heyelan tehlike haritaları



Şekil 3.42. 1000 m²'den büyük 20 yıllık aşılma olasılık değerine göre olası heyelan tehlike haritası

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında ulaşılan sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1. İnceleme alanına ait çok zamanlı heyelan envanter haritalaması ilk kez gerçekleştirilmiş, bu kapsamda alanda 125 adet heyelan lokasyonu belirlenmiştir. Heyelan envanter çalışmasında Google Earth uydu görüntüleri (2000-2018) ve arşiv kayıtlarından faydalanılmış, arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alanda haritalanan heyelanların kayma derinliklerinin 3 ile 5 m arasında değiştiği görülmüştür. Litolojik birimlerin homojen dağılması nedeniyle söz konusu akma ve sığ kaymalar volkano-klastik birimler içinde yüksek ve çok yüksek derecede ayrılmış zonlarda görülmekte olup, genellikle 30°-38° eğim aralığında yoğunlaşmıştır.
2. Heyelan duyarlılık değerlendirmesi için fiziksel veri tabanlı Shalstab matematiksel modeli kullanılmış, istatistiksel yöntemlerden olan Lojistik Regresyon ve Destek Vektör Makineleri ile elde edilen duyarlılık haritalarıyla karşılaştırılmıştır. Duyarlılık değerlendirmesi için heyelana neden olan hazırlayıcı parametrelerden olan jeoloji verisi ve sayısal yükseklik modelinden üretilen yamaç eğimi, yamaç yönelimi, plan ve profil yamaç eğriselliği, topoğrafik nemlilik indeksi, akarsu güç indeksi parametreleri kullanılmıştır.
3. Fiziksel tabanlı “Shalstab” matematiksel modeli ile elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının %20,61’i çok düşük, %24,56’sı düşük, %11,58’i orta, %24,44’ü yüksek ve %19,81’i çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür.
4. İstatistiksel yöntemlerden “Lojistik Regresyon” yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının %19,42’si çok düşük, %20,28’i düşük, %20,98’i orta, %19,22’si yüksek ve %20,11’i çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür.
5. İstatistiksel yöntemlerden bir makine öğrenmesi olan “Destek Vektör Makineleri” yöntemi ile elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının %19,96’sı çok düşük, %19,98’i düşük, %17,97’si orta, %22,51’i yüksek ve %19,58’i çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında yer aldığı görülmüştür.
6. Elde edilen duyarlılık haritalarının performanslarını karşılaştırmak amacıyla işlem karakteristik eğrisi (ROC) altındaki alan (EAA) yaklaşımı kullanılmıştır. Eğri altında kalan alan değerleri Shalstab matematiksel modeli için 0.933, LR yöntemi için 0.977

ve DVM yöntemi için 0.975 olarak bulunmuştur. Doğruluk değerlendirmesi sonucu tüm yöntemlerin yüksek başarı derecesine sahip olduğu görülmüştür.

7. Heyelan tehlike haritalarının hazırlanması için, heyelanların zamansal ve alansal olabilirlikleri kesikli ve sürekli yoğunluk fonksiyonları ile hesaplanmıştır.
8. Aşırı yağışların tetiklemeyle gelişen heyelanların zamansal olasılıkları için meteoroloji verileri analiz edilmiş, bunun sonucunda 4 günlük kümülatif yağışların 157,8 mm'ye ulaştığı anda heyelanların oluştuğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla frekans dağılımları 4 günlük kümülatif yağış değerleriyle yapılmış, en iyi dağılımın Frechet 3P olduğu görülmüş, tekrarlanma aralığı 3 yıl olduğu hesaplanmıştır. Poisson dağılımı ile 1, 2, 5, 10 ve 20 yıllık aşılma olasılığı hesaplanmıştır.
9. Heyelanların alansal olabilirliği için büyüklük-frekans ilişkisi irdelenmiştir. 250, 500 ve 1000 m²'den daha büyük alanlar için olma olasılıkları güç yasasına ait Frechet dağılımı ile bulunmuş, sırasıyla 0.90, 0.74 ve 0.56 değerleri elde edilmiştir.
10. Shalstab ve LR yöntemleri ile hazırlanan duyarlılık haritalarının altlık olarak kullanılmasıyla, zamansal ve alansal olasılıklar birlikte değerlendirilerek tehlike haritaları üretilmiştir. Her iki yöntemle alansal ve zamansal olasılık gerçekleşme yüzdeleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Heyelan tehlike haritalarının alansal ve zamansal olasılık gerçekleşme yüzdeleri

Yöntem	Alansal Olasılık	Tehlike Sınıfı	Zamansal Olasılık				
			1 Yıl	2 Yıl	5 Yıl	10 Yıl	20 Yıl
Shalstab	> 250 m ²	Çok düşük	20.61	20.61	20.61	20.61	20.61
		Düşük	79.39	79.39	24.56	24.56	12.85
		Orta	0	0	35.02	11.58	11.72
		Yüksek	0	0	19.81	23.44	11.58
		Çok yüksek	0	0	0	19.81	43.24
	> 500 m ²	Çok düşük	20.61	20.61	20.61	20.61	20.61
		Düşük	79.39	79.39	24.56	24.56	12.85
		Orta	0	0	35.02	11.58	23.30
		Yüksek	0	0	19.81	23.44	0
		Çok yüksek	0	0	0	19.81	43.24
	> 1000 m ²	Çok düşük	20.61	20.61	20.61	20.61	20.61
		Düşük	79.39	79.39	24.56	24.56	12.85
		Orta	0	0	35.02	11.58	23.30
		Yüksek	0	0	19.81	23.44	0
		Çok yüksek	0	0	0	19.81	42.24
Lojistik Regresyon	> 250 m ²	Çok düşük	100	99.95	80.54	27.34	19.42
		Düşük	0	0.01	16.73	24.16	20.28
		Orta	0	0.02	2.49	21.72	20.98
		Yüksek	0	0.02	0.19	15.93	19.22
		Çok yüksek	0	0	0.05	10.85	20.10
	> 500 m ²	Çok düşük	100	99.95	80.54	27.34	19.42
		Düşük	0	0.01	16.73	24.16	20.28
		Orta	0	0.02	2.49	21.72	20.98
		Yüksek	0	0.02	0.19	15.93	19.22
		Çok yüksek	0	0	0.05	10.85	20.10
	> 1000 m ²	Çok düşük	100	99.95	80.54	27.34	19.42
		Düşük	0	0.01	16.73	24.16	20.28
		Orta	0	0.02	2.49	21.72	20.98
		Yüksek	0	0.02	0.19	15.93	19.22
		Çok yüksek	0	0	0.05	10.85	20.10

5. ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlara göre bazı öneriler sunulmuştur:

1. Çalışma alanında daha büyük ölçekli (1:5.000-1:10.000) topoğrafik haritalar ile sayısal yükseklik modelleri oluşturularak daha ayrıntılı heyelan duyarlılık haritaları üretilebilir.
2. Daha yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları (drone, lidar vb. yardımıyla) kullanılarak daha fazla heyelan yeri tespit edilebilir.
3. Üretilen heyelan tehlike haritalarının doğruluğu zaman içinde bölgede meydana gelecek heyelanlar ile gözlemlenebilir.
4. Ülkemizde heyelan tehlike haritalama çalışmaları kısıtlı sayıdadır. Yapılan bu çalışma bölgede yerleşim ve tarım için uygun alanların seçiminde önem arz etmektedir.
5. Yağış verilerinin düzenli takibi ile heyelanların zamansal olabilirlikleri sürdürülebilir.
6. Zamanla meydana gelecek heyelanların alansal büyüklükleri hesaplanarak alansal olasılıkları devam ettirilebilir.
7. Çalışma alanında üretilmek istenen heyelan risk haritası için altlık olarak kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akçalı, E., 2011. Heyelan Yağış İlişkisi Analizi ve Modellemesi; Trabzon İli Örneği, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Akçalı, E. ve Arman, H., 2013. Yağış Eşiği Bazlı Heyelan Erken Uyarı Sistem Önerisi: Trabzon İli Örneği, İMO Teknik Dergi, 396, 6307-6332.
- 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.
- Akgün, A. ve Türk, N., 2010. İki ve Çok Değişkenli İstatistik ve Sezgisel Tabanlı Heyelan Duyarlılık Modellerinin Karşılaştırılması: Ayvalık (Balıkesir, Kuzeybatı Türkiye) Örneği, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 34,2, 85-112.
- Akgun, A., 2012. A Comparison of Landslide Susceptibility Maps Produced by Logistic Regression, Multi-criteria Decision, and Likelihood Ratio Methods: A Case Study at Izmir, Turkey, Landslides, 9,93-106.
- Akgun, A. ve Erkan, E., 2016. Landslide Susceptibility Mapping by Geographical Information System-based Multivariate Statistical and Deterministic Models: In an Artificial Reservoir Area at Northern Turkey, Arabian Journal of Geosciences, 9,2, 1-15.
- Akgün, A., 2018. Bulanık Uyarlanabilir Rezonans Teoirisi (FuzzyART) Yöntemi Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Analizi: Tonya (Trabzon) Örneği, Gümüşfenbil, 8,1, 135-146.
- Akıncı, H., Doğan, S., Kılıçoğlu, C. ve Keçeci, S.B., 2010. Samsun İl Merkezinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2,3, 13-27.
- Aleotti, P. ve Chowdhury, R., 1999. Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58, 21-24.
- ASTM D2487-11, 2011. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)¹, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D3080/D3080M – 11, 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions¹, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM D422-63, 1998. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils¹, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D4318-17e1, 2017. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D7263-09, 2018. Standard Test Method for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Ayalew, L. ve Yamagishi, H., 2005. The Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains Central Japan, Geomorphology 65, 15–31.
- Ayhan, S. ve Erdoğan, Ş., 2014. Destek Vektör Makineleriyle Sınıflandırma Problemlerinin Çözümü İçin Çekirdek Fonksiyonu Seçimi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 9,1, 175-198.
- Baltacı, H., Şen, Ö.L. ve Karaca, M., 2010. Doğu Karadeniz Bölgesi Heyelan-Yağış İlişkisinin İncelenmesi ve Minimum Eşik Değerlerin Belirlenmesi, Uluslararası Katılımlı 1. Meteoroloji Sempozyumu, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı: 356-363.
- Bektaş, O., Yılmaz, C., Taslı, K., Akdağ, K. ve Özgür, S., 1995. Cretaceous Rifting of The Eastern Pontide Carbonate Platform (NE Turkey): The Formation of Carbonates Breccias and Turbidites as Evidences of a Drowned Platform, Geologia, 57,1-2, 233-244.
- Bouranane, H., Guettouche, M. S., Bouhaded, Y. ve Braham, M., 2016. Landslide Hazard Mapping in the Constantine City Northeast Algeria Using Frequency Ratio, Weighting Factor, Logistic Regression, Weights of Evidence, and Analytical Hierarchy Process Methods, Arabian Journal of Geosciences, 9,154, 1-24.
- BS 1377-2:4.3, 1990. Liquid Limit Cone Penetrometer Method, British Standard Institution, London.
- Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. ve Duman, T.Y., 2005. Susceptibility Assessment of Shallow Earthflows Triggered by Heavy Rainfall at Three Catchment by Logistic Regression Analyses, Geomorphology, 72, 1-4, 250-271.
- Canik, B., 1997. Mühendislik Jeolojisi, Ankara: A.Ü.F.F Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara.
- Clark, J.C., Brabb, E.E., Greene, H.G. ve Ross, D.C., 1984. Geology of Point Reyes Peninsula and Implications for San Gregorio Fault History, Pacific Section SEPM, 38, 67-86.

- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. ve Boehner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4., *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Corominas, J. ve Moya, J., 2008. A Review of Assessing Landslide Frequency for Hazard Zoning Purposes, *Engineering Geology*, 102, 193-213.
- Crovelli, A. R., 2000. Probability Models for Estimation of Number and Costs of Landslides, USGS.
- Çınlar, E., 2011. Probability and Stochastics, Springer, Princeton University USA.
- Çil, E., 2009. Erdemli (Mersin) Yöresinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Olası Tehlike Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dagdelenler, G., Nefeslioglu, H.A. ve Gokceoglu, C., 2016. Modification of Seed Cell Sampling Strategy for Landslide Susceptibility Mapping: An Application From the Eastern Part of the Gallipoli Peninsula (Canakkale, Turkey), *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 575-590.
- Dağ, S. ve Bulut, F., 2012. Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanmasına Bir Örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye), *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36,1, 35-62.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. ve Paudyal, P., 2008. Predictive Modeling of Rainfall-induced Landslide Hazard in the Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights of Evidence, *Geomorphology*, 102, 496-510.
- Davis, J. ve Blesius, L., 2015. A Hybrid Physical and Maksimum Entropy Landslide Susceptibility Model, *Entropy Journal*, 17, 4271-4292.
- Deb, S.K. ve El-Kadi, A.I., 2009. Susceptibility Assessment of Shallow Landslides on Oahu Hawaii Under Extreme-Rainfall Events, *Geomorphology*, 108, 219-233.
- Dietrich, W.E. ve Montgomery, D.R., 1998. Shalstab: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential, Technical Report, Corvallis, OR: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement.
- Evans, M. ve Rosenthal, J.S., 2010. Probability and Statistics: The Science of Uncertainty, Second Edition, W.H. Freeman and Co., New York.
- Eyuboglu, Y., Bektaş, O., Seren, A., Maden, N., Jacoby, W.R. ve Özer, R., 2006. Three Axial Extensional Deformation and Formation of the Liassic Rift Basins in the Eastern Pontides (NE Turkey), *Geologica Carpathica*, 57,5, 337-346.
- Fawcett, T., 2006a. ROC Graphs with Instance-Varying Costs, *Pattern Recognition Letters*, 27, 882-891.

- Fawcett, T., 2006b. An Introduction to ROC Analysis, Pattern Recognition Letters, 27, 861-874.
- Foumelis, M., Lekkas, E. ve Parcharidis, I., 2004. Landslide Susceptibility Mapping by GIS- Based Qualitative Weighting Procedure in Corinth Area, Bulletin of the Geological Society of Greece, 36, 904-912.
- Fourniadis, I.G., Liu, J.G. ve Mason, P.J., 2007. Landslide hazard assessment in the Three Gorges area, China, using ASTER imagery: Wushan-Badong, Geomorphology, 84, 126-144.
- Gökçeoğlu, C. ve Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan Duyarlılık Haritalarını Hazırlanmasında Kullanılan Parametrelere İlişkin Belirsizlikler, Yerbilimleri (Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni), 23, 189-206.
- Grinstead, C.M. ve Snell, J. L, 2006. Grinstead & Snell's Introduction to Probability, Second Edition, American Mathematical Society.
- 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., Cardinali, M., Reichenbach, P. ve Carrara, A., 2000. Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy, Environmental Management 25,3, 247-363.
- Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L. ve Reichenbach, P., 2002. Power-law Correlations of Landslide Areas in Central Italy, Earth and Planetary Science Letters, 195, 169-183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. ve Ardizzone, F., 2005. Probabilistic Landslide Hazard Assessment at the Basin Scale, Geomorphology, 72, 272-299.
- Guzzetti, F., 2006. Landslide Hazard and Risk Assessment, Doktora Tezi, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, University of Bonn, Bonn.
- Hadji, R., Boumazbeur, A., Limani, Y., Baghem, M., Chouabi, A. ve Demdoum, A., 2013. Geologic, Topographic and Climatic Controls in Landslide Hazard Assessment Using GIS Modeling: A Case Study of Souk Ahras Region, NE Algeria, Quaternary International, 302, 224-237.
- Hansen, A., 1984. Landslide Hazard Analysis. In: Brunsen, D., Prior, D.B. (Eds.), Slope Instability, John Wiley and Sons, New York, 523-602.
- Hosmer, D.W. ve Lemeshow, S., 1989. Applied Regression Analysis, Wiley, New York.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S. ve Sturdivant, R. X., 2013. Applied Logistic Regression, Third edition, Wiley Series in Probability and Statistics, Hoboken, New Jersey.

- Jones, D.K.C., 1992. Landslide Hazard Assessment in the Context of Development, In: McCall, G.J.H., Laming, D.J.C., Scott, S.C. (edc) Geohazards, AGID Report Series, 117-141, Springer, Dordrecht.
- Kartal, M., 1998. Hipotez Testleri, 103-138, Şafak Yayınevi, Erzurum.
- Katz, O. ve Aharanov, E., 2006. Landslides in Vibrating Sand Box: What Controls Types of Slope Failure and Frequency Magnitude Relations, Earth and Planetary Science Letters, 247, 280-294.
- Kavzoglu, T., Sahin E.K. ve Colkesen, I., 2014. Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis, Support Vector Machines, and Logistic Regression, Landslides, 11,3, 425-439.
- Keles, F. ve Nefeslioglu, H.A., 2021. Infinite slope stability model and steady-state hydrology-based shallow landslide susceptibility evaluations: The Guneysu catchment area (Rize, Turkey), Catena, 200, 105161.
- Ketin, İ., 1951. Bayburt Bölgesinin Jeolojisi, Seri B 16, 113-127, İ.Ü. Fen Fakültesi Mecmuası, İstanbul.
- Ketin, İ., 1966. Anadolu'nun Tektonik Birlikleri, Maden ve Tetkik Arama Dergisi, 66, 23-24.
- Lee, S., 2005. Application of Logistic Regression Model and Its Validation for Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Remote Sensing Data, Int J Remote Sens, 26, 1477-1491.
- Lee, S., Won, J.S., Jeon, S.W., Park, I. ve Lee, M.J. 2015. Spatial Landslide Hazard Prediction Using Rainfall Probability and a Logistic Regression Model, Mathematical Geoscience, 47, 565-589.
- Luca, F., D'Ambrosio, D., Robustelli, G., Rongo, R. ve Spatora, W., 2014. Integrating Geomorphology, Statistic and Numerical Simulations for Landslide Invasion Hazard Scenarios Mapping: An example in Sorrento Peninsula (Italy), Computers&Geosciences, 67, 163-172.
- Malamud, B.D. ve Turcotte, D. L., 1999. Self-Organized Criticality Applied to Natural Hazards, Natural Hazards, 20:2, 93-116.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. ve Reichenbach, P., 2004. Landslides Inventories and Their Statistical Properties, Earth Surface Processes and Landforms, 29, 687-711.
- Michel, G. P., Kobiyama, M. ve Goerl, R. F., 2014. Comparative Analysis of SHALSTAB and SINMAP for Landslide Susceptibility Mapping in the Cunha River Basin, Southern Brazil, Journal of Soils and Sediments, 14, 1266-1277.
- Monroe, J. ve Wicander, R., 2007. Fiziksel Jeoloji Yeryuvarı'nın Yapısı, K. Dirik ve M. Şener, 5. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

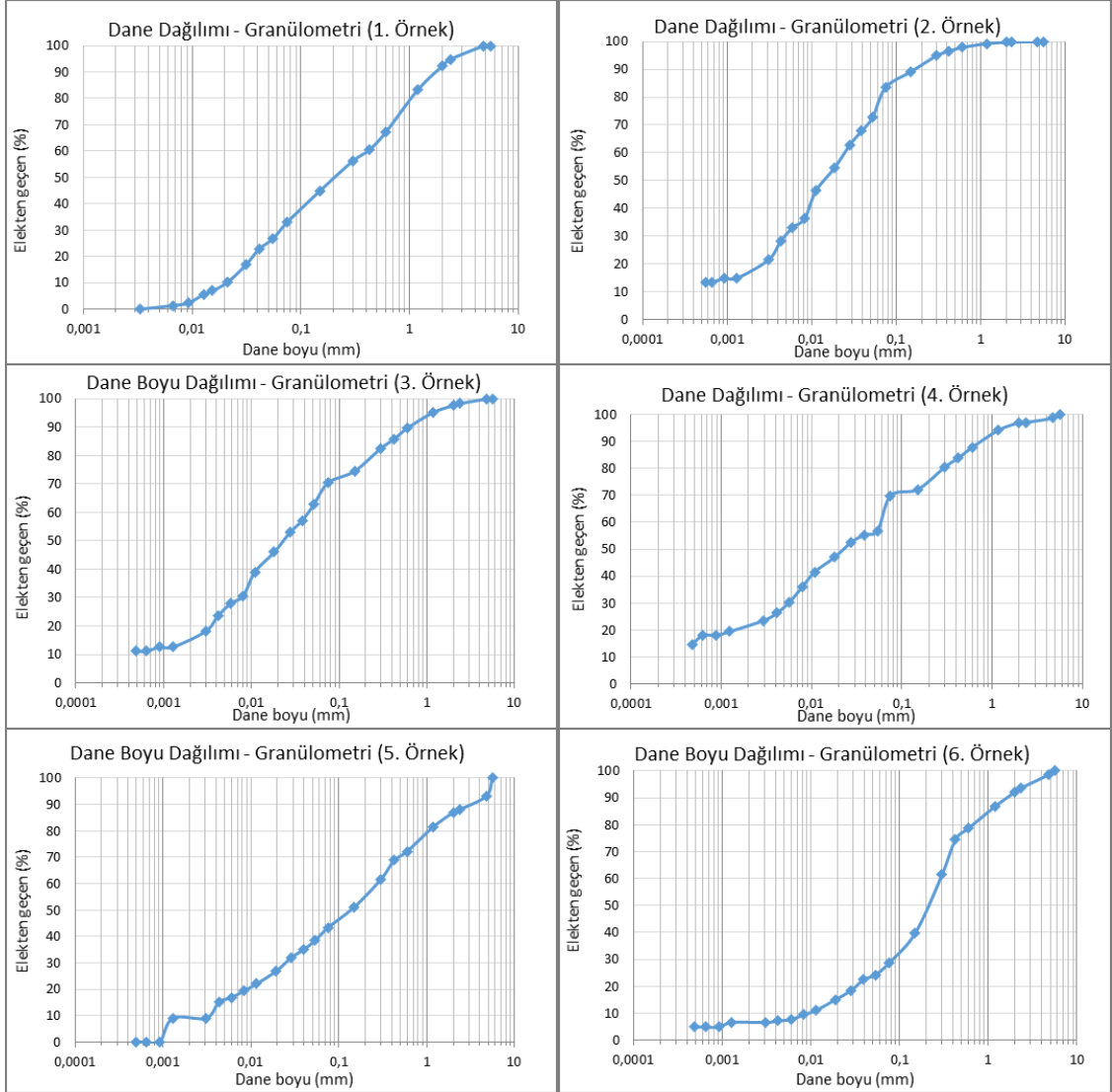
- Moore, I.D., Grayson, R.B. ve Ladson, A.R., 1991. Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications, Hydrological Process, 5, 3-30.
- Nandi, A. ve Shakoor, A., 2010. A GIS-based Landslide Susceptibility Evaluation Using Bivariate and Multivariate Statistical Analyses, Engineering Geology, 110, 11–20.
- Nefeslioglu, H.A., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A.S. ve Duman, T.Y., 2010. Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey, Mathematical Problems in Engineering, 2010, 1-15.
- Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. ve Gorum, T., 2011. Medium-scale Hazard Mapping for Shallow Landslide Initiation: the Buyukkoy Catchment Area (Cayeli, Rize, Turkey), Landslides, 8,4, 459–483.
- Nery, T.D. ve Vieira, B.C., 2015. Susceptibility to Shallow Landslides in a Drainage Basin in the Serra do Mar, Sao Paulo, Brazil, Predicted Using the SINMAP Mathematical Model, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74, 369-378.
- Neupane, K.N. ve Piantanakulchai, M., 2006. Analytic Network Process Model for Landslide Hazard Zonation, Engineering Geology, 85, 281-294.
- Okalp, K. ve Akgün, H., 2016. National Level Landslide Susceptibility Assessment of Turkey Utilizing Public Domain Dataset, Environmental Earth Science, 75:847, 1-21.
- Özkan, Y., 2008. Veri Madenciliği Yöntemleri, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Pekcan, N., 1996. Karadeniz Bölgesi Heyelanları ve Önlenmesi Yolunda Önerilerimiz, İ.Ü. Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Dergisi, 4, 137-141.
- Pfeil-Mccullough, E., Bain, D.J., Bergman, J. ve Crumrine, D., 2015. Emerald Ash Borer and the Urban Forest: Changes in Landslide Potential due to Canopy Loss Scenarios in the City of Pittsburgh, PA, 536, 538-545.
- Pradhan, B. ve Lee, S., 2007. Utilization of Optical Remote Sensing Data and GIS Tools for Regional Landslide Hazard Analysis Using an Artificial Neural Network Model, Earth Science Frontiers, 14,6, 143-152.
- Pradhan, B., 2010. Remote sensing and GIS-based Landslide Hazard Analysis and Cross-Validation Using Multivariate Logistic Regression Model on Three Test Areas in Malaysia, Advances in Space Research, 45, 1244-1256.
- Razifard, M., Shoaie, G. ve Zare, M., 2019. Application of Fuzzy Logic in the Preparation of Hazard Maps of Landslides Triggered by the Twin Ahar- Varzeghan Earthquakes, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 78, 223-245.
- Remondo, J., Gonzalez, A., Diaz de Teran, J.R., Cendrero, A., Fabbri, A. ve Cheng, C.F., 2003. Validation of Landslide Susceptibility Maps: Examples and Applications From a Case Study in Northern Spain, Natural Hazards, 30,3, 437–449.

- Rossi, M. ve Malamud, B.D., 2014. Prototype SW for determination of landslide statistics from inventory maps (LStats). Landslide modelling and tools for vulnerability assessment preparedness and recovery management (LAMPRE), Seventh Framework Programme Collaborative Project, WP 5. Research and tools for triggered event landslide mapping, 19 p.
- Saleem, N., Huq, Md. E., Twumasi, N.Y.D., Javed, A. ve Sajjad, A., 2019. Parameters Derived from and/or Used with Digital Elevation Models (DEMs) for Landslide Susceptibility Mapping and Landslide Risk Assessment: A Review, International Journal of Geo-Information, 8, 545.
- Soeters, R., ve Van Westen, C.J., 1996. Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation, in Landslides: Investigation and Mitigation, edited by A. K. Turner and R. L. Schuster, Transp. Res. Board Spec. Rep. 247,129-177, Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Son, J., Suh, J. ve Park, H.D., 2016. GIS-based Landslide Susceptibility Assessment in Seoul, South Korea Applying in Radius of Influence to Frequency Ratio Analysis, Environmental Earth Science, 75:310, 1-16.
- Song, O., Hu, W. ve Xie, W., 2002. Robust Support Vector Machine with Bullet Hole Image Classification, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews, 32,4, 440-448.
- Suzen, M.L. ve Doyuran, V., 2004. Data Driven Bivariate Landslide Susceptibility Assessment Using Geographical Information Systems: A Method and Application to Akarsuyu Catchment, Turkey, Engineering Geology, 71, 3-4, 303-321.
- Şahin, E.K., 2018. Heyelan Duyarlılık Haritası İçin Adımsal Regresyona Dayalı Faktör Seçme Yönteminin Etkinliğinin Araştırılması, Harita Dergisi, 159, 1-15.
- Şahin, E.K., Çölkesen, İ., Akgün, A. ve Aydınöğlü, A.Ç., 2021. Heyelan Duyarlılık Haritaları Üretimi için R Programlama Dili Yardımıyla ARCGIS Ara Yüzlerinin Geliştirilmesi (Tübitak Projesi, Proje No: 118Y090), Bolu.
- Tarhan, F., 1992. Doğu Karadeniz Heyelanlarına Genel Bir Bakış, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Kasım, KTÜ Trabzon, Bildiriler Kitabı, 38-63.
- Tekin, S., 2019. Göksu Nehri Havzasının Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Jeomorfometrik Analizi ve Niceliksel Heyelan Olası Tehlike Değerlendirmesi, Doktora Tezi, Ç.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J. ve Soeters, R., 2006. Landslide Hazard and Risk Zonation-Why Is It Still So Difficult?, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65, 167-184.
- Vapnik, V., 1995. The Nature of Statistical Learning Theory, Springer, New York.

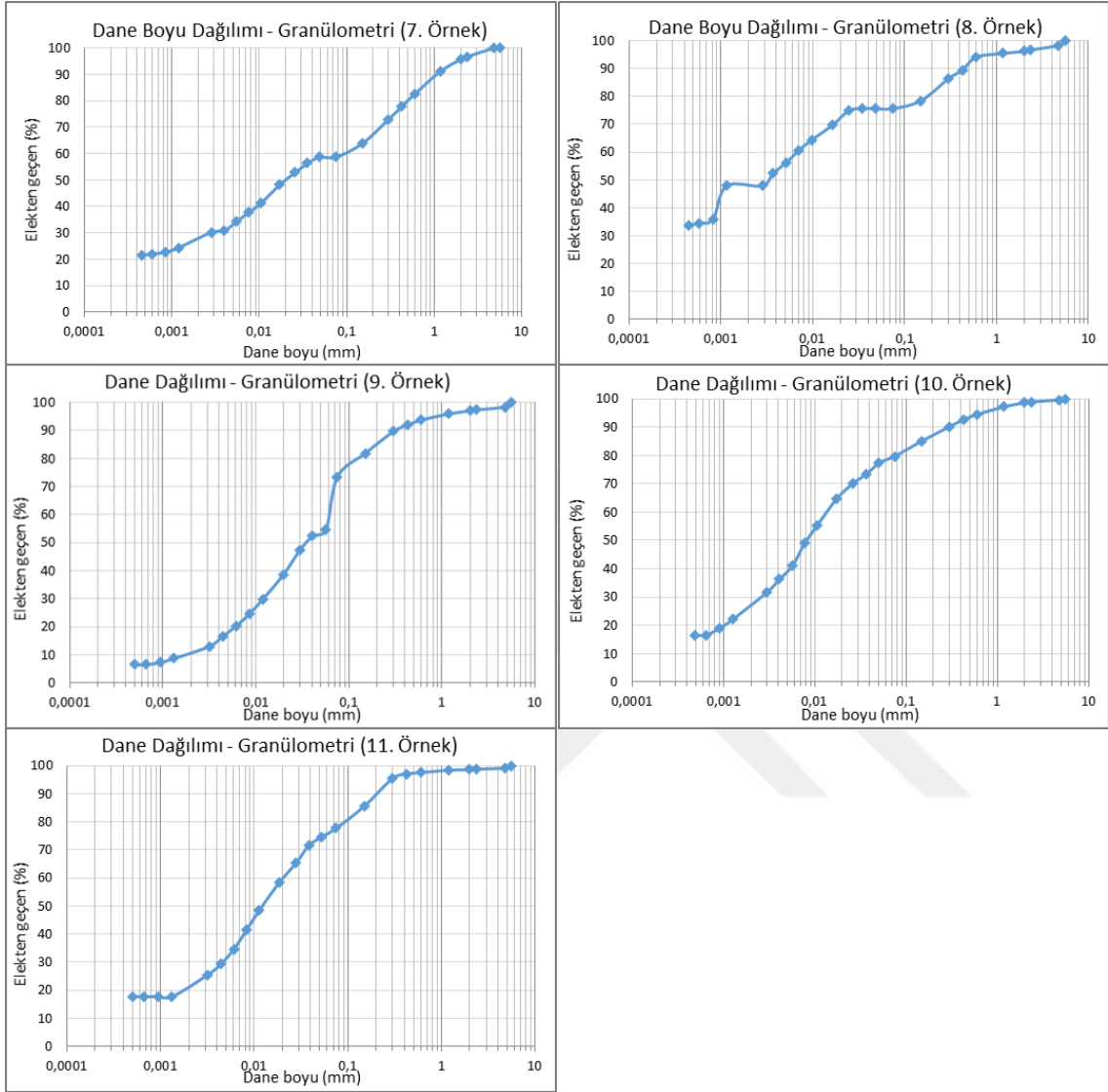
- Varnes, D.J., 1958. Landslide Types and Processes, Landslide and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report 29, 20-45, NAS-NRC Publications 544, Washington D.C.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide Hazard Zonation : A Review of Principles and Practice, Unesco, Paris.
- Wieczorek, G.F., 1984. Preparing A Detailed Landslide-Inventory Map for Hazard Evaluation and Reduction, Bulletin Association of Engineering Geologists, 21,3, 337-342.
- Wilson, J. P. ve Gallant, J. C., 2000. Terrain Analysis: Principles and Applications, John Wiley and Sons, New York.
- Wu, Y., Li, W., Wang, Q., Yang, D., Xing, M., Pei, Y. ve Yan, S., 2016. Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio, Statistical Index and Certainty Factor Models for Gangu County, China, Arabian Journal of Geosciences, 9:84, 1-16.
- Yakut, E., 2012. Veri Madenciliği Tekniklerinden C5.0 Algoritması, Destek Vektör Makineleri ile Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırma Başarılarının Karşılaştırılması: İmalat Sektöründe Bir Uygulama, Doktora Tezi, A.Ü., Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
- Yalçınır, N.,1996. Karadeniz Bölgesi Heyelanları ve Önlenmesi Yolunda Önerilerimiz, İstanbul Üniversitesi Coğrafya Dergisi, 4, 137-141.
- Yılmaz, I., 2010. Comparison of Landslide Susceptibility Mapping Methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional Probability, Logistic Regression, Artificial Neural Networks, and Support Vector Machine, Environmental Earth Sciences, 61, 821-836.
- Yi-Min M., M.-S. Zhang, Wang, G. ve Sun, P., 2015. Landslide Hazards Mapping Using Uncertain Naive Bayesian Classification Method, Journal Central South University, 22, 3512-3520.
- URL-1, <http://www.besikduzu.gov.tr/cografi-yapi> T.C. Beşikdüzü Kaymakamlığı, Coğrafi Yapı. 26 Ocak 2020.
- URL-2, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>. 29 Eylül 2020.

7. EKLER

Ek şekil 1. Zemin örneklerine ait granülometri eğrileri



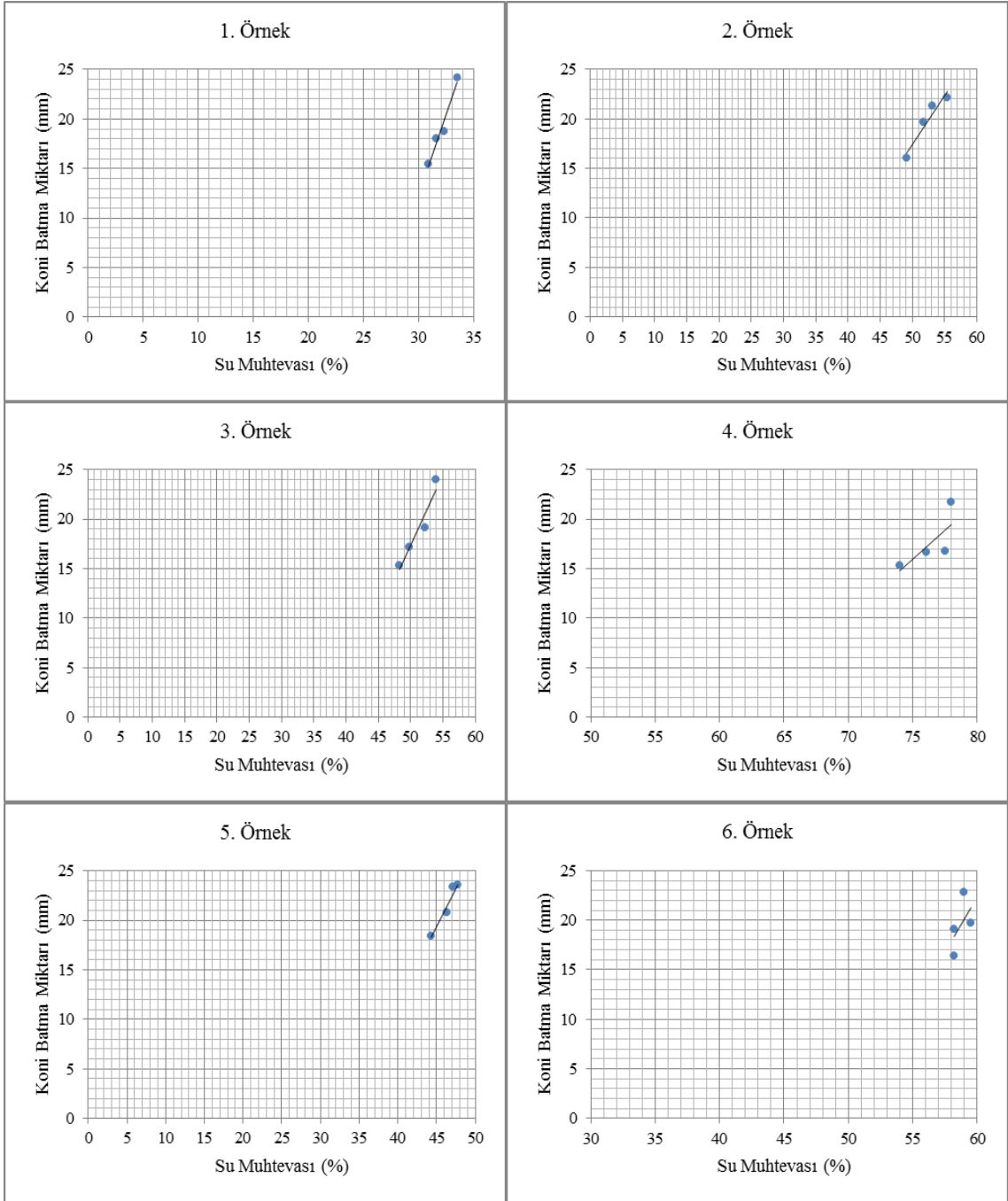
Ek şekil 1'in devamı



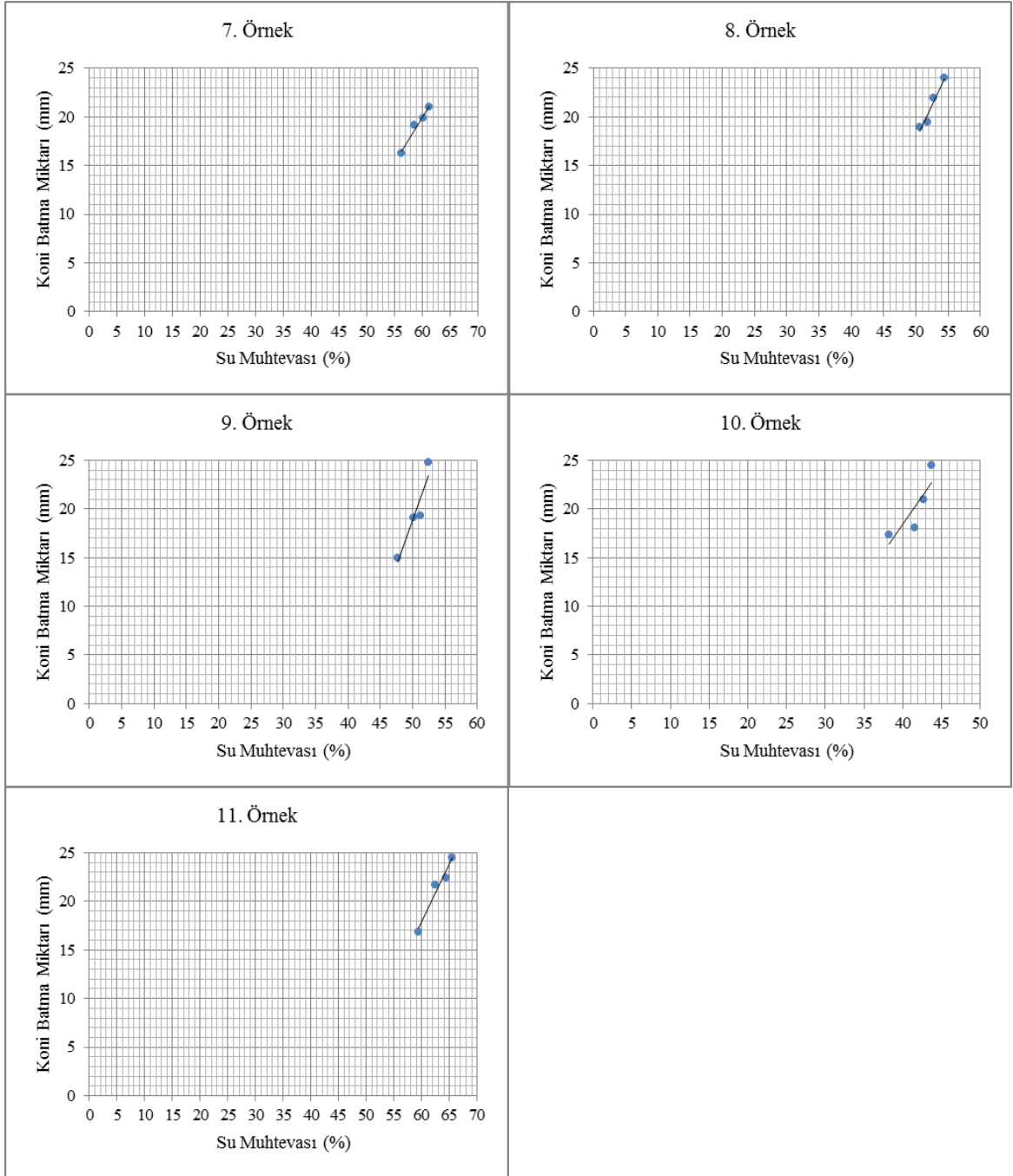
Ek tablo 1. Örneklere ait zemin türü yüzde değerleri

Zemin Türü				
	Kil	Silt	Kum	Çakıl
1. Örnek Yüzde (%)	0	26,7	65,7	7,6
2. Örnek Yüzde (%)	14,9	57,9	27	0,2
3. Örnek Yüzde (%)	13	50	35	2
4. Örnek Yüzde (%)	19	38	40	3
5. Örnek Yüzde (%)	9	29	49	13
6. Örnek Yüzde (%)	7	17	68	8
7. Örnek Yüzde (%)	24	35	37	4
8. Örnek Yüzde (%)	47,9	27,7	21,1	3,3
9. Örnek Yüzde (%)	8,7	45,8	42,5	3
10. Örnek Yüzde (%)	22,1	55,2	21,3	1,4
11. Örnek Yüzde (%)	17,7	56,9	24	1,4

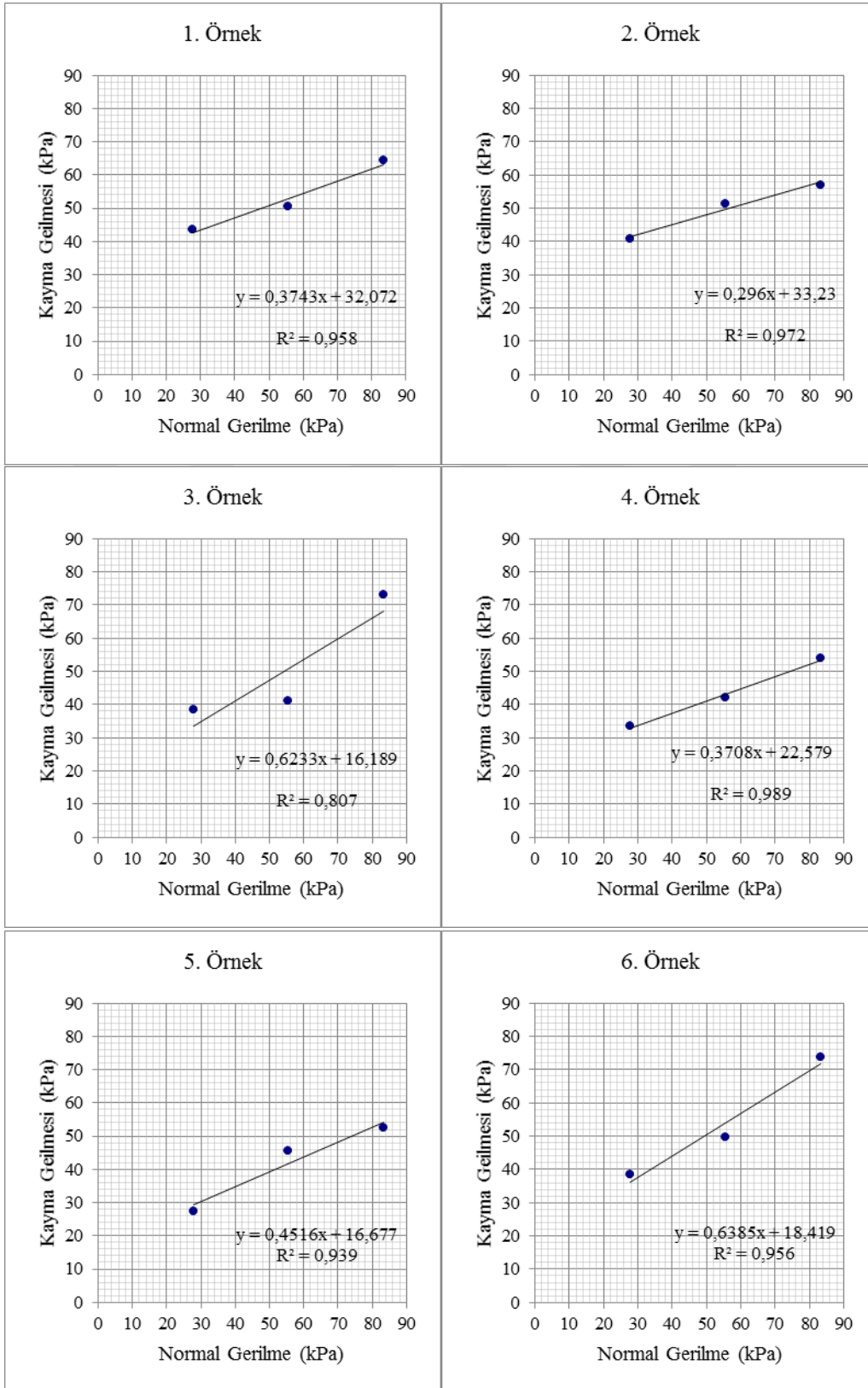
Ek şekil 2. Örneklere ait likit limit deneyi grafikleri



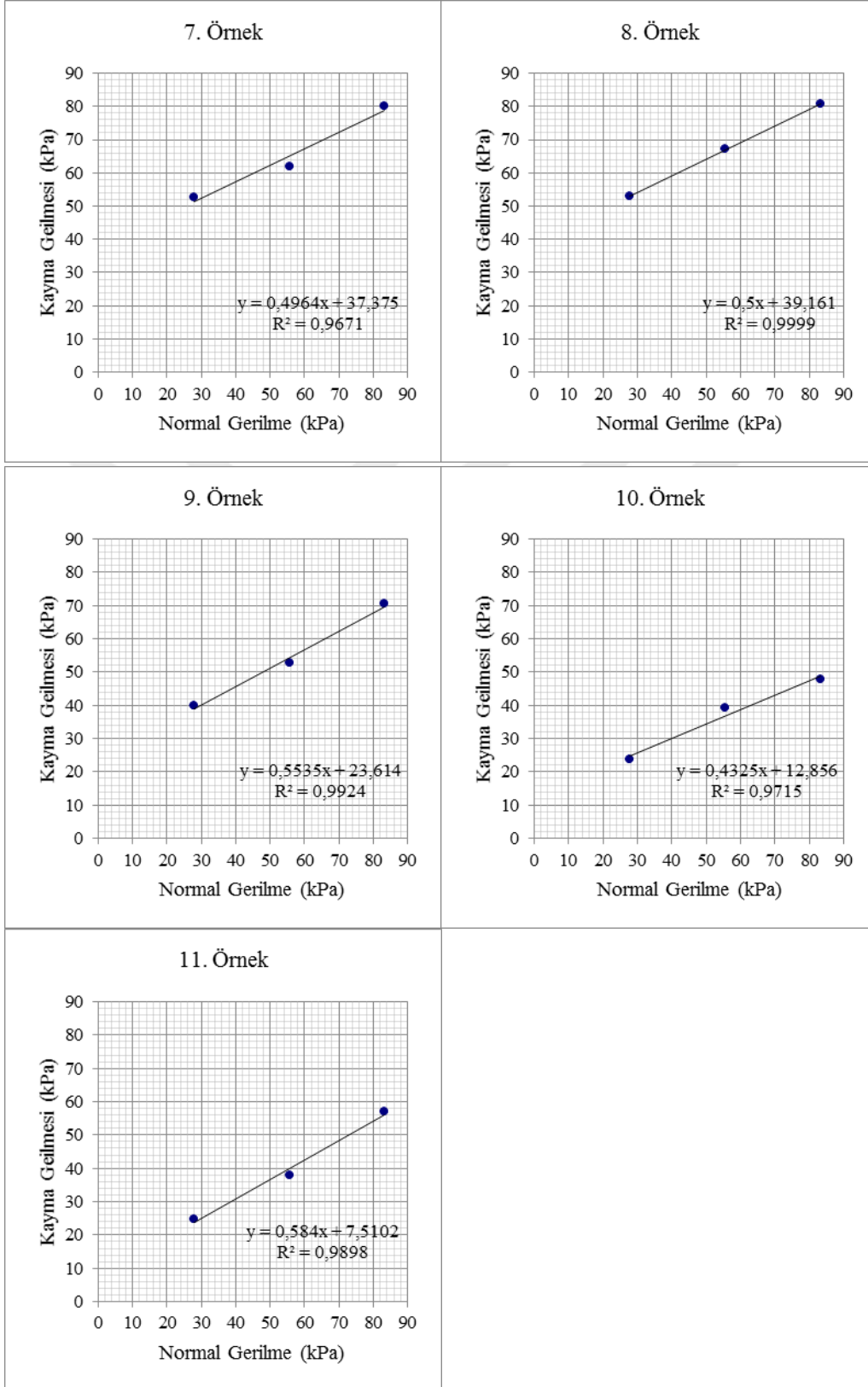
Ek Şekil 2'nin devamı



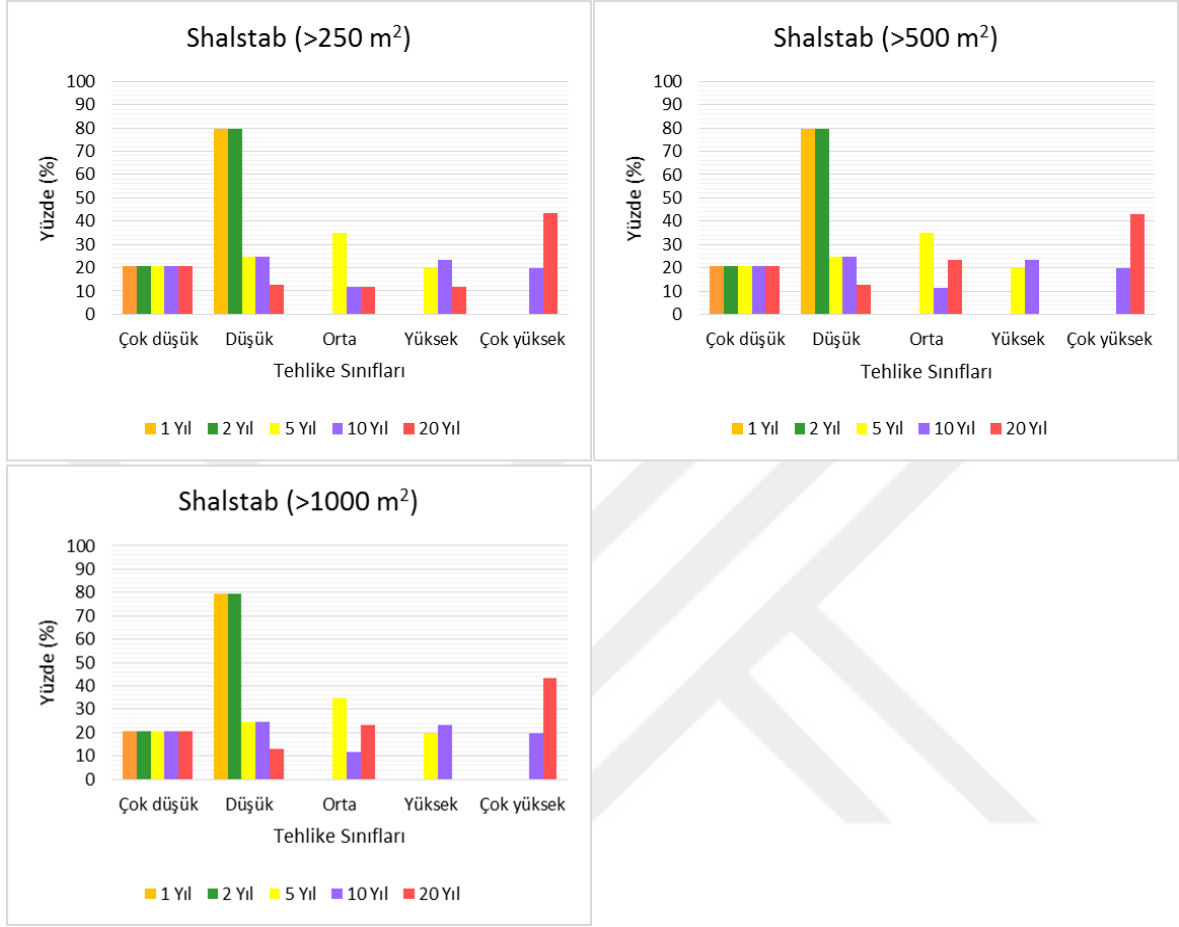
Ek şekil 3. Örneklere ait kesme kutusu deneyi grafikleri



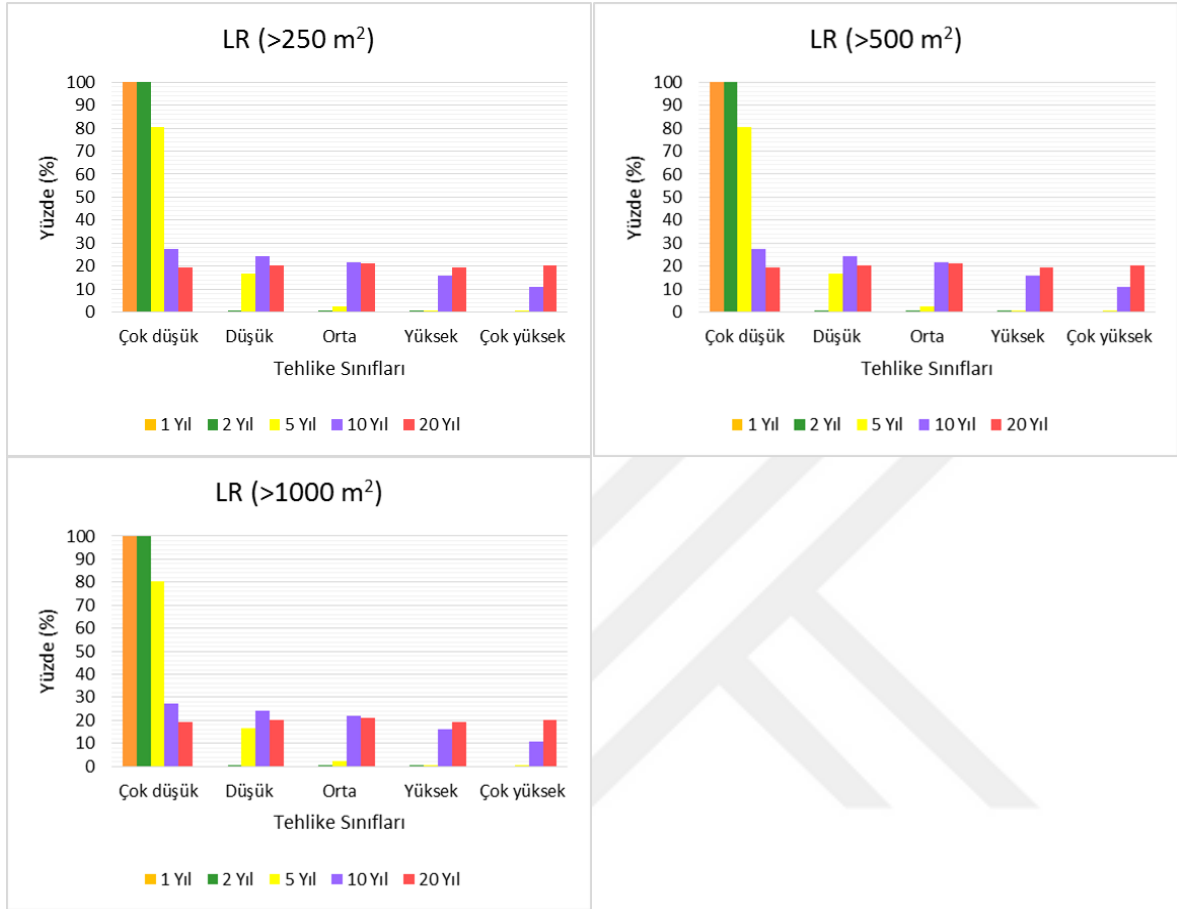
Ek şekil 3'ün devamı



Ek şekil 4. Shalstab modeli tabanlı hazırlanan tehlike haritalarının alansal ve zamansal gerçekleşme yüzdeleri



Ek Şekil 5. LR yöntemi tabanlı hazırlanan tehlike haritalarının alansal ve zamansal gerçekleşme yüzdeleri



ÖZGEÇMİŞ

Liseyi Gelibolu Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde okudu. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden birincilikle mezun oldu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini yüksek onur öğrencisi olarak tamamlayarak, 2016 yılında yine aynı okulda Doktora eğitimine başladı. Yazar iyi derecede İngilizce bilmektedir.

