

**HAVZA ÖLÇEĞİNDE HEYELANDAN KAYNAKLANAN
ZARARLARIN AZALTILMASINA YÖNELİK
METODOLOJİ VE YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ
(BOLAMAN MİKRO HAVZASI, ORDU)**

**DEVELOPMENT OF METHODOLOGY AND METHODS
FOR MITIGATING DAMAGES CAUSED BY
LANDSLIDES AT BASIN SCALE (BOLAMAN MICRO
BASIN, ORDU)**

ZEHRA KAYA TOPAÇLI

PROF. DR. CANDAN GÖKÇEOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2023

ÖZET

HAVZA ÖLÇEĞİNDE HEYELANDAN KAYNAKLANAN ZARARLARIN AZALTILMASINA YÖNELİK METODOLOJİ VE YÖNTEMLERİN GELİŞTİRİLMESİ (BOLAMAN MİKRO HAVZASI, ORDU)

Zehra KAYA TOPAÇLI

Doktora, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

Ekim 2023, 163 sayfa

Bu çalışma ile havza ölçeğinde heyelan kaynaklı zararların azaltılmasına yönelik metodoloji ve yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen bu metodolojiler, Türkiye'nin Orta Karadeniz Bölgesinde Ordu ili Fatsa ilçesinin güneydoğusunda, Bolaman Havzası içinde yaklaşık 1339 km²'lik bir alanı kapsayan heyelan gelişimi bakımından oldukça aktif olan Bolaman Çayı Alt Havzasında test edilmiştir.

Doktora tez çalışması kapsamında ilk olarak havzanın heyelan envanter haritası üretilmiş ve söz konusu heyelanların gelişimi, buna neden olan faktörler ve tetikleyici mekanizmalar ele alınarak, çalışma sahasındaki heyelan duyarlılık haritaları Lojistik Regresyon ve Rastgele Orman yöntemleriyle elde edilmiştir. Çalışma alanına ait heyelan tehlike haritasının oluşturulması aşamasında, rastgele orman yöntemiyle oluşturulan duyarlılık haritası kullanılmıştır. Tehlike değerlendirmesinde, tetikleyici faktör olarak yağış faktörü kullanılmış olup, veriler Genelleştirilmiş Uç Değer dağılımı ile analiz edilmiştir. Ayrıca tehlike analizinde kullanılan bir diğer parametre olan alansal olabilirlik heyelanların büyüklük – frekans ilişkileri göz önünde bulundurularak Pearson 5 olasılık yoğunluk fonsiyonuna göre hesaplanmıştır. Daha sonra heyelan alan-hacim; hacim-yayılma alanı arasındaki ilişkiler ampirik olarak hesaplanarak heyelanların yayılma alanına göre risk altında bulunan elemanlar tespit edilmiş ve uzman görüşüne göre

puanlandırılarak hasargörebilme dereceleri belirlenmiştir. Çalışma alanı için iki farklı yaklaşımla risk haritaları üretilmiştir. İlk yaklaşım ile tehlike haritaları ve hasargörebilirlik haritasının çarpımı neticesinde farklı yıllara ve büyüklüklere ait 15 adet risk haritası üretilmiştir. İkinci yaklaşım olan Mamdani Bulanık Mantık yöntemine göre ise bölgenin nihai risk haritası heyelan duyarlılık, hasargörebilirlik ve heyalan yayılma alanı haritaları dikkate alınarak üretilmiştir. Son olarak üretilen risk haritaları dikkate alınarak havza bazında risk seviyesinin yüksek olduğu yerlere basit, uygulanabilir, çevreye uyumlu ve ekonomik stabilizasyon teknikleri önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Duyarlılık, Tehlike, Risk, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bolaman

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY AND METHODS FOR MITIGATING DAMAGES CAUSED BY LANDSLIDES AT BASIN SCALE (BOLAMAN MICRO BASIN, ORDU)

Zehra KAYA TOPAÇLI

Doctor of Philosophy, Department of Geological Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU

October 2023, 163 pages

The aim of this study is to develop methodologies and methods to reduce damages caused by landslides at the basin scale. These developed methodologies were tested in the Bolaman Stream Micro Basin, which is situated in the south-east of Fatsa district of Ordu province in the Central Black Sea Region of Türkiye and covers an area of almost 1339 km², and is highly active in terms of landslide development.

As part of a doctoral thesis, the methodology and methods for reducing damages caused by landslides at the basin scale have been developed. Initially, the landslide inventory map of the basin was produced, and landslide susceptibility maps were generated using logistic regression and random forest methods, considering the development of landslides, the factors that cause them, and triggering mechanisms. In the stage of producing the landslide hazard map of the study region, the susceptibility map generated by the random forest method was utilized. In the hazard assessment, rainfall factors were used as a triggering factors, and the data was analyzed using Generalized Extreme Value distribution. Also, the areal susceptibility parameter used in the hazard analysis was calculated according to the Pearson 5 probability density function considering the size-frequency relationships of landslides. Then, elements at risk were identified by empirically calculating the relationships between landslide area-volume and volume-run

out and by scoring their vulnerability levels according to expert opinion. The study area's risk maps were created using two distinct methods. The first approach produced 15 risk maps of varying sizes and years by multiplying hazard and vulnerability maps. The second method employed the Mamdani Fuzzy Logic approach to produce the regional risk map by incorporating landslide susceptibility, vulnerability, and run-out distance maps. Finally, practical, eco-friendly, and cost-effective remediation techniques were proposed to the areas with high risk levels on basin basis by considering the risk maps produced.

Keywords: Landslide, Susceptibility, Hazard, Risk, Geographic Information Systems and Bolaman

TEŞEKKÜR

Doktora sürecim boyunca sonsuz bilgi ve tecrübesi ile beni yönlendiren, desteklerini ve emeklerini esirgemeyen öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU'na,

Tez izleme komitemde yer alarak değerli görüş ve önerileri ile çalışmamın şekillenmesini sağlayan sayın Doç. Dr. Nejan HUVAJ SARIHAN ve Doç. Dr. Tolga GÖRÜM'e,

Tezim için jüri üyeliğini kabul ederek önemli yorum ve eleştirileri ile çalışmamın son halini almasını sağlayan Prof. Dr. Aykut AKGÜN ve Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU'na,

Tez çalışmam süresince yol göstericiliği, bilgisi ve manevi desteğiyle katkıda bulunan sayın hocam Doç. Dr. Osman ORHAN'a,

Tezin farklı dönemlerinde yardım ve desteğini asla eksik etmeyen sayın hocam Doç. Dr. Senem TEKİN'e,

Tez çalışmamın her aşamasında her türlü yardım ve desteğini eksik etmeyen çok kıymetli hocam Arş. Gör. Muhammed Çağrı TURĞUT'a,

Kendilerini tanıdığım ilk günden itibaren şahsıma karşı sergilemiş olduğu güler yüz ve samimiyetlerinin yanı sıra tez çalışmama sundukları katkı nedeniyle değerli hocam Arş. Gör. Gizem KARAKAŞ'a,

Tez çalışmamın her aşamasında özellikle arazi çalışmaları sırasında yardım ve desteğini asla eksik etmeyen kıymetli meslektaşım Adem Kürşat ÖZCAN'a,

Tez çalışmaları boyunca, farklı fikirleri ve yönlendirmeleri ile tezin gelişiminde çok büyük emekleri olan kıymetli iş arkadaşlarım Ayten DEMİRHAN ve Gehver AYDOĞDU'ya,

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Ailesi'ne ve burada ismini saymadığım çalışmalarım süresince deneyimlerinden ve bilgilerinden yararlandığım tüm çalışma arkadaşlarıma,

Bu yolda beni hiç yalnız bırakmayan sevgili ailem ve eşim Veysel TOPAÇLI'ya sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunuyorum.

Zehra KAYA TOPAÇLI

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Araştırma Hedefleri.....	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Heyelan Envanter Çalışmaları.....	5
2.2. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları.....	7
2.3. Heyelan Tehlike Çalışmaları.....	8
2.4. Heyelan Risk Değerlendirmesi	9
2.5. Heyelan Stabilizasyon Teknikleri	11
2.5.1. Şev Geometrisinin Değiştirilmesi.....	15
2.5.2. Drenaj Sistemi	15
2.5.3. Destek Yapıları Sistemi.....	15
2.5.4. Yapısal Güçlendirme Sistemi	16
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Materyal	18
3.2. Yöntem.....	25
3.2.1. Envanter ve Veri Tabanının Oluşturulması Çalışmaları	25
3.2.2. Heyelan Tehlike Çalışmaları	27
3.2.2.1. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları	28
3.2.2.1.1. Lojistik Regresyon Yöntemi.....	30
3.2.2.1.2. Rastgele Orman Yöntemi	31
3.2.2.2. Heyelan Duyarlılık Modellerinde Performans Değerlendirmeleri	34
3.2.2.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında Kullanılan Parametreler.....	36

3.2.2.3.1. Bolaman Havza Jeolojisi	38
3.2.2.3.2. Arazi Kullanım Durumu	42
3.2.2.3.3. Sayısal Yükseklik Modeli	47
3.2.2.3.4. Yamaç Eğimi	48
3.2.2.3.5. Yamaç Yönelimi (Bakı)	50
3.2.2.3.6. Yamaç Eğriselliği	51
3.2.2.3.7. Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TNI)	55
3.2.2.3.8. Drenaj Ağına Olan Yakınlık	57
3.2.2.3.9. Yola Olan Yakınlık	59
3.2.2.3.10. Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI)	60
3.2.2.4. Zamansal Olabilirlik	62
3.2.2.4.1. Uygunluk Testi	64
3.2.2.5. Alansal Olabilirlik	66
3.2.3. Heyelan Kaynak Alanı ve Hacim Arasındaki Ampirik İlişkiler	67
3.2.4. Heyelan Yayılma Alanı Hesabı	68
3.2.5. Risk Altında Bulunan Elemanlar	70
3.2.6. Hasargörebilirlik Derecesi	71
3.2.7. Mamdani-Bulanık Mantık Yöntemi	74
3.2.8. Risk Analizi	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	81
4.1. Heyelan Envanteri	81
4.2. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları	84
4.2.1. Lojistik Regresyon Yöntemi	85
4.2.2. Rastgele Orman (Random Forest) Yöntemi	87
4.2.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performans Değerlendirmeleri	90
4.3. Zamansal Olabilirlik	92
4.4. Alansal Olabilirlik	97
4.5. Heyelan Tehlike Haritaları	99
4.6. Heyelan Hacim Hesabı	105
4.7. Heyelan Yayılma Alanı Hesabı	106
4.8. Risk Altında Bulunan Elemanların Hasargörebilme Dereceleri	108
4.9. Heyelan Risk Haritaları	116
4.10. Mamdani-Bulanık Mantık Algoritması Kullanılarak İyileştirme Yöntemlerin Önceliklendirilmesi	121

4.11. Heyelan İyileştirme Yapıları	126
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129
KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ	164

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu.....	18
Şekil 3.2. Çalışma alanı ve yakın çevresinde bulunan meteoroloji istasyonlarının havza içerisindeki dağılımı	22
Şekil 3.3. Schreiber formülüne göre çalışma alanına ait yıllık ortalama yağış dağılımı	24
Şekil 3.4. IDW yöntemine göre çalışma alanına ait yıllık ortalama yağış dağılımı.....	25
Şekil 3.5. Heyelan tehlike değerlendirme akış şeması	28
Şekil 3.6. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan bazı yöntemler.....	30
Şekil 3.7. Rastgele orman algoritmasının akış şeması.....	34
Şekil 3.8. Heyelana duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametreler	37
Şekil 3.9. Çalışma alanının jeoloji haritası (MTA).....	42
Şekil 3.10. Çalışma alanının arazi kullanım durumu (OGM).....	44
Şekil 3.11. CORINE 2000, 2006, 2012 ve 2018 yıllarına ait arazi kullanım durumu	46
Şekil 3.12. Çalışma alanına ait CORINE 2000-2018 yılları arası arazi kullanım durumu	47
Şekil 3.13. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli.....	48
Şekil 3.14. Çalışma alanının yamaç eğim haritası	49
Şekil 3.15. Çalışma alanının yamaç yönelimi (Bakı) haritası.....	51
Şekil 3.16. Çalışma alanının genel eğrisellik haritası.....	53
Şekil 3.17. Çalışma alanının plan eğrisellik haritası.....	54
Şekil 3.18. Çalışma alanının profil eğrisellik haritası.....	55
Şekil 3.19. Çalışma alanının topografik nemlilik indeksi (TNI) haritası.....	57
Şekil 3.20. Çalışma alanının dereye yakınlık haritası.....	58
Şekil 3.21. Çalışma alanının yola yakınlık haritası	60
Şekil 3.22. Çalışma alanının normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI) haritası.....	62
Şekil 3.23. Mamdani bulanık mantık sisteminin (M-BM) genel çalışma prensibi.....	76
Şekil 3.24. Heyelana risk haritasının hazırlanmasında kullanılan parametreler.....	79
Şekil 3.25. Mamdani-Bulanık mantık yöntemi kullanılarak üretilen heyelan risk haritasının hazırlanmasında kullanılan parametreler	80

Şekil 4.1. Çalışma alanının heyelan envanter haritası	82
Şekil 4.2. Çalışma alanında gözlenen heyelanlardan bazı görüntüler	83
Şekil 4.3. Çalışma alanında ayrışma zonunda meydana gelmiş olan heyelan	84
Şekil 4.4. Lojistik Regresyon ve rastgele orman modellerinin oluşum şeması	85
Şekil 4.5. Çalışma alanının lojistik regresyon modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası.....	87
Şekil 4.6. Çalışma alanının rastgele orman modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası.....	89
Şekil 4.7. Lojistik regresyon ve rastgele orman modeline ait roc grafiği	91
Şekil 4.8. Duyarlılık haritalarının bir kısmı (a) lojistik regresyon (b) rastgele orman.....	92
Şekil 4.9. Fatsa istasyonu yıllık toplam yağış değerleri	93
Şekil 4.10. Fatsa istasyonu aylık ortalama yağış değerleri	94
Şekil 4.11. Fatsa istasyonu 2010-2022 yılları günlük maksimum yağış değerleri	94
Şekil 4.12. İki günlük maksimum yağış verilerinin kümülatif dağılım fonksiyonu	95
Şekil 4.13. İki günlük maksimum yağış verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu	96
Şekil 4.14. İki günlük maksimum yağış verilerinin yaşam fonksiyon eğrileri	96
Şekil 4.15. Çalışma alanına ait heyelan alansal dağılımları	97
Şekil 4.16. Çalışma alanına ait heyelan alanı-frekans yoğunluğu grafiği	98
Şekil 4.17. Çalışma alanına ait heyelan envanter verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	98
Şekil 4.18. Çalışma alanına ait heyelan envanterine uygun olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	99
Şekil 4.19. Çalışma alanına ait heyelan yoğunluk fonksiyonuna göre alansal olarak 0.00007, 0.0003, 0.002 km ² 'den büyük heyelanların aşılma olasılıkları.....	99
Şekil 4.20. 0.00007 km ² 'den Büyük ve 1, 2 Yıllık Aşılma Olasılık Değerlerine Göre Heyelan Tehlike Haritaları	100
Şekil 4.21. 0.00007 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları	101
Şekil 4.22. 0.00007 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası	101
Şekil 4.23. 0.0003 km ² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları	102

Şekil 4.24. 0.0003 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları	102
Şekil 4.25. 0.0003 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası	103
Şekil 4.26. 0.002 km ² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları	103
Şekil 4.27. 0.002 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları	104
Şekil 4.28. 0.002 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası	104
Şekil 4.29. Çalışma alanına ait heyelan alan-hacim ilişkisi.....	105
Şekil 4.30. Heyelanların hacimsel dağılımları	106
Şekil 4.31. Çalışma alanına ait heyelan hacim-yayıma alanı ilişkisi.....	107
Şekil 4.32. Çalışma alanının heyelan yayılma alanı yoğunluk haritası	108
Şekil 4.33. Çalışma alanının risk altında bulunan elemanlar haritası	109
Şekil 4.34. Çalışma alanının risk altında bulunan bina envanter haritası	111
Şekil 4.35. Çalışma alanının risk altında bulunan yol envanter haritası.....	112
Şekil 4.36. Çalışma alanının risk altında bulunan tarım ve orman alanları haritası	114
Şekil 4.37. Çalışma alanının hasargörebilme haritası.....	115
Şekil 4.38. 0.00007 km ² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	117
Şekil 4.39. 0.00007 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	117
Şekil 4.40. 0.00007 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritası.....	118
Şekil 4.41. 0.0003 km ² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	118
Şekil 4.42. 0.0003 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	119
Şekil 4.43. 0.0003 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritaları	119
Şekil 4.44. 0.002 km ² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	120

Şekil 4.45. 0.002 km ² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları	120
Şekil 4.46. 0.002 km ² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritaları	121
Şekil 4.47. Mamdani bulanık mantık sisteminde tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	122
Şekil 4.48. Mamdani bulanık sistem girdilerinin üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi.....	124
Şekil 4.49. Mamdani bulanık sistem çıktısının üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi.....	125
Şekil 4.50. Çalışma alanının mamdani bulanık mantık sistemi kullanılarak oluşturulan heyelan risk haritaları	126

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Bolaman havzasını oluşturan alt havzalar ve havza içindeki oranları (Dölek, 2008).	19
Tablo 3.2. Parametrelere ilişkin dosya özellikleri	38
Tablo 3.3. Heyelan alanı (AL) ve heyelan hacmi (VL) arasındaki ampirik ilişkiler	68
Tablo 3.4. Heyelan yayılma alanı ve heyelan hacmi arasındaki ampirik ilişkiler	70
Tablo 3.5. Risk altındaki elemanların hasargörebilme dereceleri (Glade, 2003).	73
Tablo 4.1. Lojistik regresyon rastgele orman modellerine dayalı farklı heyelan duyarlılık sınıfları altında heyelanlı piksel sayısı ve alan oranları.....	90
Tablo 4.2. Rastgele orman ve lojistik regresyon modeli için istatistiksel metrikler.....	91
Tablo 4.3. Rastgele orman ve lojistik regresyon modeline dayalı farklı heyelan duyarlılık sınıfları altında genel doğruluk kriter yönteminin sonucu.....	92
Tablo 4.4. Kolmogorov-Smirnov testine göre en uygun yoğunluk fonksiyonu	95
Tablo 4.5. Heyelan hacim sınıfları (Sarkar vd., 2015).	106
Tablo 4.6. Risk altında bulunan elemanların hasargörebilme dereceleri ve piksel değerleri.....	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Heyelan stabilizasyon teknikleri.....	14
Çizelge 4.1. Poisson dağılımına göre 1, 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yılda heyelanların gerçekleşme olasılıkları.....	97
Çizelge 4.2. Mamdani bulanık çıkarım sisteminin kural değerlendirme adımında kullanılan eğer-ise kuralları.....	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

AUC	Eğri altında kalan alan
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CDF	Birikimli Dağılım Fonksiyonu
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DEM	Sayısal Yükseklik Modeli
GIS	Geographical Information Systems
IDW	Inverse Distance Weighted
LR	Lojistik Regresyon
LRM	Landslide Risk Map
LSM	Landslide Susceptibility Map
(M-BM)	Mamdani Bulanık Mantık
MGM	Meteroloji Genel Müdürlüğü
MTA	Maden Teknik ve Arama Genel Müdürlüğü
NDVI	Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi
OGM	Orman Genel Müdürlüğü
ROC	Receiver Operating Characteristic
RO	Rasgele Orman
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TNİ	Topoğrafik Nemlilik İndeksi
UA	Uzaktan Algılama
UTM	Universal Transver Merkatör

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Dünya genelinde yaşanan teknolojik gelişmeler ve artan sanayileşmeyle birlikte hızlı bir kentleşme süreci de yaşanmaktadır. Bunlarla birlikte nüfus artış hızından kaynaklı yeni yerleşim alanlarına duyulan ihtiyaçlar da artmıştır. Gerekli tedbirler alınmadan özellikle heyelana karşı duyarlı olan bölgelerde bilinçsizce yapılmış olan imar planlaması ve arazi kullanımı nedeniyle şev stabilizesi problemleri ülkemizde her geçen gün artarak devam etmektedir (Kahyaoğlu vd., 2017). Tüm bu olumsuzluklara ek olarak, iklim değişikliklerinden kaynaklı aşırı yağışlar, depremler, yol inşaatı ve hatalı tarım uygulamaları heyelanların tetiklenmesine sebep olmaktadır (Nahayo vd., 2019).

Ülkemizde özellikle Karadeniz Bölgesi, sahip olduğu topoğrafik, jeolojik ve iklimsel özellikleri sebebiyle heyelana karşı oldukça duyarlı bir bölgedir. Sarp topoğrafyasından dolayı uygun yerleşim alanlarının sınırlı olduğu bölgede, artan nüfus ve kentleşme, yerleşim alanlarının kontrolsüzce genişlemesine sebebiyet vererek tarım amaçlı kullanılan araziler, orman arazileri ve topoğrafyanın elverişsiz olduğu heyelana karşı duyarlı yamaçlar dahi yerleşime açılmaya devam edilmektedir. Bölgede yerleşime açılan alanlarda; doğal drenajın bozulması, topuk bölgesinde bilinçsizce yapılan kazılar, orman örtüsünün yok edilmesi, yeteri kadar drenaj sağlanamaması neticesinde yağmur ve yüzey sularının yol açtığı boşluk suyu basıncındaki artışlar bu arazilerin doğal dengesini bozarak heyelanlara neden olmaktadır. Meydana gelen heyelanlar nedeniyle bu alanlar kullanılamaz hale gelirken aynı zamanda büyük sosyal ve ekonomik kayıplara da yol açmaktadırlar (Kaya, 2017). Sonuç olarak, soruna çözüm olması açısından tehlike arz eden alanların belirlenerek stabilizasyona yönelik çalışmalarının yapılması kaçınılmazdır. Dolayısıyla bu çalışmada, heyelana karşı oldukça duyarlı olan Ordu İli Bolaman Havzası, Bolaman Çayı Alt Havzasını güvenli hale getirmek için, bölgenin tehlike şartlarının ortaya konulması ve bölgesel ölçekte önlem açısından önceliklendirme sınıflamasının geliştirilmesi ve yine bölgesel ölçekte dikkate alınabilecek basit, uygulanabilir, çevreye uyumlu ve ekonomik çözüm önerilerinin tanımlanması amaçlanmıştır.

Bu amaca yönelik olarak, Türkiye'nin Orta Karadeniz bölümünde yer alan Ordu ili Bolaman Havzası, Bolaman Çayı Alt Havzasının arazi çalışmaları ile birlikte Coğrafi

Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknikleri (UA) yardımıyla heyelan envanteri hazırlanmıştır. Heyelan envanter haritası ve bölgede stabilite problemine neden olduğu düşünülen gerekli parametreler kullanılarak lojistik regresyon (LR) ve rasgele orman (RO) yöntemleriyle heyelana karşı duyarlı alanlar tahmin edilmiştir. Daha sonra bunlardan daha yüksek performans gösteren duyarlılık analiz sonuçları kullanılarak tehlike haritası mekânsal, zamansal ve alansal olabilirlik parametreleri kullanılarak üretilmiş, risk altında bulunan elemanlar ve bunların hasargörebilirlik dereceleri belirlenip bölgenin risk durumu değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda havza bazında en büyük risk'ten en küçük risk'e doğru derecelendirme yapılarak, önlem öncelikleri derecelendirilmiştir. Son aşamada ise, bölgede duraysızlıkların sebep olduğu can ve mal kayıplarının olumsuz etkilerinin asgari seviyeye düşürülmesi amacıyla havza bazında uygulanabilecek nitelikte hem ekonomik hem de etkin stabilizasyon teknikleri önerilmektedir. Ayrıca, Bolaman Çayı Alt Havzasında geliştirilecek metodolojilerin heyelana duyarlı başka havzalar için de uygulanabilir olmasına dikkat edilmiştir.

Çalışma bölgesi olarak Ordu İli Bolaman Havzası, Bolaman Çayı Alt Havzası seçilmesinin nedenleri aşağıda verilmektedir:

- Havzanın heyelana karşı oldukça duyarlı olması,
- Havzada geçmişte yaşanmış olan çok fazla heyelan vakasının bulunması,
- Çok sayıda tarım alanı ve yerleşim alanının heyelan tehlikesi altında bulunması.

1.2. Araştırma Hedefleri

Heyelan veya şevlerin stabilitesi için çok sayıda geliştirilmiş mühendislik önlemleri bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler oldukça pahalı ve zaman zaman da doğayı tahrip ettiği için bölgesel ölçekte uygulanabilir değildir. Bu nedenle, heyelana karşı oldukça duyarlı olan Ordu İli, Bolaman Çayı Alt Havzasının daha güvenli hale getirilebilmesi için havzanın risk durumu değerlendirildikten sonra bazı stabilizasyon tekniklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Araştırmanın amacına ulaşabilmek için aşağıda belirtilen hedefler dikkate alınmıştır:

- Çalışma alanında yapılan saha gözlemlerine ve daha önceden yapılmış araştırmalara dayanarak heyelan oluşumuna neden olan faktörler ortaya konulmuş,

- Çalışma alanının heyelan envanter haritası oluşturulmuş,
- Çalışma alanının heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuş,
- Çalışma alanında yaratacağı etkiler açısından en yüksek tehlike potansiyeline sahip heyelanlar tespit edilmiş,
- Tespit edilen heyelanların boyutları ve yayılma alanları hesaplanmış,
- Heyelan etki alanı tespit edildikten sonra risk altında bulunan elemanların tespit edilip, hasargörebilirlik dereceleri belirlenmiş,
- Bütün parametreler tespit edildikten sonra bölgenin heyelan risk analizi yapılmış,
- Yapılan saha gözlemlerine ve analizlere dayanarak yamaçların stabilitesini arttırmak için bölgesel ölçekte kullanılabilecek potansiyel stabilizasyon teknikleri tartışılmış'tır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Doğal tehlikeler içinde, sebep olduğu olumsuzluklardan dolayı oldukça önemli bir yere sahip olan heyelanlar; küresel ölçekte can kayıplarına ve büyük ekonomik kayıplara sebep olarak sosyal kalkınmayı ve arazi kullanımını olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Rong vd., 2020). Dünya Bankası raporuna göre, dünya çapında yaklaşık 300 milyon insan heyelan tehlikesi bulunan bölgelerde yaşamakta ve her yıl yaklaşık 600 kişi heyelan nedeniyle hayatını kaybetmektedir (Habumugisha vd., 2022). The Center for the Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)'den alınan istatistiklere göre ise dünya çapında doğal tehlikelerin neden olduğu ölümlerin en az %17'si heyelan kaynaklı yaşanmaktadır (Aristizábal ve Sánchez, 2020). Ülkemizde meydana gelen afetler neticesinde yaşanan kayıplar göz önüne alındığında, %15'lik oran ile heyelanlar; depremlerden sonra verdiği zararlar açısından ikinci sırada yer almaktadır (Ergunay, 1999). 1950-2020 yılları arasında Türkiye'de toplam 23.393 heyelan vakası meydana gelmiştir (AFAD, 2020). 1995-2014 yılları arasında Avrupa ülkelerinde meydana gelen heyelan kaynaklı yaklaşık 1375 ölümlerin 335'i (Haque vd., 2016) Türkiye'de meydana gelmiştir (Görüm ve Fidan, 2021). Türkiye'de son 90 yılda meydana gelen 389 heyelan toplam 1.346 kişinin ölümüne neden olmuştur. Ayrıca, son 20 yılda ölümlü heyelanların ortalaması 12,2'ye, heyelanlara bağlı ortalama ölüm sayısı ise yıllık 23,6'ya yükselmiştir (Görüm ve Fidan, 2021).

Heyelanlar günümüzde artık güncel jeomorfoloji ve jeolojinin dinamik koşullarından biri olmaktan çıkıp sosyo-ekonomik bir sorun haline gelmiştir. Heyelanların sosyo-ekonomik açıdan verdiği hasarların farkına varılmasıyla, heyelan çalışmalarına yönelik bilimsel ve teknolojik çalışmalar artmış hem bilim dünyasında hem de kamuda oldukça önemli bir konu olmuştur (Tekin, 2019). Bu durum, heyelan kaynaklı riskleri azaltmaya çalışan bilim insanlarını heyelan aktivitesini yorumlamaya, heyelan modelleme ve simülasyonuna, heyelan tehlike ve risk değerlendirmesine, mevcut heyelanları kullanarak belirli analizlerle ileride oluşabilecek heyelanları tahmin etmeye ve olası bir afeti önlemek ve vereceği zararı en aza indirmek için şev ve yamaç stabilizasyon teknikleri geliştirmeye yönlendirmiştir (Arbanas vd., 2019).

Oldukça karmaşık bir problem olan heyelanların yol açtığı sosyo-ekonomik kayıpların mümkün olan en düşük seviyeye indirilebilmesi için, ilk olarak heyelanların alansal

dağılımlarının ve kontrol edildiği çevresel parametrelerin sağlıklı bir şekilde gösterildiği güvenilir bir envanter haritasının ve veri tabanlarının oluşturulması gerekmektedir (Tekin, 2019). Bu kapsamda, heyelan envanter haritaları, mevcut heyelanların dağılımları, türleri, büyüklükleri ve hatta oluşum tarihleri hakkında bilgiler vermelidir (Guzzetti vd., 2012). Heyelan duyarlılık, tehlike ve risk çalışmalarının başlangıç aşaması olan heyelan envanter haritalarının kalitesi sahanın daha iyi anlaşılması ve heyelan çalışmaları açısından oldukça önemlidir (Guzzetti vd., 2012). Bu nedenle, bölgesel arazi kullanımı ve altyapı planlamasını desteklemek, doğal tehlike ve riskler konusunda farkındalığı artırmak için ilk olarak heyelan envanterlerinin oluşturulması ve heyelana eğilimli alanların belirlenmesi gerekmektedir (Kocaman vd., 2020). Daha sonra, tehlike haritaları üretilerek hasargörebilirlik ve risk altında bulunan elemanları belirlemek gerekmektedir. Böylece risk analizleriyle belirlenmiş olan can ve mal kayıplarına sebep olacak heyelan potansiyeli yüksek alanlardan mümkün oldukça uzak durulması eğer mümkün değil ise, düşük maliyetli güvenilir çözüm yolları geliştirilerek heyelanların iyileştirilip problemin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Böylece hem maddi hem de manevi kayıpların önüne geçilebilmesi mümkün olacaktır.

2.1. Heyelan Envanter Çalışmaları

Heyelan envanter haritaları heyelanın konumu, türü, oluşum tarihleri, büyüklüğü, kayma mekanizmaları, kaymaya sebep olan faktörler ve heyelanın neden olacağı hasarlar hakkında detaylı fikirler verir (Wieczorek, 1984; Fell vd., 2007; Hervás, 2012; Panchal ve Shrivastava, 2022). Heyelanlara ilişkin ayrıntılı bir envanter haritasının ve veri tabanının oluşturulması, her türlü heyelanla ilgili yapılacak olan çalışmanın veya değerlendirmenin ilk aşaması olarak değerlendirilir ve en temel unsurlardan birisi olarak kabul edilir (Galli vd., 2008; Guzzetti vd., 2012). Bu yüzden, heyelan envanter haritaları, duyarlılık, tehlike ve risk analizlerinde kullanılan temel bir altlık olmasından dolayı son derece önemlidir.

Deprem, aşırı yağış ve kar erimesi gibi belli bir tetikleyici faktörün etkisiyle oluşmuş heyelanların belirtildiği haritalar “heyelan olay envanter haritası” olarak isimlendirilirken, geçmiş tarihlerde oluşmuş belli bir tetikleyici unsur gözetmeksizin tüm heyelanları gösteren haritalara “tarihsel heyelan envanteri” denir. Farklı zamanlarda çekilmiş hava fotoğrafları ve uydu görüntülerini yorumlayarak yapılan haritalara ise “çok zamanlı heyelan envanter haritası” denilmektedir (Malamud vd., 2004). Tarihsel heyelan

envanter haritaları risk azaltma ve stabilizasyon çalışmalarında hedef bölgeleri göstermekle birlikte, çalışmaların doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracak olan olay envanter haritalarının düzenli bir şekilde hazırlanması açısından oldukça önemlidir (Tekin, 2019).

Heyelan envanter haritaları, geleneksel ve yenilikçi yöntemler olmak üzere iki farklı teknikle üretilebilmektedir (Moosavi vd., 2014). Bu haritaları hazırlamak için kullanılan geleneksel yöntemler arasında: (i) topoğrafik harita analizleri ve arazi çalışmaları (Brunsdon, 1985) ve (ii) yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, hava görüntüleri, lazer taramaları ve hiperspektral görüntülerin yorumlanması (Turner ve Schuster, 1996) bulunmaktadır (Bacha vd., 2018). Envanter verilerinin hazırlanmasında arazi çalışmalarının çok zaman alması ve maliyetli olması sebebi ile son zamanlarda geniş alanlardaki heyelanları tespit etmeye, haritalandırmaya ve güncellemeye yardımcı olmak için yeni yöntemler ve teknolojiler geliştirilmeye çalışılmıştır (Rossi vd., 2018). Guzzetti vd., (2012) bu yeni yöntemleri şu şekilde özetlemişlerdir: (i) esas olarak çok yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modellerinden (DEM'ler) yararlanarak yüzey morfolojisinin yorumlanması; (ii) radar (SAR) görüntüleri dahil olmak üzere uydu görüntülerinin yorumlanması ve analizi; ve son olarak (iii) topoğrafik haritalarının kullanımını kolaylaştırmak için yeni araçların kullanılması. Bunlara ek olarak, heyelan envanter haritaları daha önce meydana gelmiş heyelanlar ile ilgili tarihsel bilgiler toplanarak da hazırlanabilir. Bu yöntem heyelan arşivi oluşturmanın bir yolu olup daha önce meydana geldiği bilinen heyelanların konumunu bildirir (Reichenbach vd., 1998).

Envanter haritasının hangi teknikle hazırlanacağına seçimi, envanterin hazırlanma sebebine, çalışma alanının büyüklüğüne, temel haritaların ölçeğine, mevcut verilerin hassasiyetine (ör. hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, LiDAR verileri), araştırmacıların becerilerine ve deneyimlerine, çalışmayı tamamlamak için mevcut kaynaklara ve ölçeğe bağlıdır (Guzzetti vd., 1999; Van Westen vd., 2006). Küçük ölçekli envanter haritaları (<1/200.000) özel ve kamu kurumlarından alınan bilgilere ve literatür bilgilerine dayanarak tarihsel veri kayıtları temel alınarak (Radbruch-Hall vd., 1982) veya hava fotoğrafları yorumlanarak gerçekleştirilmektedir (Cardinali vd., 1990). Genel olarak, küçük ölçekli bir heyelan envanter haritası, heyelanların konumunu, tipini ve göreceli boyutunu göstermektedir (Martha vd., 2021). Orta ölçekli haritalar (1/25 000-1/200 000), genellikle hava fotoğrafı yorumlamaları ile elde edilmekte ve oluşturulan haritaların

doğruluğu literatür bilgisiyle birlikte arazi çalışmalarıyla kontrolleri sağlanmaktadır. Büyük ölçekli envanter haritaları (1/25 000) ise hava fotoğrafı değerlendirmeleri ya da detaylı arazi çalışmaları ile birlikte oluşturulmaktadır (Wieczorek, 1984). Orta ve/veya büyük ölçekli bir heyelan envanter haritası, heyelan kaynak alanını, birikim alanını, doğru heyelan sınırını ve diğer temel heyelan unsurlarını tanımlayabilir (Martha vd., 2021). Hava fotoğrafı ve uydu görüntülerinin yorumlanması ile oluşturulan envanter haritalarının güvenilirliğinin ve doğruluğunun arazi çalışmaları yardımıyla kontrol edilmelidir (Guzzetti vd., 2000).

2.2. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları

Heyelan duyarlılık haritaları, “geçmiş ve bugün, geleceğin anahtarıdır” ilkesine dayanarak, daha önceden heyelanların meydana gelmesine yol açan faktörler dikkate alınıp, gelecekte oluşabilecek muhtemel duraysız alanların tespit edilip bölgenin heyelana karşı duyarlılığının göreceli olarak sınıflandırılmasıyla oluşturulan tematik haritalardır (Guzzetti, vd., 2012). Duyarlılık haritaları sayesinde, daha sonra yaşanması muhtemel olan potansiyel heyelan alanları tespit edilebilmektedir (Wu vd., 2016; Yu vd., 2022). Böylece, duyarlılık haritalarının üretilmesi heyelandan kaynaklı can ve mal kayıplarının önüne geçmesi bakımından yapılan afet planlamaları çalışmalarında karar vericilere önemli bilgiler sağlayabilmektedir (Çellek, 2013; Petschko vd., 2014). Ayrıca, duyarlılık haritaları, insanların heyelan tehlikesini azaltma prosedürlerini tanımasına, önlemesine veya adapte olmasına yardımcı olur (Pourghasemi vd., 2012). Bu yüzden, bu tür tehlikelerin önlenmesi ve azaltılması için heyelan duyarlılık haritalaması oldukça önemli ve gereklidir (Zhao vd., 2022).

Son zamanlarda bilgisayar teknolojileri ve buna paralel olarak CBS ve uzaktan algılama tekniklerinin geniş kullanım alanlarına yayılmasıyla birlikte heyelan değerlendirme çalışmalarında kullanılan heyelan duyarlılık haritalaması üzerine pek çok model geliştirilmiştir (Chen ve Li, 2020; Rocatti vd., 2021; Chen vd., 2021; Orhan vd., 2022). Özellikle, makine öğrenimi algoritmaları ve yapay zeka yöntemleri, son yıllarda heyelan duyarlılık çalışmaları için oldukça popüler hale gelmiştir (Gong vd., 2018; Park ve Kim, 2019; Das ve Lepcha1, 2019; Shirvani vd., 2020; Lucchese vd., 2020; Orhan vd., 2022).

Genel olarak, heyelan duyarlılık haritaları nitel yöntemler ve nicel yöntemlerle üretilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999; Guzzetti vd., 1999; Lucchese vd., 2020; Yu

vd., 2022). Nitel yöntemler, jeomorfolojik gözlemlere ve sezgisel yaklaşımlara dayalı duyarlılık haritalarının oluşturulmasıdır. Bu yöntem öznel ve doğrudan araştırmacıların saha gözlemlerine, bilgi ve tecrübesine dayanmaktadır (Moharrami vd., 2020). Nicel yöntemler ise genellikle coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak bilgisayar destekli ve veriye dayalı olarak heyelana sebep olan faktörlerle heyelan arasındaki ilişkileri sayısal/istatistiksel tahminler yaparak duyarlılık haritalarının üretilmesi işlemidir (Ayalew ve Yamagishi, 2005; Akgün ve Erkan, 2016; Gong vd., 2018).

2.3. Heyelan Tehlike Çalışmaları

Heyelanların sebep olduğu zararların azaltılması, can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi risk değerlendirmesi ve risk yönetimi ile mümkün olmaktadır. Risk değerlendirmesi ve hasar azaltma çalışmalarının yapılabilmesi için ilk olarak belirli bir zaman diliminde ve belirli bir alanda potansiyel olarak heyelan meydana gelme olasılığını tahmin eden heyelan tehlike analizine ihtiyaç duyulmaktadır (Panchal ve Shrivastava, 2022).

Tehlike, belirli bir bölgede belirli bir sürede potansiyel olarak zarar verici bir doğa olayının gerçekleşme olasılığı olarak tanımlanmaktadır (Varnes vd., 1984). Guzzetti (1999), Varnes (1984)'ün yapmış olduğu tehlike tanımına vakanın büyüklüğünü de dahil ederek heyelan tehlike kavramını; hasar verme potansiyeline sahip belirli büyüklükteki bir heyelanın belirli bir sürede ve bölgede meydana gelme olasılığı olarak belirtmiştir (Tekin, 2019). Özetle, heyelan tehlikesi, olayın büyüklüğü (“ne kadar büyük”) ile birlikte mekansal (“nerede”) ve zamansal (“ne zaman”) olarak hasar verici bir heyelanın oluşma olasılığı olarak ifade edilmektedir (Qiu vd., 2019). Bu tanımlamalara göre, tehlike haritaları hem mevcut hem de potansiyel duraysızlıkların konumunu ve büyüklüğünü göstermeli ve gelecekte meydana gelme zamanı veya olasılığı hakkında bilgi sağlamalıdır (Carrara vd., 1995). Varnes'e (1984) göre, bir bölgedeki heyelan tehlikesi; heyelanların mekansal, alansal ve zamansal olasılıklarının çarpımı ile elde edilmektedir (Eşitlik 2.1).

$$\mathbf{Tehlike (H) = P_{mekansal} \times P_{alansal} \times P_{zamansal}} \quad (2.1)$$

Tehlike haritalarının üretiminde kullanılan mekansal olabilirlik parametresi heyelan duyarlılık haritaları kullanılarak oluşturulmaktadır. Heyelan duyarlılığı, bir bölgede heyelan meydana gelme olasılığı olarak tanımlanır (Reichenbach vd., 2018). Zamansal olabilirlik parametresi heyelan tehlike haritalarının bir diğer parametresi olup heyelanları

tetikleyici faktörlerin (yağış, deprem, ani kar erimeleri vb.) tekrarlanma periotlarından veya aşılma olasılıklarından bulunabilmektedir (Tyagi vd., 2022). Tehlike hesaplamalarının son parametresi olan alansal olabilirlik ise, heyelanların hangi büyüklükte oluşacağını tahmin etmek için frekans - büyüklük dağılımları ile ilişkilendirilerek elde edilmektedir (Stark ve Hovius, 2001; Malamud vd., 2004; Nefeslioğlu ve Gökçeoğlu, 2011).

2.4. Heyelan Risk Değerlendirmesi

Doğal tehlikeler arasında en sık meydana gelen heyelanlar, dünya genelinde her yıl ciddi can ve mal kayıplarına ve büyük ekonomik zararlara neden olmaktadır (Dou vd., 2020; Wubalem, 2021; Davies, 2022). Ancak, heyelanlardan kaynaklanan hasar ve kayıplar, özenle hazırlanmış planlama, yönetim, uygun politika ve uygulamalar ile azaltılabilir (Dai vd., 2002; Guillard-Gonçalves ve Zezere, 2018). Bugüne kadar heyelanların yol açtığı kayıplar sebebiyle heyelan risk çalışmaları için ciddi çabalar sarf edilmiştir (Keles ve Nefeslioğlu, 2021; Hidalgo ve Vega, 2021; Bao vd., 2022; Sim vd., 2022; Mosaffaie vd., 2023; Riaz vd., 2023). Ayrıca heyelan risk değerlendirme konusunda birçok kılavuzda yayınlanmıştır. Örneğin, 2015-2023 yıllarını kapsayan Sendai Afet Riskinin Azaltılması Çerçevesi 2015 yılında onaylanmıştır (Lei vd., 2023). Ancak heyelan hassasiyetinin ve riskinin değerlendirilmesine yönelik uygun ve uygulanabilir bir metodoloji birçok ülkede hala geliştirme aşamasındadır (Singh vd., 2021). Sadece dört ülkede (İsviçre, Fransa, İtalya ve İsveç) uygulanabilir risk değerlendirme çerçevesi bulunmaktadır (SafeLand, 2010).

Risk değerlendirme çalışmalarında yaşanan en son gelişmeler daha çok heyelan yönetimini geliştirmeye yönelik sistematik çerçeveler sunmaktadır. Heyelan yönetiminin odak noktası heyelan kontrol çalışmalarından heyelan risk değerlendirme çalışmalarına doğru kaymaya başlamıştır. Bu yüzden, heyelan ile mücadele sürecinde heyelan tehlikesinin doğasında var olan belirsizlikle baş etmede risk değerlendirmesi hayati önem taşımaktadır (Lei vd., 2023). Yapılan tüm bu çalışmalar, dünya genelinde heyelan risk çalışmalarının giderek artan bir ilgiye sahip olduğunu göstermektedir (Sim vd., 2022). Ancak yapılan tüm bu çalışmalara rağmen Nefeslioğlu ve Gökçeoğlu (2011)'e göre heyelan risk değerlendirme algoritmaları kesin olarak tanımlanabilse de uygulamalarında oldukça karmaşık süreçler içermektedir.

Risk kavramı bir çok farklı araştırmacı tarafından tanımlanıştır (Singh vd., 2021).

Doğal afetler, Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Ofisi (UNDRR) 2021 yılında resmi olarak afet riskini "Belirli bir dönemde, belirli bir zaman periyodunda bir bölgede, toplum veya toplulukta meydana gelebilecek potansiyel can kaybı, yaralanma veya mülklerin hasar görmesi " olarak tanımlamıştır (UNDRR, 2021). Bu nedenle heyelan riski, belirli bir bölgede, belirli bir zaman diliminde meydana gelebilecek heyelan tehlikesinden kaynaklı maksimum potansiyel kayıpları ifade etmektedir (Liu ve Miao, 2018). Başka bir ifadeyle, heyelan riski, tehlikeli alanların ve potansiyel olarak tehlikeye maruz kalabilecek risk altında bulunan unsurların belirli bir zaman ve mekanda hasar veya kayıplara uğrayabileceği bir etkiyle karşılaşma olasılığı olarak tanımlanmaktadır (Segoni ve Caleca, 2021). Bu yüzden heyelan risk değerlendirmesi, mevcut risklerin tolere edilip edilemeyeceğini, hali hazırda bulunan risk kontrol önlemlerinin yeterli olup olmadığını eğer yeterli değilse yeni alternatif risk kontrol önlemlerini önerme konusunda bir karar verme süreci olarak ifade edilmektedir (Fell vd., 2005).

Dai vd., (2002), belirli bir sahadaki yenilmeler için risk analizi ve yönetiminin bileşenlerini şu şekilde özetlemişlerdir; bu bileşenler, sahanın yenilme durumunu, yenilme olasılığını ve yayılma alanını belirleyen faktörleri içermektedir. Bu bileşenler, aynı zamanda heyelan risk değerlendirmesinin temelini de oluşturmaktadır. Daha sonra, heyelan riski altında bulunan elamanlar ve bunların hasargörebilme dereceleri dikkate alınır. Havza ölçeğinde risk analizi için, aşağıdaki parametreler dikkate alınarak değerlendirilir: (1) heyelan tehlike olasılığı, (2) heyelandan etkilenen bölge, (3) risk altındaki elemanlar, (4) risk altındaki elemanların hasargörebilirlik derecesi (5) risk seviyesi ve (6) yönetim stratejileri ve karar alma'dır (Pan vd., 2021).

Tüm bu tanımlamalara göre kavramsal risk modeli, tehlike durumunun, risk altında bulunan unsurların ve meydana gelebilecek hasar derecelerinin çarpılması sonucu ile hesaplanmaktadır (Dikshit vd., 2020). Bu risk kavramı, birçok araştırmacı tarafından eşitlik 2.2 ile heyelan risk çalışmalarına uygulanmıştır (Varnes vd., 1984; Leroi, 1996; Einstein, 1997; Guzzetti, 2000; Cardinali vd., 2002; Remondo vd., 2004; Zézere vd., 2008; Dikshit vd., 2020; Fu vd., 2020; Pan vd., 2021; Segoni ve Caleca, 2021).

$$\text{Risk (R)} = (\text{H}) \times (\text{E}) \times (\text{V}) \quad (2.2)$$

- i. Belirli bir sürede belirli büyüklükteki bir heyelanın gerçekleşme olasılığı tehlike (*H*) olarak tanımlanmaktadır;
- ii. Heyelandan dolayı beklenen kayıp ve hasargörebilirlik derecesi (*V*) olarak tanımlanmaktadır;
- iii. Risk altındaki elemanlar; risk altında bulunan ve heyelan sonucunda etkilenebilecek belirli elemanların miktarı olarak ifade edilmektedir (yapılar, yollar, insan sayısı vb.) (Crozier ve Glade, 2005).

Risk modeli formülü oldukça basit görünebilir, ancak bina veya binalarda yaşayan kişileri değerlendirmek için birçok hususun dikkate alınması gerektiğinden dolayı oldukça zor bir durum olup formül hızla çok karmaşık hale gelebilir. Bu yüzden bu karmaşıklığını ortadan kaldırmak için ayrıntılı olarak saha incelemesi yapılması gerekmektedir (Van Westen vd., 2006).

Heyelan riski nitel, yarı nicel ve nicel yaklaşımlar olmak üzere üç şekilde değerlendirilebilir (Fell ve Hartford, 1997; Singh vd., 2017; Shano vd., 2022; Gao vd., 2022; Riaz vd., 2023). Nitel ve yarı nicel yaklaşımlar uzman görüşüne bağlı olarak ifade edilirken, nicel yaklaşımlar ise; matematiksel ve istatistiksel hesaplamalara bağlı olarak sayılar ve ekonomik değerlerle ifade edilirler (Castellanos Abella ve Van Westen , 2005; Althuwaynee and Pradhan, 2017; Roccati vd., 2021). Niteliksel ve yarı niceliksel risk analizler; heyelandan kaynaklanan potansiyel hasarların büyüklüğünü ve bunların ortaya çıkma ihtimalini sayısal derecelendirme ölçekleri ile ifade eden analizler olarak tanımlanmaktadır. Niceliksel risk analizi ise; potansiyel hasarın ve sonuçlarının sayısal olarak ifade edildiği analizler olarak tanımlanmaktadır (Tetik Biçer, 2017). Bu değerlendirmelerin hangisi kullanılırsa kullanılsın seçilen yöntem mevcut verilerin kalitesi ve miktarı ile uyumlu olmalıdır. Genel olarak, mevcut verilerin kalitesi ve miktarının nicel analiz için çok yetersiz olduğu geniş bir alan için, nitel bir risk değerlendirmesi daha uygulanabilir olabilir (Dai vd., 2002).

2.5. Heyelan Stabilizasyon Teknikleri

Heyelan stabilizasyon çalışmaları, bir yamaç veya şevin olası duraysızlıklara karşı stabilitesini sağlamak için yapısal ve yapısal olmayan önlemler dahil olmak üzere farklı

yaklaşım ve önlemleri sunmayı amaçlar (Logar vd., 2017; Capobianco vd., 2022). Bu yüzden, heyelan tehlikesi bulunan alanlarda, heyelan riskinin azaltılması ve önlenmesi için stabilizasyon çalışmalarının tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır (Genevois vd., 2022). Mevcut bir heyelanın iyileştirilmesi veya beklenen bir heyelanın önlenmesi çalışmaları, kaymaya neden olan kuvvetlerde azalmanın veya kaymaya karşı olan kuvvetlerde meydana gelen artışın bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir (Serdarevic ve Babic 2019; Pepe vd., 2020; Panigrahi, 2022). Bu yüzden herhangi bir stabilizasyon tekniği yukarıda bahsi geçen en az iki koşuldan birini sağlamak zorundadır.

Literatürde heyelan problemlerini çözmek için uygulanabilecek çeşitli iyileştirici yöntemler bulunmaktadır (Ramesh, 2021). Bu yöntemler arasında şevin geometrisini değişme, yük kaldırma, boşaltma, traşlama, destekleme yapıları, yüzey ve yeraltı drenajı, güçlendirme, istinat duvarları, bitki örtüsü, biyoteknik şev stabilizasyonu, zemin iyileştirme, ısıtma işlemleri vb. yer almaktadır (Royster, 1979; Turner ve Schuster, 1996; Abramson vd., 2001; Cevik ve Topal, 2004; Ontigao ve Sayao, 2004; Cornforth, 2005; Highland ve Bobrowsky, 2008; Arbanas vd., 2009; Serdarevic ve Babic, 2019; Pepe vd., 2020; Turconi vd., 2020). Yapılan araştırmalara göre, heyelanlı bölgeyi iyileştirmek için tek bir yöntem bazen yeterli olmakla birlikte çoğu zaman bir kaç yöntemin kombinasyonu şeklinde uygulanması daha sağlıklı sonuçlar vermiştir. Örneğin, belirli bir heyelanı iyileştirmek için kullanılan temel teknik şevin güçlendirmesi olabilirken, bazı durumlarda buna destek olarak drenaj ve şev geometrisinin değiştirilmesi de gerekli görülebilmektedir (Royster, 1979).

Son yıllarda heyelan tehlikesinin tanımlanması ve heyelanlarının etkisini en aza indirecek iyileştirme tekniklerinin geliştirilmesinde çok fazla yol kat edilmesine rağmen hala daha bilgi ve tecrübe bakımından eksiklikler mevcuttur. İyileştirme yöntemlerinin etkili olabilmesi için, ilk olarak şevin dengesini etkileyen kontrol parametreleri doğru bir şekilde belirlenmeli ve heyelan tehlikesinin etkisini azaltmak için uygulanabilecek en güvenilir ve en etkin tekniğine karar verilmelidir. Yani stabilizasyon tekniği, incelenen belirli bir yamaç veya şev problemine cevap verecek şekilde tasarlanmalıdır (Popescu, 2002). Terzaghi (1950)'e göre, “eğer bir yamaç harekete başladıysa, hareketi durdurma çalışmalarının hareketi başlatan süreçlere uyarlanması gerekir”. Örneğin, hareketin sebebi erozyon ise, stabilizasyon tekniği olarak, yamacın erozyona karşı güçlendirilmesi veya erozyon kaynağının ortadan kaldırılması gerekir (Popescu, 2001). Bu yüzden,

heyelan oluşumuna yol açan sebeplerin doğru bir şekilde tespit edilmesi, uygulanacak olan stabilizasyon yönteminin hem ekonomik hem de en etkili olanını tercih etmemize yardımcı olması bakımından oldukça önemlidir (Kazmi vd., 2017).

Yerleşim alanlarına duyulan ihtiyacın gün geçtikçe artmasından ve güvenli alanların giderek azalmasından dolayı heyelanlı ve heyelan oluşabilecek arazilerin yerleşime açılması her geçen gün artmaktadır. Bu yüzden, heyelandan kaynaklı ciddi kayıplar yaşanmadan önce mümkünse heyelanlı bölgeden uzaklaşılması, eğer mümkün değilse iyileştirici tedbirlerin alınması gerekmektedir (Schuster ve Highland, 2007). Tehlikeli alanların iyileştirilmesi gerektiği durumlarda ilk olarak; harekete sebep olan ve hareketi hızlandıran süreçler, bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleri, heyelan tipi, heyelan malzemesi, heyelanın boyutu ve konumu, son olarak heyelandan etkilenecek yerler göz önünde bulundurulmalıdır (Popescu, 2001). Çünkü, uygulanacak olan herhangi bir stabilizasyon çalışmasının başarısı, büyük ölçüde, zemin ve yeraltı suyu koşullarının araştırma aşamasında doğru bir şekilde tanımlanmasına ve daha sonra tasarımda uygulanabilmesine bağlıdır (Prodan vd., 2019). Jeolojik özelliklerin genellikle birçoğu önceden iyi bilinmediğinden dolayı, önerilen stabilizasyon teknikleri tasarımların yapımı sırasında veya sonrasında jeolojik özelliklere göre yapılacak değişikliklere karşı uyum sağlayacak kadar da esnek olmalıdır (Genevois vd., 2022).

İyileştirme yöntemleri seçilirken; teknik olarak uygulanabilirlik, ekonomik uygulanabilirlik, yasal uygunluk, sosyal ve çevresel kabul edilebilirlik kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır. *Teknik fizibilite kriteri*, iyileştirici önlemin etkinliğini sağlamak için sahadaki jeolojik ve hidrolojik koşulların analizini içerir. *Ekonomik fizibilite*, stabilizasyon tekniğinin fayda maliyet analizini gerçekleştirir. *Yasal uygunluk*, uygulanacak olan yöntemin yasal yönetmeliklere uygun olup olmadığını inceler. *Sosyal kabul edilebilirlik*, yapılacak önlem yapısının çevre halkı tarafından kabul görmesidir. *Çevresel kabul edilebilirlik* ise çevreyi olumsuz yönden etkilemeden iyileştirici yöntemlerin uygulanmasıdır (Popescu, 2001).

Heyelan İyileştirme Komisyonu (**IUGS WG / L (Popescu, zoi; Mihalic Arbanas ve Arbanas, zoi)**); heyelan stabilizasyon teknikleri ile ilgili bilgilerin standart bir formatta heyelan raporuna dahil edilmesine yardımcı olmak için heyelan stabilizasyon önlemlerinin kontrol listesini hazırlamışlardır (Çizelge 2.1). Buna göre önlemler: şev

geometrisinin düzenlenmesi, drenaj sistemleri, destek (istinat) yapıları ve şev güçlendirme çalışmaları olmak üzere dört grupta sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1. Heyelan stabilizasyon teknikleri (Popescu, 2001).

1. Şev Geometrisinin Değiştirilmesi

- 1.1. Eğim açısının azaltılması
- 1.2. Şevin tıraşlanarak fazla yükün kaldırılması
- 1.3. Şev topuğuna ağırlık konulması

2. Drenaj Sistemi

- 2.1. Yüzeysel drenajı (Boru ve hendeklerle fazla suyun toplayarak zemine sızmadan yüzeyden uzaklaştırılması)
- 2.2. Çeşitli materyallerle (Jeotekstil, çakıl dolgu vb.) doldurulmuş sığ veya derin kanal drenajları
- 2.3. Drenaj tünelleri, galerileri veya kanalları
- 2.4. Vakumla susuzlaştırma
- 2.5. Elektro-ozmoz yöntemiyle susuzlaştırma
- 2.6. Bitki örtüsü yardımıyla susuzlaştırma
- 2.7. Yatay ve dikey yönde derin drenaj sistemleri

3. Destek Yapıları

- 3.1. Ağırlık istinat duvarı
- 3.2. Gabion duvarlar,
- 3.3. Sandık duvarlar
- 3.4. Taş duvarlar
- 3.5. Kaya düşmesini zayıflatma ve engelleme sistemleri (Gerdirilmiş tel kafes, çelik levhalarla kaplama, beton püskürtme ve kaya/blok tutma hendekleri)
- 3.6. Yerinde dökme betonarme duvarlar

4. Yapısal Güçlendirme Sistemi

- 4.1. Kaya bulonları
 - 4.2. Mikro kazıklar
 - 4.3. Zemin çivileme
 - 4.4. Kaya-zemin ankrajı
 - 4.5. Elektro-ozmotik ankrajlar
 - 4.6. Bitki örtüsü ekimi (Kök mukavemeti mekanik etki)
 - 4.7. Dondurma işlemi
 - 4.8. Isıl işlemler
-

2.5.1. Şev Geometrisinin Değiştirilmesi

Basit ve ucuz olan bu yöntemin uygulanabilmesi için tehlikeli bölge öncelikle bu yöntemin uygulanabilirliğine elverişli olmalıdır. Yamacın güvenliğini sağlamak amacıyla daha dik eğime sahip yamaçların daha düşük eğime sahip yamaçlara dönüştürülmesi, yamacın tıraşlanarak fazla yükün kaldırılması ve şev topuğuna ağırlık konulması veya artırılması şeklinde uygulanabilir (Chen, 2001).

2.5.2. Drenaj Sistemi

Kayma mukavemetinin düşmesinde gözenek suyu basıncının oynadığı önemli rol nedeniyle yüzey ve yeraltı drenaj sistemleri stabilizasyon teknikleri arasında çok önemli bir yere sahiptir. Düşük maliyetle yüksek duraylılık sağlaması açısından, fazla yüzey ve yeraltı suyunun ortamdaki drene edilmesiyle zeminin doygunluk derecesinin düşürülmesi en yaygın ve en başarılı stabilizasyon yöntemlerinden biridir. Uzun süreli stabilizasyon için drenaj sisteminin sürekli olarak işlevini sürdürmesi oldukça önemlidir, bu sebeple bu teknik uygulandıktan sonra düzenli olarak kontrol edilmeli ve bakımları yapılmalıdır (Chen, 2001).

2.5.3. Destek Yapıları Sistemi

Diğer yöntemlere göre oldukça pahalı olan bu yöntemin uygulama alanlarının çok geniş olmasından dolayı stabilizasyon çalışmalarında çok sık tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde ağırlık yapıları, kaymaya yol açan kuvvetlere karşı koyacak şekilde tasarlanır. Destek yapıları; kazık sistemleri, istinat duvarları, gabion duvarlar, sandık duvarlar ve taş duvarlar şeklinde örneklendirilebilir (Chen, 2001). Diğer kütle hareketlerine oranla daha hızlı ve ani gelişen kaya düşmesi ve moloz akması gibi duraysızlıklarda; kaya düşmesini engellemek için gerdirilmiş tel kafes, çelik levhalarla kaplama, beton püskürtme ve kaya/blok tutma hendekleri uygulanmaktadır (Kaba, 2017). Ayrıca, moloz akmalarının kritik bölgelere ulaşmadan yönleri değiştirmek veya hızlarını keserek durdurmak için saptırma ve durdurma duvarları, saptırma kanalları ve moloz çitleri gibi destek yapıları kullanılır (Kaba, 2017).

2.5.4. Yapısal Güçlendirme Sistemi

Bu yöntem ile zemin içine çeşitli yapısal bileşenler eklenerek ya da enjekte edilerek zemin taşıma gücünün ve kaymaya karşı koyan kuvvetlerin artırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntemde, kaya saplamaları, mikro kazıklar, zemin çivileri, zemin ve kaya ankrajları, enjeksiyon, jetgrout veya derin karıştırma kolonları kullanılarak zeminin kaymaya karşı güçlendirilmesi sağlanır. Aynı zamanda, zeminde bulunan ve zemin taşıma gücünün düşmesine sebep olan fazla suyu uzaklaştırmak için yapılan bir takım çalışmalarda (ısıtma işlemler, dondurma, elektro-ozmoz, bitkilendirme, jeotekstiller) yine bu grup içinde yer alır (Popescu, 2001). Bu teknikler, çok büyük hacim içermeyen duraysızlıklar ile özellikle yerleşim yerleri gibi şev geometrisinin değiştirilmesi veya basamaklandırma bakımından sınırlamaların olduğu bölgelerde oldukça faydalıdır. Ancak, bu tür stabilizasyon tekniklerinin kullanımı çok geniş alanları kapsayan duraysızlıklarda her zaman etkili olamamaktadır (Schuster ve Highland, 2007).

Farklı koşullar altında oluşan heyelanların kendilerine ait vaka geçmişi olduğundan dolayı, güvenlik ve ekonomi arasındaki dengeyi optimize ederek heyelan etkisini en aza indirmek için etkili stabilizasyon yöntemleri geliştirmede heyelanların geçmişlerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece, heyelanların vaka geçmişleri dikkate alınarak yukarıda anlatılan dört temel önlemlerden biriyle veya çeşitli kombinasyonlarla heyelanlar önlenebilir veya kontrol altına alınabilir.

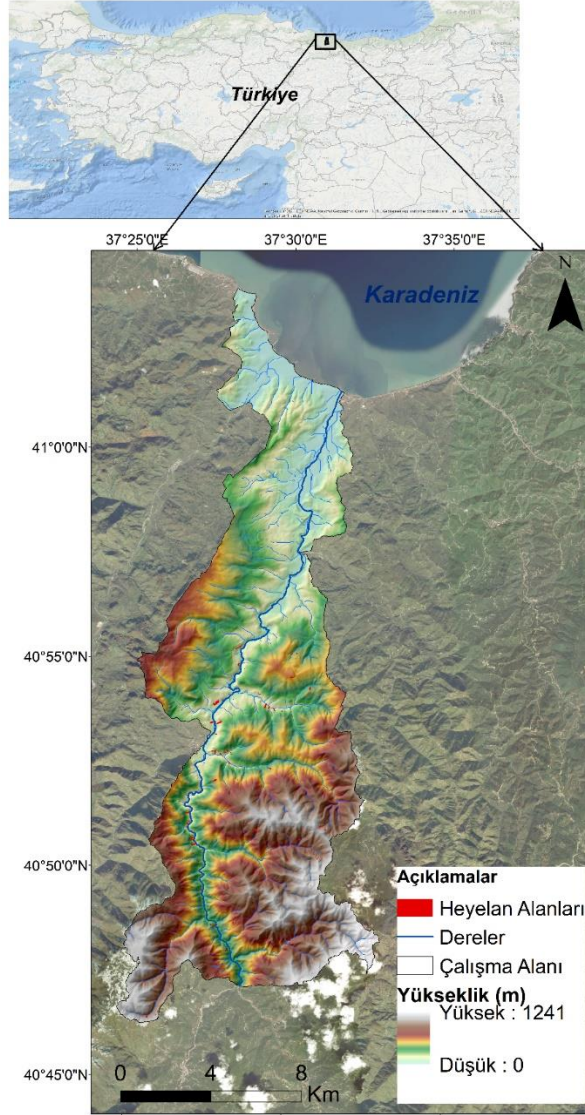
Son zamanlarda iyileştirici yöntemler seçilirken çevre ile uyumlu olup olmadığı daha önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu yüzden, çevre ile daha uyumlu olan, doğal malzemelerin kullanımına izin veren, estetik ve maliyet açısından diğer tekniklere göre daha düşük olan biyoteknik stabilizasyon teknikleri şevlerin ve yamaçların uzun süre dengelenmesini sağlamak ve yeraltısu seviyesine karşı koymak amacıyla son zamanlarda daha fazla kullanılmaya başlanmıştır (Popescu, 2001). Biyoteknik şev stabilizasyon yöntemleri eşzamanlı olarak çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar sağlayan ve yamacın dayanıklılığını arttırmaya yardımcı olan doğa tarafından desteklenen çözümler olarak tanımlanmaktadır (Bauduceau vd., 2015). Biyoteknik şev stabilizasyon yönteminde, genellikle canlı materyaller (bitki, ahşap vb.) veya canlı ve cansız materyalin karışık olduğu (jeo-sentetik, jeo-tekstil, jeo-kompozitler) ürünler kullanılarak şev ve yamaç stabilitesi problemleri çözülmeye çalışılır (Gray ve Sotir 1992). Ancak, biyoteknik stabilizasyon yöntemleri derin heyelanları önlemek için çok önemli

olmasa da sığ heyelanları önlemek için oldukça faydalı bir mühendislik çözümü olarak görülmektedir (Morgan ve Rickson, 2003).

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışma alanı, Orta Karadeniz Bölgesinde, Ordu ili Fatsa ilçesinin güneydoğusunda, Bolaman Havzası içerisinde yer almaktadır. Bolaman Havzası, güneyden Kelkit Çayı, doğudan Melet Irmağı ve batıdan da Elekçi Deresi'nin su bölümü hatlarıyla sınırlanır (Özdemir, 2006). Akarsu havzası, Çamaş, Fatsa, Gürgentepe, Kabataş, Aybastı, Gököy, Korgan, Çatalpınar ilçe sınırlarında bulunmaktadır. Çalışma alanı olan Bolaman Çayı Alt Havzası yaklaşık 1339 km² bir alanı kapsamakta olup bu alanın deniz seviyesinden olan en fazla yüksekliği yaklaşık 1241 metredir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çalışma alanının konumu

Bolaman havzası, Bolaman, Şahsene, Ilıca, Keş, Eceli, Direkli ve Medrese olmak üzere toplam yedi alt havzaya ayrılmıştır (Tablo 3.1). Havzayı oluşturan akarsular, boyları uzun, debileri nispeten yüksek ve tüm yıl yataklarında su bulduran daimi akarsulardır. Genellikle şiddetli yağışlardan sonra debileri ani olarak yükselir ve bu dönemlerde yataklarından taşarak zaman zaman doğal afetlere sebep olurlar (Dölek, 2008).

Tablo 3.1. Bolaman havzasını oluşturan alt havzalar ve havza içindeki oranları (Dölek, 2008).

Alt Havzalar	Kapladıkları Alanlar (Km ²)	Havza İçindeki Oranı (%)
Bolaman Kolu	178.1	13.3
Şahsene Kolu	132.6	9.9
Ilıca Kolu	99.4	7.4
Keş Kolu	202.2	15.1
Eceli Kolu	329.5	24.6
Direkli Kolu	227.4	17
Medrese Kolu	170.3	12.7
TOPLAM	1339,5	100

Bölgenin hem morfolojik yapısı hem de iklim özellikleri nedeniyle heyelan ve sel gibi doğal tehlikeler yaygın olarak görülmektedir. Bu tehlikeler bölgede meydana geldikleri zaman ciddi can ve mal kayıplarına neden olarak afete dönüşebilmektedir. Örneğin 2018 Ağustos ayında Ordu ilinde ani sel ve heyelanlarla sonuçlanan meteorolojik olaylar yaşanmış ve afete dönüşmüştür. Yaşanan ani sel ve heyelanlar çok sayıda ölüm ve yaralanmaya neden olmuştur. Köprüler, yollar ve evler gibi birçok altyapı unsuru ve fındık bahçeleri sel ve/veya heyelan nedeniyle hasar görmüştür. Ayrıca bu afetler birçok bina ve köylerin tahliye edilmesine yol açmıştır (Kocaman vd., 2020).

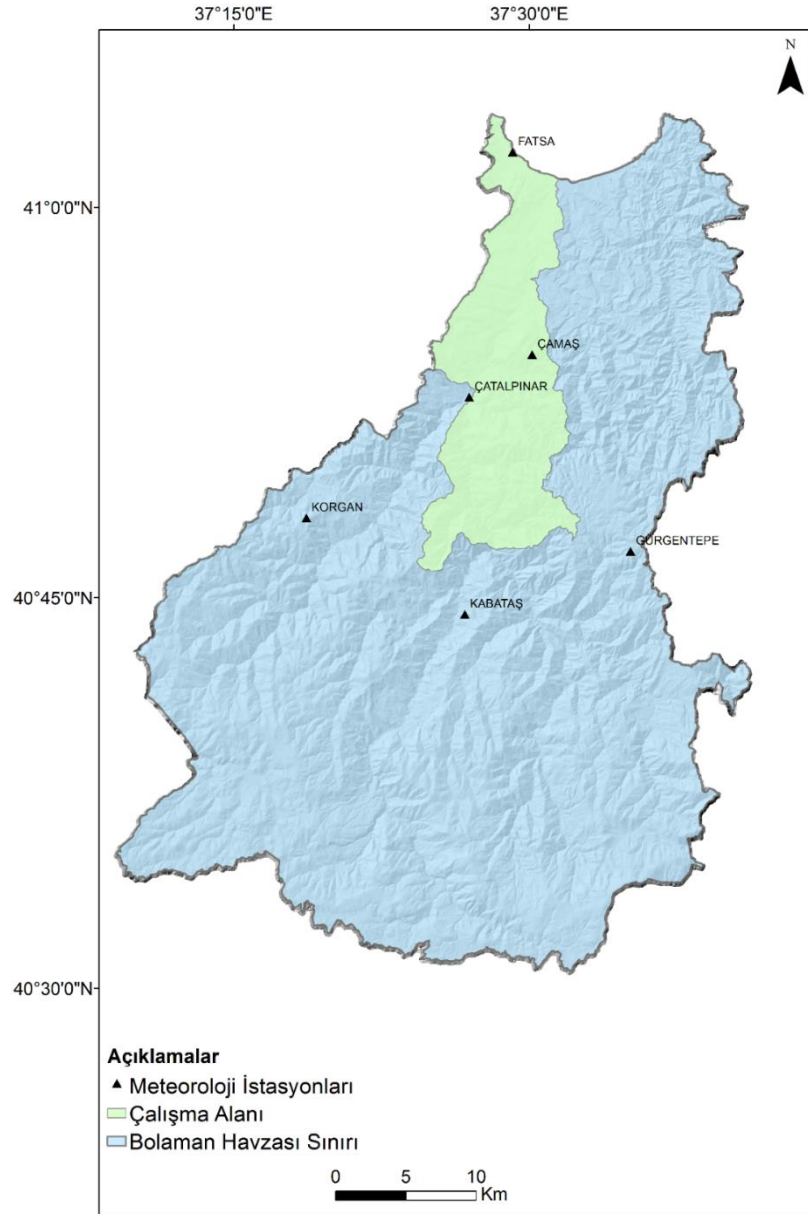
Bölgenin kendine has özellikleri sebebiyle heyelan ve sel gibi doğal tehlikelerin meydana gelmesi sürpriz değildir. Bunların yanı sıra bitki örtüsünün yok edilmesi, çarpık kentleşme, dere yataklarındaki yapılaşmalar gibi insan kaynaklı müdahaleler heyelanların oluşmasına yol açarak heyelandan kaynaklı hasarların artmasına neden olmaktadır. 1950-2011 arasında bölgede meydana gelmiş olan en yaygın doğal afetler %80 ile heyelanlardır. Heyelanlardan sonra ise en etkili doğal afet %9'luk oran ile sellerdir (Şenol, 2019). Özellikle heyelan ve kaya düşmeleri yerleşim yerleri ve ulaşım hatları için ciddi derecede tehdit oluşturmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, heyelanların sıklıkla yaşandığı Bolaman Çayı Alt Havzası tez kapsamında çalışma alanı olarak belirlenmiştir.

Bolaman Havzası'nın konumu, iklimi, jeolojik, jeomorfolojik yapısı, hidrografyası ve toprak özellikleri ekonomik faaliyetler üzerinde etkili olmuştur (Özdemir, 2006). Havzanın, ilk zamanlarında özellikle içkesimlerinde küçükbaş hayvancılık önemli bir gelir kaynağı iken, tarımsal faaliyetler de bir diğer önemli veri kaynağı olmuştur. Yine meyve tarımı, Bolaman dolaylarında ceviz yetiştiriciliği ile bağ-bahçe tarımı önemli tarımsal faaliyetler haline gelmiştir (Özdemir, 2006). 15. yüzyılda arpa ve mısır tarımının daha önemli olduğu havzada, 1613 yılından sonra keten kendir tarımı da önemli hale gelmiştir (Taştamir, 2003). 19. yüzyıldan sonra Bolaman havzası'nda buğday, mısır, arpa ve fasulye önemli tarımsal faaliyetler haline gelmiştir. Cumhuriyet dönemi boyunca Bolaman havzasında tarla tarımı ve hayvancılık ekonomik faaliyetler bakımından ön planda iken daha sonra yerini fındık bahçelerine bırakmıştır. Cumhuriyet döneminin ilk yıllarında Ordu ilinde 1924 yılında 3.200 ton fındık elde edilirken, 1951 yılında 27.800 ton üretim, 1980 yılında ise 67.190 ton fındık üretimi gerçekleştirilmiştir. Türkiyede fındık üretiminde Ordu ili şuan birinci sırada yer almaktadır (Özdemir, 2006). Havzanın yükseltisine bağlı olarak kıyıda iç kesimlere doğru değişen sıcaklık ve yağış koşullarının bitki örtüsü üzerinde yarattığı farklılık tarımsal faaliyetler üzerinde de etkili olmuştur. Kıyı bölgesinin fındık yetiştiriciliğine uygun olması, ormanlık alanlarının tahrip edilerek fındık bahçelerine dönüştürülmesine sebep olmuştur. Havzanın içkesimlerinde ise yaklaşık 1000 metreden yüksek alanlarda hayvancılık ve tahıl tarımı egemen hale gelmiştir (Özdemir, 2006).

Çalışma alanının içinde bulunduğu Ordu ili, Karadeniz ve Karasal iklimlerin etkisi altında olup ılıman bir iklime sahiptir. Genel olarak yılın dört mevsimini yağışlı geçiren Ordu ili denizin etkisine bağlı olarak kışları ılık, yazları ise sıcak ve nemli geçmektedir. Ordu ili iklimsel olarak sahil şeridi ve iç kesim olmak üzere iki farklı şekilde ele alınmaktadır. Ordu'nun kuzeyinde yer alan kıyı kesiminde Karadeniz iklim tipi hakim olup yazlar sıcak, kışlar ılık ve yağışlıdır. İç kesimlerdeki yüksek rakımlı kesimlerde bölgelerde ise Çambaşı ve Canik Dağları nedeniyle Karadeniz ikliminin etkisi giderek azalmakta ve karasallık etkisi artarak yağışlar azalmaktadır (Bilgin, 2019). İlin sahil kesimindeki sıcaklık le sahilden 10– 15 km içeride ölçülen sıcaklık değerleri arasında 8-10°C'lik değişimler gözlemlenmektedir (Bamya Merttürk, 2019). Meteoroloji Genel Müdürlüğünden (MGM) alınan verilere göre: bölgede yıllık ortalama yağış 1352 mm'dir. Ordu ilinde yıllık ortalama sıcaklık değeri 14.5⁰ C, en düşük sıcaklık ortalaması ise 7⁰ C

civarında olup yıllık ortalamalara göre Temmuz ve Ağustos ayları en sıcak aylar olarak yaşanırken, en soğuk aylar ise Ocak ve Şubat aylarında yaşanmaktadır (Kalecik, 2019).

Bolaman havzasının içinde ve yakın çevresinde yer alan meteoroloji istasyonlarına ait uzun dönem günlük yağış verileri MGM'den alınarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Havza içerisinde, 17689 nolu Fatsa (2 m rakım), 18524 nolu Çamaş (510 m rakım) ve 19224 nolu Çatalpınar (115 m rakım) istasyonları bulunurken, havzanın yakın çevresinde ise 18528 nolu Gürgentepe (1260 m rakım), 19223 nolu Korgan (1109 m rakım) ve 18530 nolu Kabataş (636 m rakım) meteoroloji istasyonları yer almaktadır (Şekil 3.2). Zamansal olabilirlik hesaplamalarında yağış verisinin kullanılabilmesi için en az 10 yıllık kesintisiz veri kaydının olması gerektiği için, tez kapsamında havza içerisinde bulunan Fatsa istasyonuna ait uzun dönem yağış verileri “Zamansal olabilirlik değerlendirmesinde” dikkate alınmıştır.



Şekil 3.2. Çalışma alanı ve yakın çevresinde bulunan meteoroloji istasyonlarının havza içerisindeki dağılımı

Karadeniz bölgesinin engebeli yapısı sebebiyle her noktada yağış ölçümü alınması hem çok zor hem de oldukça maliyetli bir işlemdir. Bu sebeple ölçüm yapılamayan bölgelerde yağışın mekânsal dağılımını ortaya koymak için enterpolasyon tekniklerinden faydalanılmaktadır (Akacak ve Taş, 2021). Literatürde, istasyon verilerini kullanarak farklı jeostatiksel ve mekânsal analiz yöntemleri ile yağışın haritalanmasına dair yapılan birçok çalışma bulunmaktadır (Doğru ve Güngöroğlu, 2022).

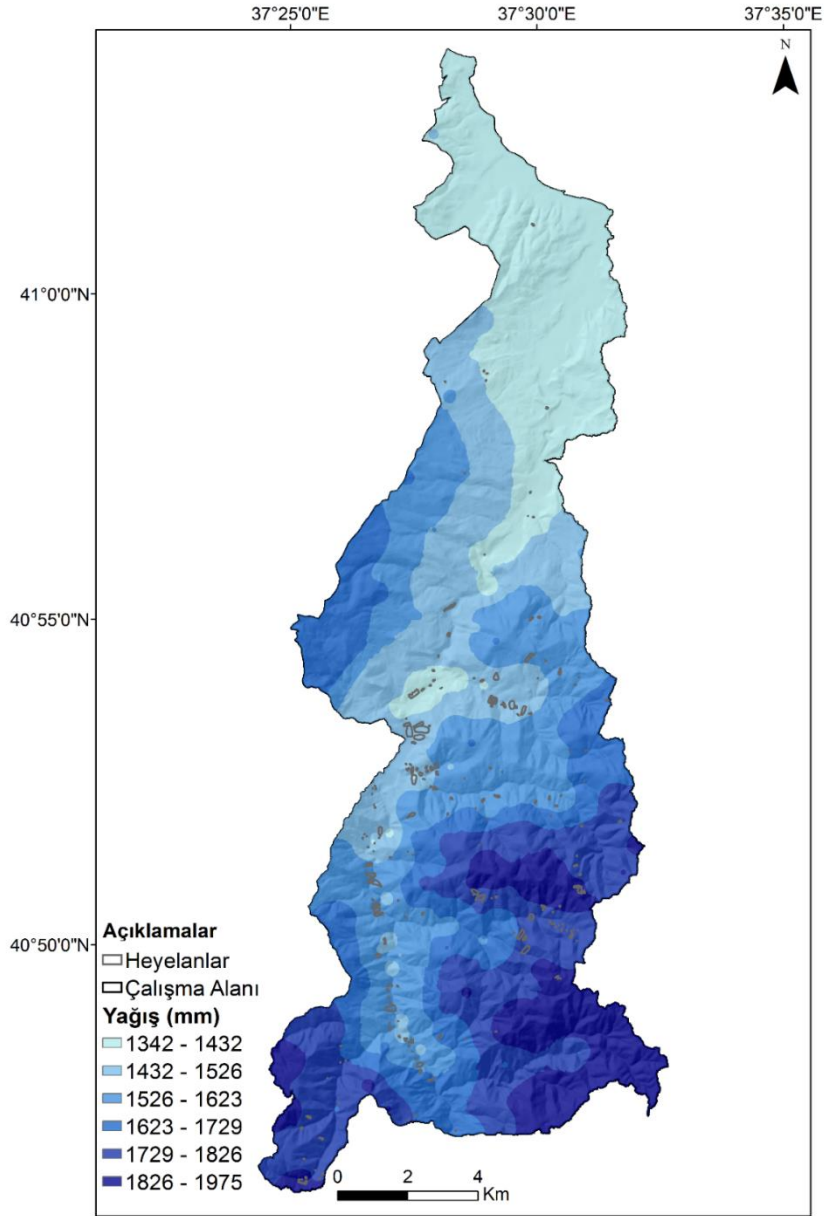
Bu çalışma kapsamında, uzun dönem yağış verisi olan sadece Fatsa istasyonunun bulunmasından ve çalışma alanının farklı yükseltilere sahip olmasından dolayı yağış miktarının farklı yükseltilerdeki mekânsal dağılımının üretilmesi amaçlanmıştır. Mekânsal yağış dağılımının hesaplanması ise iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biri olan farklı yükseltiye sahip alanlarda yağışın mekânsal dağılımının hesaplamalarında sıkça tercih edilen Schreiber formülüdür. Aynı zamanda bu formül afet risk analizlerinde (heyelan, çığ, sel gibi) de kullanılarak yağışın mekânsal dağılımı belirlenmektedir (Işık vd., 2018). Formülün temelinde deniz seviyesinden itibaren yükseldikçe yağışın artması mantığı bulunmaktadır. Bu formüle göre her 100 metre yağış miktarı 54 mm artış göstermektedir. Böylece, Schreiber formülü kullanılarak yağış miktarı bilinmeyen alanlarda yağış miktarı tespit edilebilmektedir (Hepbilgin ve Koç, 2018; Işık vd., 2018). Schreiber formülü eşitlik 3.1 ile hesaplanmaktadır (Schreiber, 1904).

$$P_h = P_0 + (54h) \quad (3.1)$$

Formülde, P_h yükseltisi belli olan bir noktanın hesaplanacak yağış miktarı (mm), P_0 yükseltisi belli olan ve yağış ölçümü yapan istasyonun yağış miktarı (mm), h ise P_h ile P_0 arasındaki yükselti farkını göstermektedir (Meral ve Eroğlu, 2021).

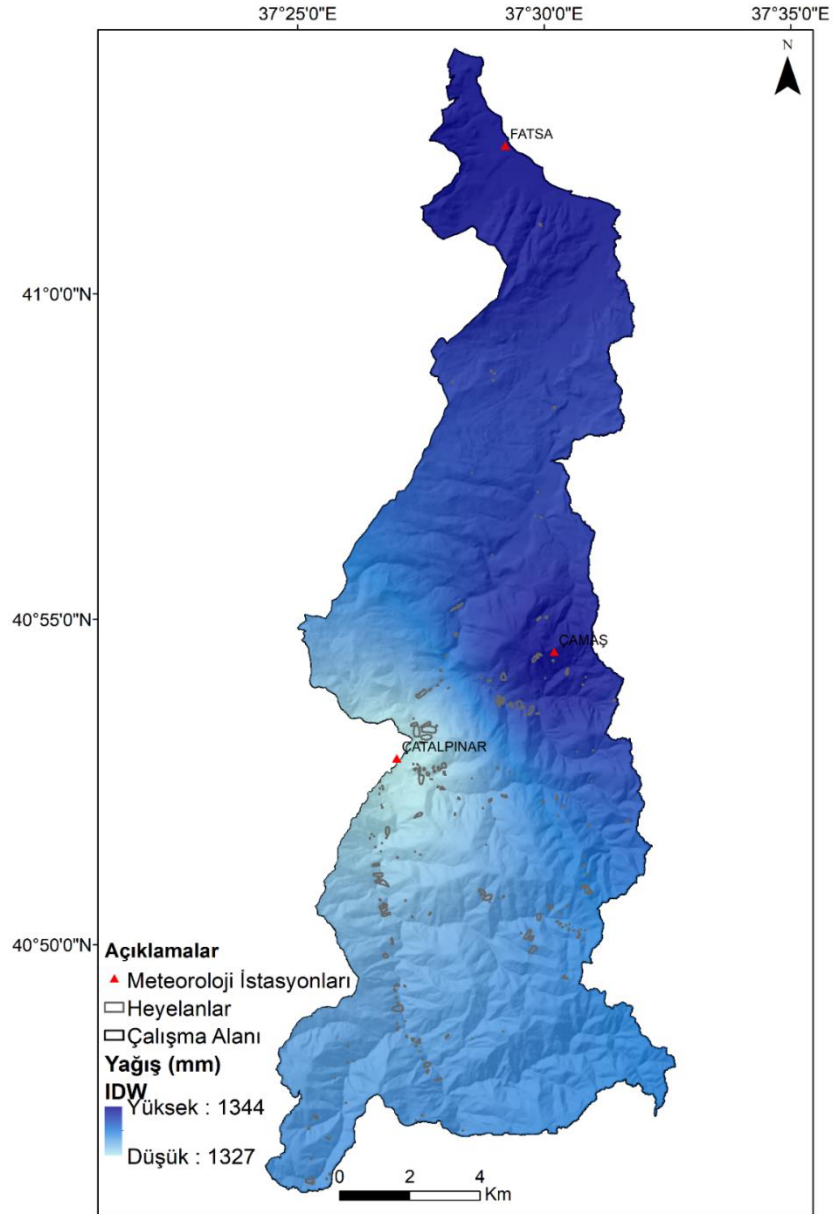
İkinci kullanılacak yöntem olan IDW (Inverse Distance Weighted), mekansal analizde yaygın kullanılan bir enterpolasyon yöntemidir (Yang vd., 2020). IDW, bilinen örnek noktalara ait değerler kullanılarak örneklenmeyen noktalara ait hücre değerlerinin tespit edilmesi için kullanılan bir teknik olarak tanımlanmaktadır (Taylan ve Damçayırı, 2016). Bu yöntem, enterpole edilecek yüzeye yakın olan noktaların uzakta bulunan noktalara göre daha fazla ağırlığa sahip olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Bu yöntem, örnek alınan noktaların ağırlıklı ortalamasını temel alarak yüzey enterpolasyonu gerçekleştirir ve enterpole edilen noktadan uzaklaştıkça ağırlığı da azaltır (İlker vd., 2019). Her iki yöntem de CBS yazılımı olan ArcGIS 10.4.1 programında hesaplanmış ve haritalar elde edil

Çalışma alanı için yağışın mekânsal dağılımının üretilmesi, iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Birincisi, Fatsa istasyon verileri, başlangıç noktası kabul edilerek Schreiber Formülü yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen alansal yağış dağılım haritasına (Şekil 3.3) göre, yağış miktarı yükseklik arttıkça artış göstermektedir. Bu yöntemde en düşük yağış 1342 mm, en yüksek yağış 1975 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Schreiber formülüne göre çalışma alanına ait yıllık ortalama yağış dağılımı

Daha sonra, IDW uygulaması ile havza sınırları içinde bulunan meteoroloji istasyonlarının uzun yıllar ortalama yağış verileri yardımıyla yeni bir yağış haritası üretilmiştir (Şekil 3.4). Elde edilen alansal yağış dağılım haritasına göre en düşük yağış 1327 mm ve en yüksek yağış 1344 mm'dir. Havza geneli heyelan dağılımına ve elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman heyelanlar genellikle düşük yağışların yer aldığı kesimlerde tetiklenmiştir. Bu yüzden Fatsa istasyonu yağış verilerinin çalışma alanını yansıttığını ve bu veriler ile zamansal olabilirlik analizlerinin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.4. IDW yöntemine göre çalışma alanına ait yıllık ortalama yağış dağılımı

3.2. Yöntem

Bu başlık altında tez kapsamında kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilecektir.

3.2.1. Envanter ve Veri Tabanının Oluşturulması Çalışmaları

Heyelan envanter haritaları en temel heyelan haritaları olup arazideki mevcut heyelanların yeri, türü ve aktivite durumu hakkında bilgiler sunar (Wieczorek, 1984; Fell vd., 2008). Bu haritalar, heyelan duyarlılık, tehlike ve risk değerlendirmelerinin ana girdi parametrelerini oluşturması bakımından oldukça önemlidir (Guzzetti vd., 2006). Çünkü,

heyelan envanterinin ve heyelanları oluşumunu tetiklediği düşünülen faktörlere ilişkin veri tabanının oluşturulması; geçmişte oluşmuş hareketlerin gelecekte oluşabilecek hareketler için ipucu sağlayarak mevcut heyelanlarla oluşturulmuş haritalar ile heyelan tehlikesi bulunan alanlar tahmin edilmeye çalışılmaktadır (Varnes, 1984; Carrara vd., 1995). Bu yüzden, heyelanlardan kaynaklanan kayıp ve hasarların azaltılması hususunda bölgesel olarak etkili olan heyelanların mekansal dağılımının ayrıntılı bir şekilde haritalanarak kayıt altına alınması önem arz etmektedir (Çellek, 2013).

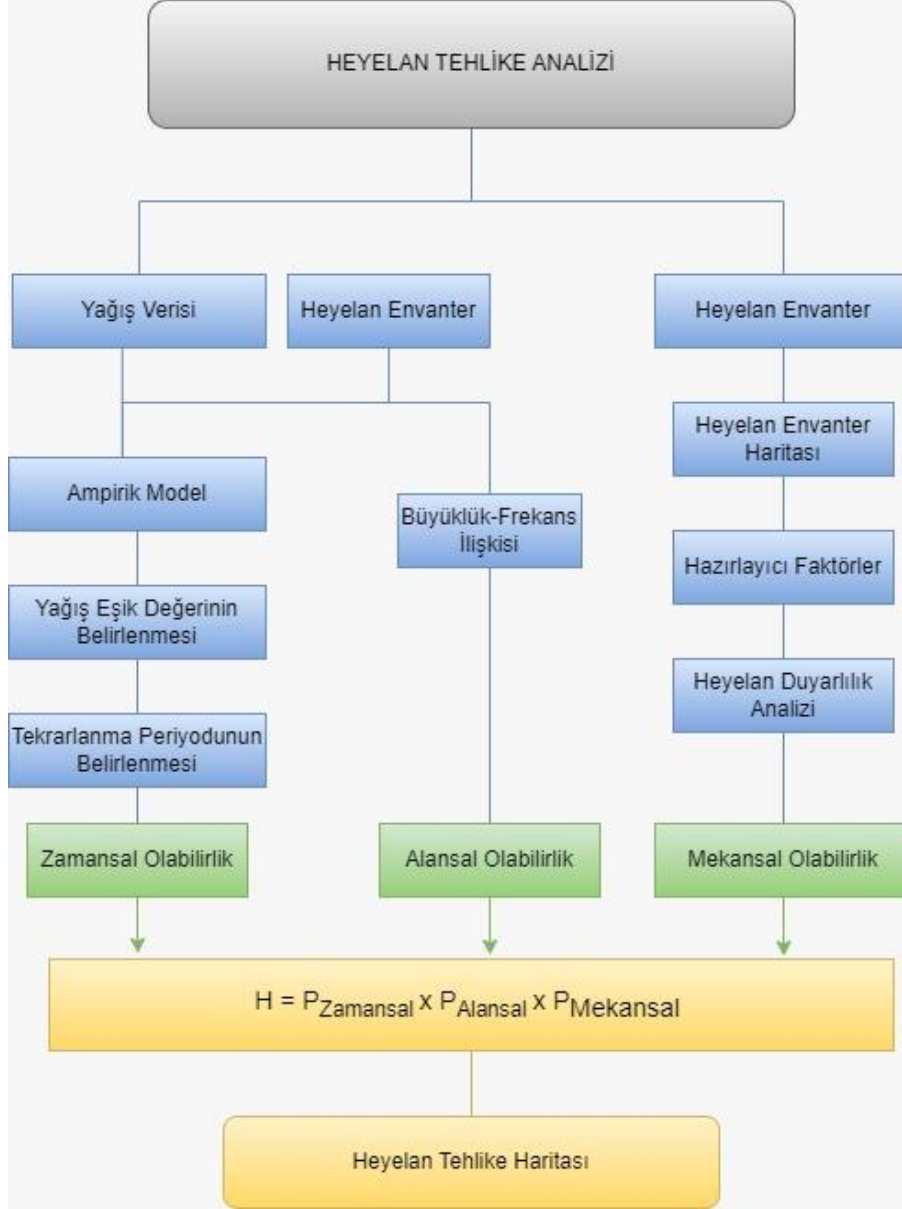
Heyelan envanter haritaları, tarihsel kayıtlar, hava fotoğrafları, uydu görüntüleri, ve arazi çalışmalarıyla elde edilmektedir. Çalışma havzasındaki mevcut heyelanların tespit edilmesi, bölgeye ait heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi ve heyelan oluşumunda etkili olan parametreleri tespit edilmek için öncelikle arazi çalışmaları ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2021 Eylül ayında ve 2022 Haziran ayında gerçekleştirilmiş olan iki haftalık arazi incelemelerinde, ilk olarak yaklaşık 1339 km² olan havza boyunca yerleşim yerleri, tarım arazileri, ormanlık alanlar, yol ve dere hatları boyunca gözlem yapılarak heyelan alanları genel olarak incelenmiştir. Daha sonra, farklı dönemlere ait uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları da incelenerek, heyelan envanter haritası oluşturulmuştur. Yapılan arazi çalışmaları ve uzaktan algılama teknikleri neticesinde çalışma alanında toplam 231 adet heyelan tespit edilmiştir. Genel olarak yüzeysel heyelanların gözlemlendiği sahada en büyük heyelanın alanı 0.63501 km², en küçük heyelanın alanı ise 0.000036 km² olarak hesaplanmıştır. Daha sonra tespit edilen heyelan lokasyonları poligon olarak sayısallaştırılmış ve tüm poligon formatındaki veriler analizde kullanılmak amacıyla ArcGIS 10.4.1 programıyla 10x10 raster veri formatına dönüştürülmüş ve heyelanların piksel değerleri elde edilmiştir. Toplam heyelanlı piksel sayısı 10742 olarak hesaplanmış ve heyelanlı alanlar için "1" ve heyelansız alanlar içinse "0" değerleri verilmiştir. Vektörden raster formatına dönüşüm sırasında genelleştirme nedeniyle çok küçük heyelanlarda ve heyelanların sınır piksellerinde veri kaybı veya yarım piksele (5 m) kadar konumsal kayma (taşma) gerçekleşmesi beklenmelidir. Ancak toplam heyelanlı piksel sayısının 10742 olması ve elde edilen tahmin doğruluğunun lojistik regresyon için %74 rasgele orman için ise %91.7 olması nedeniyle veri dönüşümü nedeniyle oluşan hatalar toplam hata payı sınırlarının içinde kalmaktadır ve kabul edilebilir seviyededir.

3.2.2. Heyelan Tehlike Çalışmaları

Tehlike tanımlanması ilk kez Varnes (1984) tarafından yapılmış ve çok fazla kabul görmüştür. Varnes 1984 yılında tehlike tanımını zarar oluşturma potansiyeline sahip herhangi bir doğal afet olayının belirli bir sürede ve belirli bir alan içinde oluşma olasılığı olarak ifade etmiştir. Tehlike değerlendirmesi, heyelan risk değerlendirmesinin önemli bir adımını oluşturmaktadır. Tehlike haritalarını oluştururken dikkat edilmesi gereken en kritik nokta, envanterin ve veri tabanının doğru ve yeterli bir şekilde oluşturulmuş olmasıdır (Çetinkaya, 2019). Potansiyel heyelanların belirli bir zamanda mutlak büyüklükte nerede ve nasıl oluşacağına dair sorulara cevap vermek için (Guzzetti vd., 2005) üç olasılığı (mekansal, zamansal ve büyüklük) kullanarak aşağıdaki eşitlik 3.2 ile hesaplamışlardır.

$$H = P(S) \times P(N_L) \times P(A_L) \quad (3.2)$$

H tehlike olasılığını, P (S) mekansal olasılık, P (N_L) zamansal olasılık ve P (A_L) alansal olasılığı temsil etmektedir. Şekil 3.5'te tehlike değerlendirme aşamalarında kullanılan parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Heyelan tehlike değerlendirme akış şeması

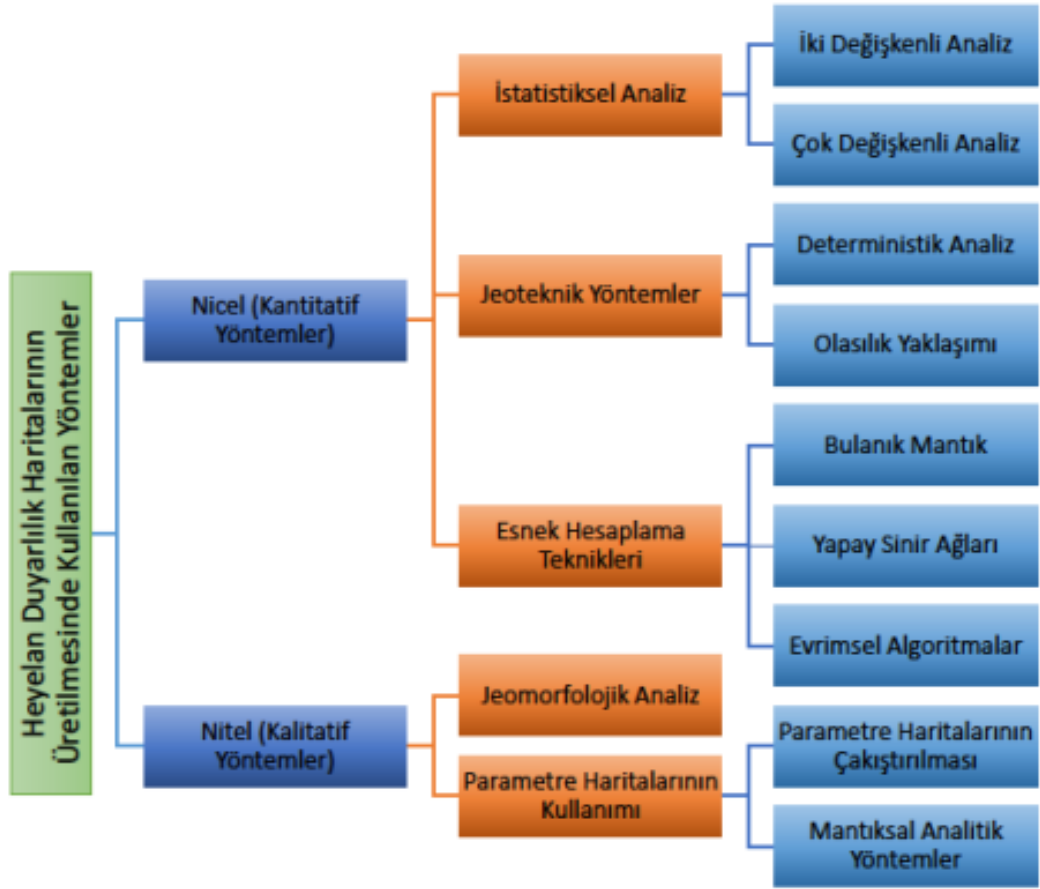
3.2.2.1. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları

Heyelan tehlike haritalarının üretiminde kullanılan mekânsal olabilirlik parametresi, heyelan duyarlılık haritaları ile oluşturulmaktadır (Tyagi vd., 2022). Heyelan duyarlılığı, sonraki yıllarda belirli bir bölgede heyelanın meydana gelmesi olasılığı olarak tanımlanmaktadır; duyarlılık analizleri heyelanların mekânsal dağılımları ile birlikte heyelan oluşumunda etkili olan parametreleri temel alarak heyelana karşı duyarlı alanların tahmin edilmesini amaçlamaktadır (Hemasinghe vd., 2018). Bu yüzden, doğru bir duyarlılık analizi yapmak için, yakın ve geçmiş tarihli heyelan bilgilerinin eksiksiz ve güvenilir olması gerekmektedir (Aditian vd., 2018).

Son dönemlerde, heyelanların geçmişte meydana gelmiş heyelanlara benzer ortamlarda oluşacağı varsayılarak heyelan duyarlılık haritalaması için birçok model kullanılmış ve önerilmiştir (Zhu vd., 2014; Wu vd., 2016; Pourghasemi ve Rahmati, 2018.; Roccati vd., 2019; Moharrami vd., 2020; Tyagi vd., 2022). Bu yöntemleri Aleotti ve Chowdhury (1999), nitel ve nicel yöntemler olarak tanımlamışlardır (Şekil 3.6). Duyarlılık çalışmalarına araştırmacılar uzman görüşüne dayanan niteliksel yöntemlerle başlamışlardır (Nilsen vd., 1979). Daha sonra ise AHP, iki değişkenli ve çok değişkenli istatistiksel analizler, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve rastgele orman gibi makine öğrenmeleri yöntemleriyle duyarlılık haritaları üretilmeye başlanmıştır (Yalçın vd., 2011).

Nitel yöntemler öznedir; uzman görüşlerine bağlı olarak duyarlılık seviyesini belirlemeye çalışır (Neaupane ve Piantanakulchai, 2006). Nicel yöntemler ise, bir bölgede heyelan oluşma olasılığını tahmin etmek için matematiksel ve istatistiksel modeller kullanır (Guzzetti vd., 2000). Nicel yöntemler, frekans oranı gibi iki değişkenli istatistiksel modelleri (Süzen ve Doyuran, 2004; Pal ve Chowdhuri, 2019), çok değişkenli istatistiksel model olan lojistik regresyon (Dai vd., 2002; Ayalew ve Yamagishi, 2005; Nandi ve Shakoor 2010; Bai vd., 2011; Kavzoğlu vd., 2015; Erener vd., 2016; Tsangaratos ve Iliia, 2016; Zhu vd., 2018; Zhang vd., 2019; Zhao vd., 2019; Du vd., 2020; Goyes-Peñafiel ve Hernandez-Rojas, 2021) gibi modelleri içermektedir. Son zamanlarda, makine öğrenimi yöntemleri çeşitli alanlarda popüler hale gelmiştir. Yapay zekânın bir dalı olan makine öğrenimi, eğitim verilerinden öğrenmeye dayalı bilgileri analiz etmek ve tahmin etmek için bilgisayar algoritmalarını kullanır. Güvenilirliği ve yüksek genelleme kapasitesi nedeniyle, heyelan duyarlılık analizlerinde makine öğreniminin kullanımı son yıllarda oldukça yaygın hale gelmiştir. Makine öğrenimi yöntemleri arasında yapay sinir ağı (Lee vd., 2001; Gomez ve Kavzoğlu, 2005; Kanungo vd., 2006; Lee ve Pradhan, 2007; Nefeslioğlu vd., 2008; Arnone vd., 2014; Gelisli ve Babacan 2015; Tien Bui vd., 2016; Phong vd., 2021) bulanık mantık (Fuzzy) (Juang vd., 1992; Ercanoğlu ve Gökçeoğlu, 2004; Pradhan vd., 2009; Dehnavi vd., 2015; Uvaraj ve Neelakantan, 2018; Razifard vd., 2019; Baharvand vd., 2020) ve rastgele orman (Youssef vd; 2016; Pourghasemi ve Kerle, 2016; Chen vd., 2017; Kim vd., 2018; Taaleb vd., 2018; Hong vd; 2019; Chu vd., 2019; Dou vd., 2019; Dang vd., 2020; Zhao vd., 2021., Orhan vd., 2022; Karakaş vd., 2022) yöntemleri sıklıkla uygulanmaya başlanmıştır. Nicel

yöntemler nitel yöntemlere göre daha az öznel dirler bu yüzden de daha objektif sonuçlar elde edilir (Thiery vd., 2007).



Şekil 3.6. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan bazı yöntemler (Taşkanat, 2020).

3.2.2.1.1. Lojistik Regresyon Yöntemi

Çok değişkenli istatistiksel tekniklerden biri olan Lojistik Regresyon (LR), heyelan envanteri ile heyelana neden olan parametreler arasındaki ilişkiyi elde etmek için son zamanlarda kullanılan en yaygın yöntemler arasında yer almaktadır (Budimir vd., 2015; Gong vd., 2018; Zhao vd., 2019; Du vd., 2020; Goyes-Peñafiel ve Hernandez-Rojas, 2021). Lojistik regresyon, temel olarak, bağımlı değişkenin ikili (binary; 1-0, var-yok) olması halinde, birden çok bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki çoklu regresyon ilişkisi aracılığıyla bir olayın meydana gelme olasılığını tahmin etmede kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Atkinson ve Massari 2011; Gayen ve Saha, 2018). Lojistik regresyon analizlerinin diğer regresyon yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü değişkenlerin sürekli olması veya normal dağılım göstermeleri gerekmemektedir.

Bununla birlikte, analizlerde kullanılan değişkenler sürekli ya da kategorik verilerden oluşturulabilmektedir (Tekin, 2019). Lojistik regresyon olasılık değeri eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P(Y=1) = p_i = 1 / (1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}) \quad (3.3)$$

Burada, P ; heyelan olma olasılığını temsil eder. Heyelanlı alanlara denk gelen piksellerin 1, heyelan olmayan alanlara denk gelen piksellerin 0 kabul edilmesi örnek olarak verilebilir. X değerleri; bağımsız değişkenleri, β 'lar ise bağımsız değişkenlere ait regresyon katsayılarını belirtmektedir. Lojistik regresyon analizinden elde edilen pozitif regresyon katsayısı sonuç olasılığının arttığını ve heyelan duyarlılık üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu anlamına gelirken, negatif regresyon katsayısı ise ters orantılı bir ilişkiye sahip olduğunu ve heyelan duyarlılık üzerindeki etkisinin az olduğu anlamına gelmektedir (Das and Lepcha, 2019).

Tez çalışmasında LR denklemi kullanılarak yapılan duyarlılık analizleri için ArcGIS 10.4.1 Programı kullanılarak kaç adet heyelanlı piksel (5390) varsa ona karşılık iki katı miktarında heyelansız piksel (10780) random olarak seçilip veri setleri elde edilmiştir. Daha sonra oluşturulan bu veri setleri kullanılarak GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) library in Python, ve Jupyter Notebook library in Anaconda Navigator ve SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) programları yardımıyla lojistik regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak burada elde edilen veriler ile ArcGIS 10.4.1 programı kullanılarak duyarlılık haritası görselleştirilmiş ve grid formatına çevrilerek çok yüksek, yüksek, orta, düşük ve çok düşük olmak üzere beş farklı duyarlılık sınıflarına ayrılarak heyelan duyarlılık haritası tamamlanmıştır.

3.2.2.1.2. Rastgele Orman Yöntemi

Breiman (2001) tarafından geliştirilen Rastgele Orman (RO) yöntemi, sınıflandırma, regresyon, kümeleme ve etkileşim tespiti için son zamanlarda literatürde yaygın olarak kullanılan popüler bir toplu öğrenme yöntemidir (Park ve Kim, 2019; Sevgen vd., 2019; Zhao vd., 2021). RO, birçok karar ağacı kullanarak farklı eğitim verilerini doğru bir şekilde sınıflandırabilen bir veri madenciliği algoritmasıdır (Breiman, 2001). Bu yöntemin amacı bireysel ağaçlardan gelen bilgileri bir araya getirerek onların ortalamalarını alıp tahminleri birleştirmenin yeni yollarını bulmaktır (Zhao vd., 2021). RO çok hızlı bir yöntem olup, aşırı uyuma karşı güçlüdür ve istenilen sayıda ağaçla

çalışılabilir kapasitededir (Breiman ve Cutler, 2012; Hussain vd., 2022). Bu özellikleri nedeniyle Breiman ve Cutler (2012) RO'yu diğer algoritmalara göre doğruluğu eşsiz bir algoritma olarak tanımlamışlardır. RO yöntemi; bağımsız değişken sayısının çok olduğu büyük veri setlerinde ve kayıp verilerin fazla olduğu durumlarda yüksek tahmin performansına sahip olma özelliğine sahiptir (Bilgen, 2014). RO modelinde eğitim verileri ile kurulacak modele sonradan veri ekleyerek güvenilirliği yüksek tahminler yapmak ve ilgili veri setindeki değişkenlerin önem derecelerini hesaplamakta mümkündür. Bu işlem sayesinde değişken sayısı yüksek olan veri setlerinde bağımlı değişkeni önemli ölçüde etkileyecek olan asıl değişkenler ele alınarak modeli indirgemek de mümkündür (Görgülü, 2021). Ayrıca, RO yöntemi sürekli, kategorik ve her ikisinin yer aldığı veri setlerinde kolayca kullanılabilir (Akman, 2010). Bu yüzden bu yöntem birçok alanda yaygın olarak kullanılmış ve performansı geliştirilmiştir (Chen vd., 2014; Hasan vd., 2014; Calderoni vd., 2015; Gupta vd., 2015; Youssef vd., 2015a; Chen vd., 2017; Ada ve San, 2018; Shirvani, 2020; Sun vd., 2021; Ye vd., 2022).

Ağaç gelişim işleminden önce Rastgele Orman algoritmasını başlatmak için iki parametre tanımlanmalıdır (Liu vd., 2021). Bu parametreler, en iyi bölünmeyi tespit etmek için her bir düğümde kullanılan değişkenlerin sayısı (m) ve oluşturulacak ağaçların sayısı N_{tree} parametreleridir (Taalab vd., 2018). Ağaçtaki herhangi bir düğümdeki kuralı oluşturmada kullanılacak başlangıç m değeri kullanıcı tarafından rastgele seçilerek bu m değerleri genelleştirilmiş hataları en aza indirecek şekilde OBB (Out-Of-Bag) artırılır ya da azaltılır. Değişken sayısının (m) azalması ile korelasyon ve güç azalırken, m değerinin artması korelasyon ve gücü artırır. Bu şekilde bulunan en uygun m değeri ile sınıflandırma duyarlığı artar, hata oranı azalır (Horning, 2010). Sonra her bir önyüklemeli örnekten budama olmadan bu tanımlanan m ve N parametrelerine göre ağaçlar geliştirilir (Cutler vd., 2013). Oluşturulan yeni veri setlerinden ağaç gelişimi işlemi de CART (örn. GINI indeksi) algoritmasına göre yapılır (Louppe vd., 2013).

Rastgele Orman yöntemi için önemli olan diğer kavramlar ise inBag ve OOB (Out-Of-Bag) kavramlarıdır. Bu method da sınıflandırma yaparken, veri setindeki gözlem sayısı n ile aynı olacak şekilde N adet örnekleme oluşturulmaktadır (Dietterich, 1998). RO algoritması ile her bir ağacı oluştururken, veri setinin $2/3$ 'ü (inBag) algoritmanın öğrenmesi ve ağaç gelişimi için eğitim veri seti olarak ayrılır. Geriye kalan veri setinin

1/3'ü ise model performansının güvenilirliğini tahmin etmek için test verisi (Out-Of-Bag(OOB)) olarak ayrılır (Breiman, 2001; Zhao vd., 2021).

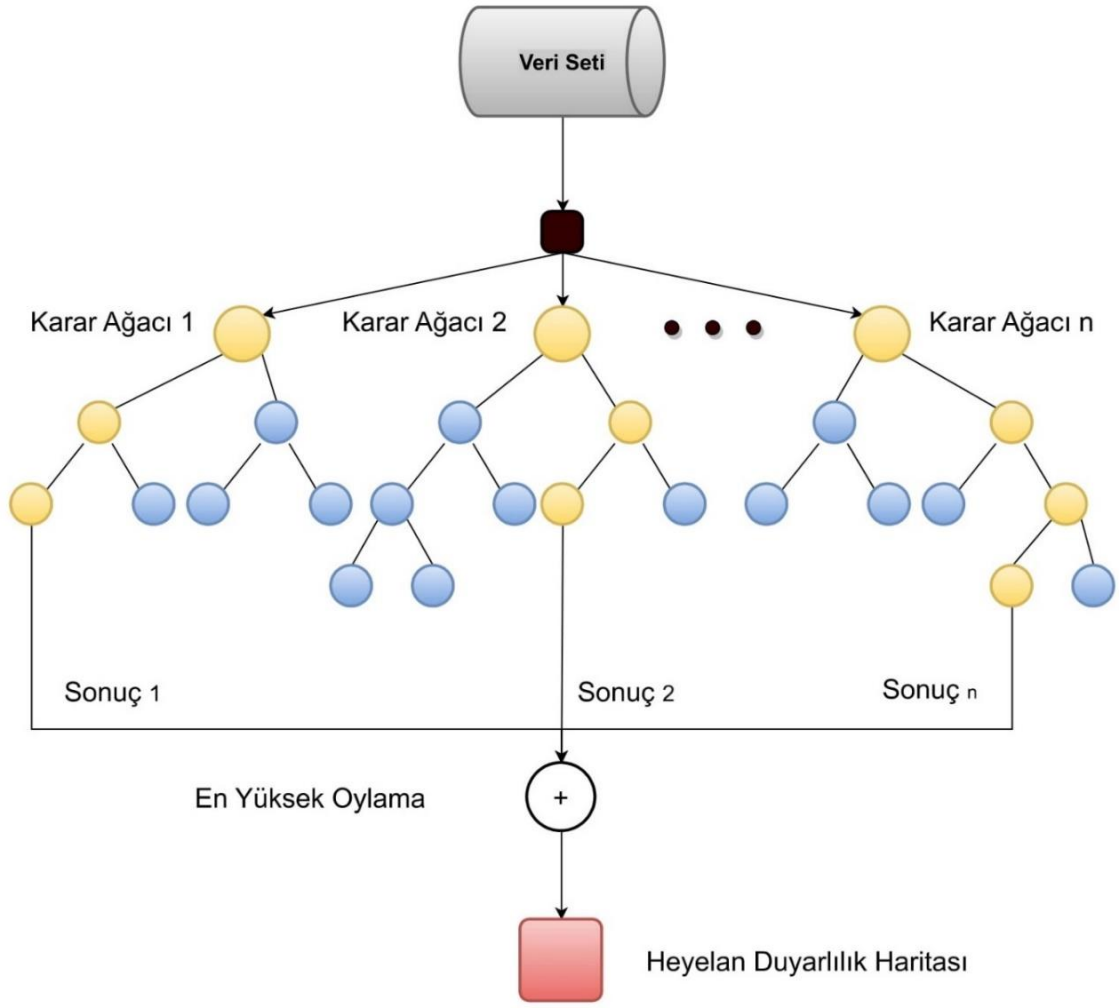
Rastgele Orman Algoritmasının Kurulması

Rastgele Orman algoritması aşağıda verilen adımlar izlenerek kurulmaktadır (Abellán vd., 2017; Liaw ve Wiener, 2002);

- Mevcut veri setindeki gözlem sayısı n ile aynı olacak şekilde N adet örneklem oluştur ve bu şekilde edilen örneklemin $2/3$ 'ü eğitim verisi olarak kullanılır.
- Eğitim veri seti içerisinde rastgele m adet tahmin değişkeni seçilir. Daha sonra seçilen m adet tahmin değişkeni arasından, en iyi bölünmeyi sağlayacak olanı belirlenir.
- En iyi bölünme için seçilen tahmin değişkeninin dallanma kriterini gini indeksi kullanarak hesaplanır ve bu hesaba göre alt dallara ayrılır. Hesaplanan değere göre veri seti her düğümde iki alt dala ayrılmaktadır. Bu işlem her düğüm için yeni oluşturulacak dal kalmayıncaya kadar tekrar edilmektedir ve elde edilen bu karar ağaçları budanmamaktadır.
- N adet ağaç sayısı oluşturulana kadar bundan önceki adımlar tekrar edilmektedir. Daha sonra N tane ağacın yapmış olduğu sınıf tahminleri birleştirilerek yeni veri seti tahmininde bulunmaktadır (Sabancı, 2019).
- Sınıflandırma ağaçları için en fazla oyu alan sınıf, tüm ormanların tahmini olarak seçilirken, regresyon ağaçları için yapılan oylamanın sonucunda ortalama değerleri alınarak nihai tahmin yapılmaktadır (Liaw ve Wiener, 2002) (Şekil 3.7).

Öğrenme için ayrılan veri setinden hata oranının hesaplanması;

- inBag verisi kullanılarak oluşturulan her karar ağacının hata oranı OOB verisi ile test edilerek hesaplanmaktadır. Bireysel olarak oluşturulan tüm ağaçların OOB verileri için tahmin yaptığı hata oranlarından bütün ormanın hata oranını tahmin edilir (Shirvani, 2020).



Şekil 3.7. Rastgele orman algoritmasının akış şeması (Dang vd., 2020)

3.2.2.2. Heyelan Duyarlılık Modellerinde Performans Değerlendirmeleri

Heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan Lojistik Regresyon ve Rasgele Orman yöntemlerinin performans değerlendirmeleri ve doğruluk oranlarının belirlenmesi amacıyla, Relative Operating Characteristic (ROC) modülü, İstatistiksel Metrikler ve Genel Doğruluk Kriteri dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki olan ROC analizi son yıllarda yapılan hemen hemen tüm çalışmalarda kullanılmaktadır. ROC, iki sınıf arasındaki ayrımı ve sınıflandırıcının performansını görselleştirebilen bir yöntemdir (Swets, 1988; Eastman, 2006). Grafiğin dikey eksenini doğru pozitiflik (duyarlılık), grafiğin yatay eksenini yanlış pozitiflik oranlarını oluşturmaktadır (Taşkanat, 2020; Zhao vd., 2021). Uygulanan model sonucunda heyelan olan bir yerin heyelanlı alan olarak tahmin edilmesi gerçek pozitiflik (TP), heyelan olmayan bir yerin heyelanlı alan olarak tahmin edilmesi yanlış pozitiflik (FP), heyelan olmayan bir yerin heyelan olmayan yer

olarak tahmin edilmesi gerçek negatiflik (TN), heyelan olan bir yerin heyelan olmayan yer olarak tahmin edilmesi yanlış negatif (FN) olarak tanımlanmaktadır (Moharrami vd., 2020). Bir modelin doğruluğu ROC grafiğindeki eğrinin sol üst köşeye yakınlığı ile anlaşılmaktadır. ROC eğrisi sol üst köşeye yaklaştıkça analiz performansını o derece artmaktadır (Dağdelenler, 2013). Özet olarak en iyi performansa sahip olan modelin doğru pozitiflik oranı yüksek, yanlış pozitiflik oranı ise düşüktür (Beguería, 2006).

ROC eğrisi altında kalan alanın değerini ifade eden AUC (Area Under Curve), bir olayın oluşması veya oluşmaması durumunu güvenli bir şekilde tahmin etme durumunu göstererek çalışılan modelin kalitesini göstermektedir (Dou vd., 2019). Eğrinin altında kalan alan 0.5 ile 1 arasında değerler almaktadır (Beguería, 2006). AUC değerinin 1'e yakınlığı model performansının başarısını ifade ederken, 0.5 olması ise sonuçların yeterli performansa sahip olmadığını ifade etmektedir (Fawcett, 2006).

Heyelan modellerinin performansını değerlendirmek için ikinci yaklaşım olarak duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve doğruluk indeksi kullanılmıştır. Bu değerler genellikle uyum ve tahmin doğruluğunun etkili göstergeleri olarak kabul edilmektedirler (Wang vd., 2021). Bu istatistiksel ölçümler aşağıdaki denklemler (3.4, 3.5, 3.6, 3.7) kullanılarak hesaplanmaktadır (Orhan vd., 2022).

$$\mathbf{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{\u00d6zg\u00fcll\u00fck} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{Doğruluk} = \frac{TN+TP}{TN+TP+FN+FP} \quad (3.7)$$

Burada P toplam heyelan sayısını, N ise toplam heyelan olmayanların sayısını ifade etmektedir; hatalı şekilde sınıflandırılan piksel sayılarını temsil eden FP yanlış pozitif ve FN yanlış negatif anlamına gelirken, doğru şekilde sınıflandırılan pikselleri temsil eden TP gerçek pozitif ve TN gerçek negatif anlamlarına gelmektedir (Chen vd., 2017).

Üçüncü yaklaşım olarak duyarlılık haritaları, daha önce öğrenme ve test veri setlerine dahil edilmeyen 23 büyük heyelan yüzdesi ile genel doğruluk kriteri yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Genel doğruluk kriteri duyarlılık haritasında yüksek ve çok yüksek

duyarlılık sınıflarına düşen mevcut heyelanların yüzdesinin hesaplanması ile yapılmaktadır (Taşkanat, 2020).

3.2.2.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında Kullanılan Parametreler

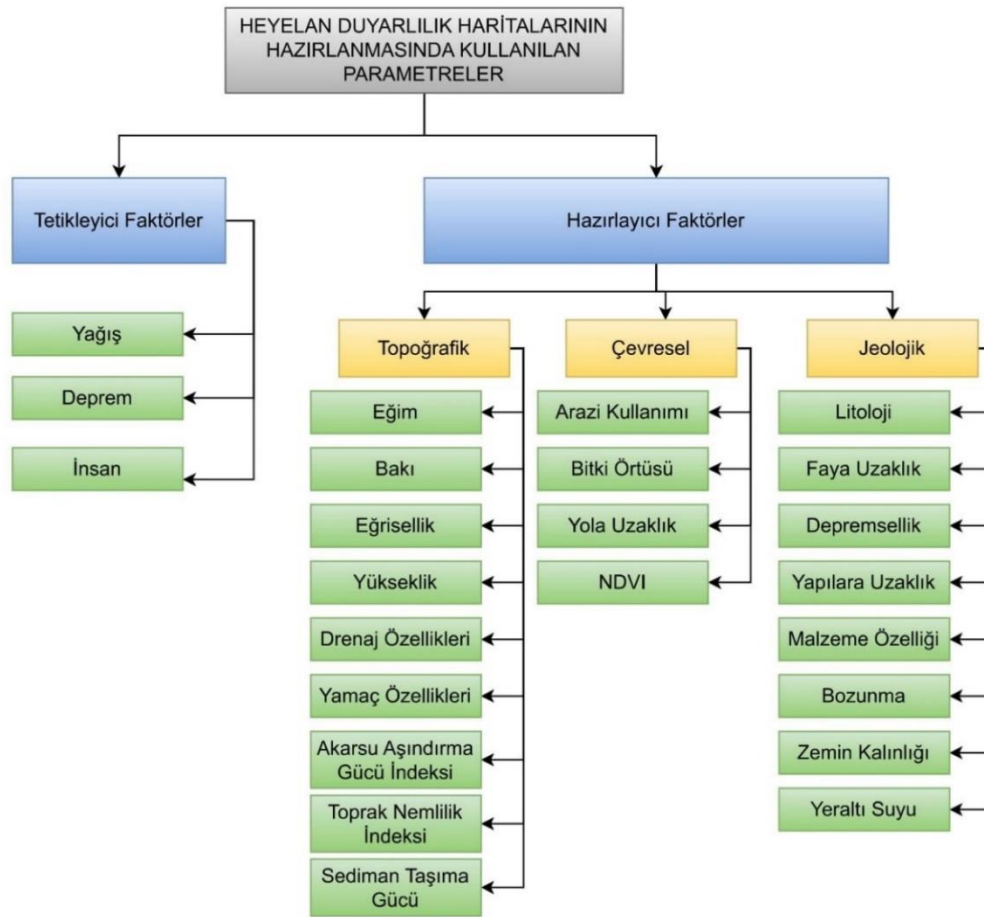
Heyelan envanteri ve duyarlılık çalışmaları, heyelan tehlikesini azaltma çalışmalarının ilk aşamasını oluşturmaktadır (Ercanoğlu vd., 2004). Duyarlılık haritaları oluşturulurken heyelana sebep olduğu düşünülen birçok faktör dikkate alınmaktadır. Heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılacak faktörlerin seçiminde çalışmanın amacı, mali durum, veri erişimi gibi birçok parametrenin etkili olduğu ve bu parametrelerin kullanımının ve heyelan oluşumu üzerindeki etkilerinin bölgeden bölgeye değişim gösterileceği ifade edilmektedir (Ercanoğlu, 2005). Bu faktörler genel olarak hazırlayıcı ve tetikleyici faktörler olmak üzere iki temel grupta toplanmıştır (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001) (Şekil 3.8). Heyelana etki edecek bu faktörlerin belirlenmesi, en uygun olanların seçilmesi ve birlikte değerlendirilmeleri duyarlılık haritalarının üretilmesinde en önemli analiz adımlarından birini oluşturmaktadır.

Harita üretilmesi sırasında seçilen parametrelerin ortak özellikleri şu şekilde özetlenebilir:

- Parametreler heyelan oluşumunda etkili olmalıdır.
- Kullanılan tüm parametreler haritalanabilir özelliklerde olmalıdır.
- Kullanılan tüm parametreler çalışma alanının özelliklerini yansıtmalıdır (Dağ, 2007).

Sayısal Yükseklik Modeli, heyelan duyarlılık ve tehlike haritalarının üretilmesinde kullanılan en önemli veri kaynağıdır. Heyelan duyarlılık ve tehlike analizlerinin altlık haritaları olan çevresel parametrelerin sayısal yükseklik modelinden oluşturulması nedeniyle haritalama birimi olarak raster (piksel) veri kullanımı tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılacak olan yükseklik, yamaç eğimi, yamaç yönelimi, genel eğrisellik, plan eğriselliği, profil eğriselliği, topoğrafik nemlilik indeksi (TNİ) Sayısal Yükseklik Modeli kullanılarak üretilmişlerdir. Yola ve Dereye Yakınlık parametreleri ArcGIS 10.4.1 programında “Euclidean distance analysis” tool’u kullanılarak hesaplanmıştır. Bir diğer önemli veri kaynağı olan NDVI parametresi 2021 yılı Eylül ayına ait Landsat 8

OLI uydu görüntüsü kullanılarak üretilmiştir. Landsat 8 OLI verileri, NASA ve Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) iş birliği ile üretilmiştir ve internet üzerinden ücretsiz olarak erişim sağlanıp indirilebilmektedir. Çalışma alanına ait jeoloji haritası Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından üretilen 1/100.000 ölçekli Ordu paftalarından sayısallaştırılarak oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan Arazi Kullanım Durumu parametresi ise Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından üretilen meşcere haritalarından faydalanılarak üretilmiştir. Analizler, raster formatta yapılacağından, tüm vektörel formatta hazırlanmış olan veriler 10x10 m çözünürlükte grid formatına dönüştürülmüştür. Tüm verilerin aynı koordinat sisteminde, datumda ve piksel boyutlarında olmalarına dikkat edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan parametrelerin dosya özellikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir. Bu işlemler Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımı olan ArcGIS 10.4.1 programı yardımı ile elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Heyelana duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametreler

Tablo 3.2. Parametrelere ilişkin dosya özellikleri

Özellikler	Tanım
Datum	D_WGS_1984
Projeksiyon	Transverse_Mercator
Dilim Orta Meridyeni	37 (derece)
Ölçü Birimi	Metre
Hücre Boyutu	10x10

3.2.2.3.1. Bolaman Havza Jeolojisi

Litoloji haritaları yer yüzeyinde yüzeyleyen kayaların özelliklerinin belirtildiği tematik haritalar olarak adlandırılmaktadır. Bu haritalar litostratigrafik birimlere göre oluşturulurlar (Şahin, 2017). Litolojik parametrelerin heyelan oluşumunda çok önemli katkılarının olmasından dolayı heyelan duyarlılık analizlerinde en sık kullanılan parametrelerden biridir (Akgün ve Erkan, 2016; Şahin, 2017). Bu nedenle tez çalışması kapsamında litoloji haritası duyarlılık çalışmasında kullanılmak üzere MTA'dan alınan 1.100.000 ölçekli jeoloji haritası kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3.9).

Türkiye oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan Alp-Himalaya orojenik kuşağında bulunmaktadır. Türkiye'deki tektonik kuşakların ilk sınıflaması Suess (1885), arazi çalışmalarına dayalı ilk isimlendirme ise Naumann (1896) tarafından yapılmıştır (Kandemir, 2016). Egeran (1947) Türkiye'nin tektonik ünitelerini orojenik gelişimi esasına dayanarak Pontidler (Karadeniz Dağları), Anatolitler, Orta Bölge, Toritler, Ege-İranidler ve Kenar Kıvrımları Kuşağı olarak sınıflandırmıştır (Kandemir, 2016). Çalışma alanı, Pontid Jeotektonik Birliği'nin Doğu kısmında ve Kuzey Zonuna ait volkanik yay alanı içerisinde yer almaktadır. Doğu Pontidlerin kuzeyinde Karadeniz havzası, güneyinde İzmir-Ankara-Erzincan suture zonu, batısında ise Orta Pontid'ler bulunmaktadır (Evcimen vd., 2020).

Doğu Pontid Jeotektonik Kuşağı'nın (Ketin, 1966) Kuzey Zon'unda, Ordu ili sınırları içinde yer alan çalışma alanında yay magmatizmasının ürünü olan Üst Kretase-Kuvaterner yaş aralığında gelişmiş magmatik, volkanik ve sedimanter kayalar görülmektedir (Bektaş vd., 1995). Daha önce yapılan çalışmalarda, Doğu Karadeniz Bölgesi, Üst Kretase istiflerindeki fasiyes farklılıklarına göre Kuzey zon ve Güney zon olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır (Gedikoğlu vd., 1979; Özsayar vd., 1981; Kurt vd., 2006). Doğu Karadeniz Havzasında yapılan çalışmalarda, kuzey kesimlerinde çoğunlukla

andezit, bazalt, bazaltik- andezitik tüf ve aglomeralar, riyodasit ve dasit volkanik kayalar yüzeylendiği tespit edilmiştir. Bu volkanik kayalar yer yer kumlu kireçtaşı, kumtaşı, kireçtaşı, marn gibi ara katkılar içermektedir. Güney kesimlerinde ise dağ silsilesini oluşturan diyorit, granit, granodiyorit gibi magmatik kayaların oluşturduğu granitoyidler ile kireçtaşı ve fliş özelliğinde olan sedimanter kayalar yüzeylenir. Vadilerin denize yakın kısımlarında akarsu aşındırması ve tektonik etkinliğe bağlı olarak gelişmiş alüvyon malzemeler bulunmaktadır (Gültekin ve Temizel, 2020).

Çalışma sahasında bulunan formasyonlar, st Kretase-Kuvaterner zaman aralığında oluşan sedimanter birimler, sokulum kayaları, magmatik kayalar ve güncel çökellerden meydana gelmektedir. Bu stratigrafik birimler yaşlıdan gence doğru: ağlayan Formasyonu, Tirebolu Formasyonu, Ağıllar Formasyonu, Kaçkar Granitoyidi, Işıktepe Formasyonu ve güncel Alüvyon şeklinde sıralanmaktadır.

ağlayan Formasyonu

İlk defa Güven (1993) tarafından isimlendirilmiş olan ağlayan formasyonu, bazalt, andezit ve piroklastik kayalar ile yer alan tf, kırmızı renkli kireçtaşları, siltaşı, kumtaşı ve kiltarı araseviyelerinin ardalanmasından oluşan volkanosedimanter birimdir (Evcimen vd., 2020). ağlayan formasyonu oluşturan kayalar genelde siyahımsı-gri, yeşilimsi-gri ve koyu yeşil renkli olup andezit-bazalt ve bunların piroklastiklerinden oluşmaktadır. Piroklastik kayalarda kumtaşı-marnkilli kireçtaşı ara seviyeleri bulunmaktadır (Ağan vd., 2017). Birim, Kızılkaya formasyonu üzerine uyumlu olarak gelmekte olup üstte Tirebolu ve Ağıllar formasyonu tarafından yine uyumlu olarak izlenmektedir (Evcimen vd., 2020). ağlayan formasyonu içerisinde yer alan mikritik kireçtaşlarından alınan örneklerden tespit edilen fosil türlerine (Globotruncana Arca (Gushman), Globotruncana Lapparenti - Tricarinata (Quereau), Globotruncana Sp. Bulloides Vogler, Globotruncana coronata Bolli, Globigerine Sp ve Gmbelina Sp.) göre yaşı st Kretase olarak nitelendirilmiştir (Güven, 1990). ağlayan formasyonu bazik-orta karakterli volkanizmanın eşlik ettiği derin denizel ortamda çökelmiştir (Evcimen vd., 2020).

Tirebolu Formasyonu

Tirebolu Formasyonu trakit, riyodasit, riyolit, dasitik ve piroklastikleri ile bu volkanik kayalar arasında merccekler halinde yer alan gri ve kırmızı renkli pelajik kireçtaşlarıyla

kumtaşı, kıltaşı ve siltaşlarıyla temsil edilmektedir (Evcimen vd., 2020). Çağlayan formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen bu formasyon Güven (1993) tarafından Tirebolu formasyonu olarak adlandırılmıştır. Birim tabanda riyolitik-riyodasitik ve dasitik kayalar ile başlamakta olup, üste doğru ve yanal olarak piroklastitlerine geçmektedir. Piroklastitler içerisinde yer yer kalınlıkları ve dağılımları fazla olmayan merccek şeklinde sedimanter birimler bulunmaktadır (Evcimen vd., 2020). Birimin yaşı taban ve tavanındaki birimler ile yapılan korelasyonlar sonucunda Geç Santoniyen- Erken Kampaniyen olarak saptanmıştır (Güven, 1993). Tirebolu formasyonu yay volkanitlerinin eşlik ettiği denizel bir ortamda çökelmiştir (Evcimen vd., 2020).

Ağıllar Formasyonu

İnceleme alanında masif görünümlü kireçtaşları, kumlu kireçtaşları ve resifal kireçtaşlarından oluşan bu birim Güven (1993) tarafından Ağıllar formasyonu olarak adlandırılmıştır. Maastrichtiyen-Paleosen yaşlı bu birim, sarımsı gri, beyaz renkli, çoğunlukla sert bir özellikte olan masif veya kalın tabakalanmalı, bol rudist kavkı ve kırıntılı resifal kireçtaşından oluşmaktadır. Çağlayan formasyonu üzerine açısız uyumsuzluk ile gelen Ağıllar formasyonu üzerine Üst Kretase-Paleosen döneminde çökel havzasının sığ bir kesiminde oluşan ve batıya doğru Bakırköy formasyonu ile yanal geçişli olan Kabaköy formasyonu uyumsuz olarak gelir. Formasyondan alınan fosil örneklerine dayanılarak formasyonun yaşı Maastrichtiyen-Paleosen olarak öngörülmüştür (Kandemir, 2016).

Fatsa Formasyonu

Killi kumlu kireçtaşı, marn kumtaşı ve tüfit aralanmaları ile yer yer kumtaşı, aglomera ve yersel çakıltaşı arakatıklarından oluşan bu sedimanter birim Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından Fatsa Formasyonu olarak isimlendirilmiştir. Bu birimin en tipik yüzeylenmeleri Fatsa ve dolaylarında gözlenmektedir. Birimin içerdiği fosillere göre yaşı Üst Senoniyen (Maastrichtiyen) olarak belirlenmiştir (Terlemez ve Yılmaz 1980).

Kaçkar Granitoyidi

Doğu Karadeniz bölgesi'nin doğu kesiminde yer alan Kaçkar Dağları, granitoidlerin en iyi gözlendiği alanlardır. Gülibrahimoğlu (1986) tarafından granitoidler, Türk-Japon proje çalışmalarına göre Torul Granodiyoriti ve Hasandere Granodiyoriti isimler altında

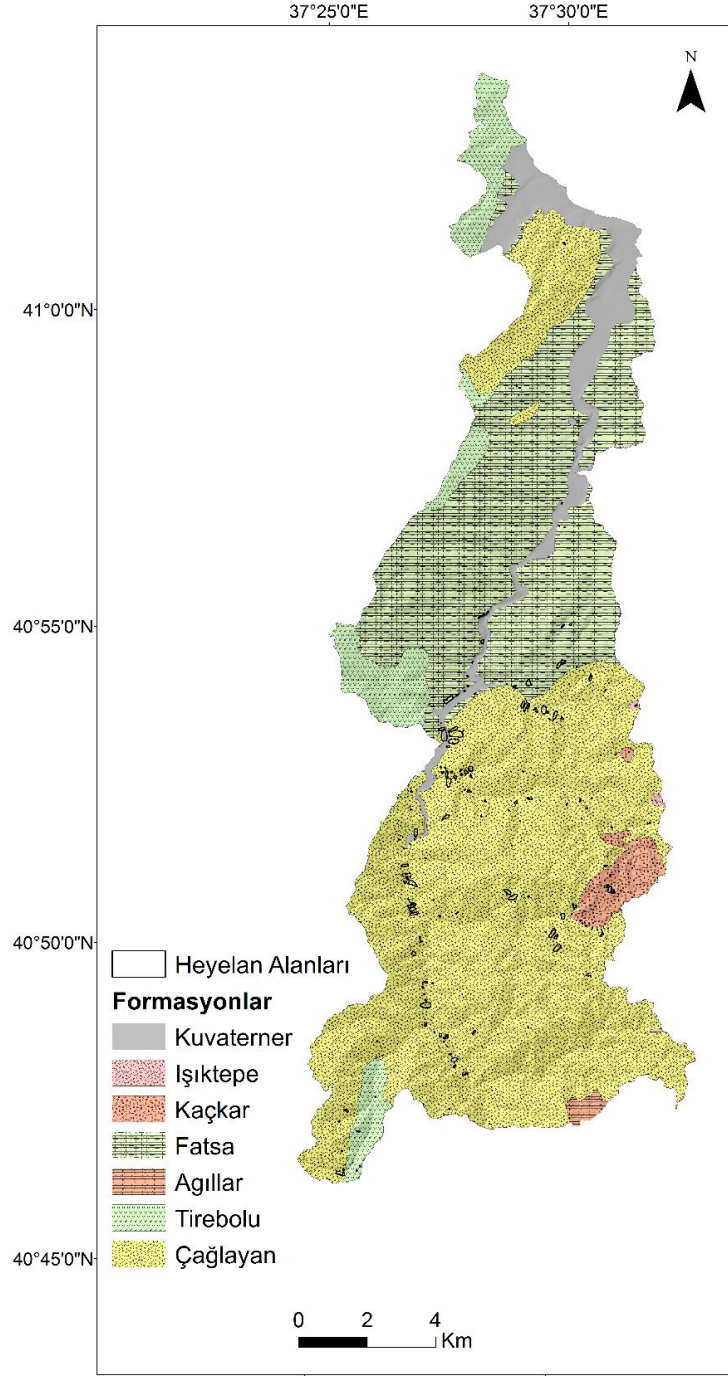
incelenmiştir (Ağan vd., 2017). Güven (1990) tarafından ise Kaçkar Granitoyidi ismi verilmiştir. Granitoyidler açık pembe, açık gri yer yer koyu gri olup genelde granit-granodiyorit, tonalit, siyenit, kuvars diyorit, gabro, kuvars monzonit, diyorit ve diyorit porfir gibi intrüzif kayalardan oluşmaktadır (Kandemir, 2016). Genelde Üst Kretase yaşlı birimlerini kesen ve Eosen yaşlı birimlerle uyumsuz şekilde örtülen bu granitoyidlere Üst Kretase-Paleosen yaşı verilmiştir (Güven, 1990).

Işıktepe Formasyonu

Yeşil, gri renkli, sert dayanımlı, sık çatlaklı, eklemli dasitik dayklardan oluşan Orta Eosen yaşlı ışiktepe formasyonu ufak parçalar halinde, Ordu ilinin Çamaş ile Kabadüz çevresinde yaygın olarak görülmektedir (Ateş vd., 2004).

Kuvaterner

Akarsu yataklarında, vadi tabanlarında ve ovalarda gelişmiş kum, çakıl, kil ve silt boyutunda çevre havzalarda bulunan kayaç parçalarının bozuşması, ufalanması ve taşınması ile oluşmuş, tutturulmamış birimdir. Birim yaşı kuvaternerdir.



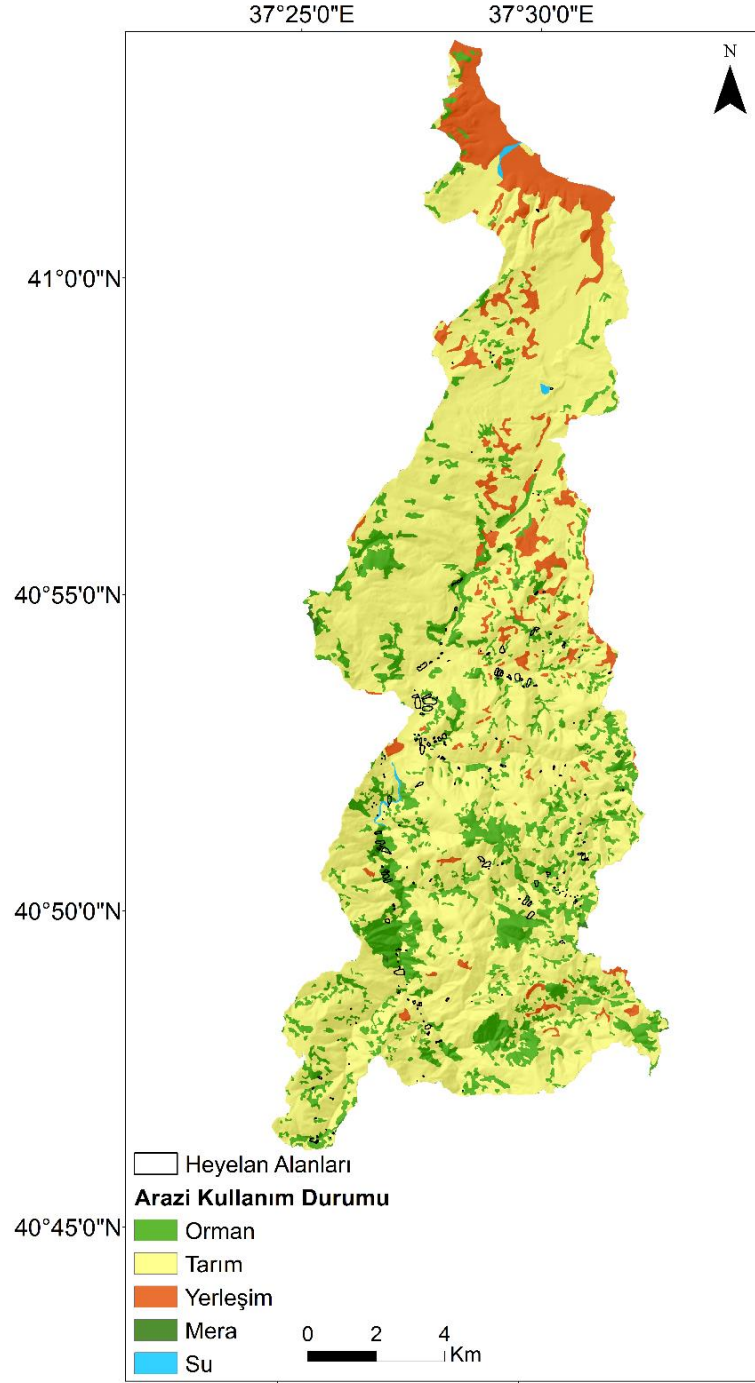
Şekil 3.9. Çalışma alanının jeoloji haritası (MTA, 2021)

3.2.2.3.2. Arazi Kullanım Durumu

Arazi kullanım durumu, heyelan duyarlılığı analizlerinde araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde tercih edilen önemli parametreler arasındadır (Ercanoğlu vd., 2004; Colkesen vd., 2016; Şahin, 2017; Tekin, 2019). Bitkilerin bir yamacın heyela karşı duyarlılığı üzerinde hem olumlu ve hem de olumsuz etkileri olduğu kabul edilmektedir (Dağ, 2007).

Özellikle güçlü kök sistemlerine sahip bitki örtüsünün oldukça sık olduğu bölgeler yamaç duraylılığı bakımından güçlü alanlar olarak değerlendirilmektedir (Kalafat, 2021). Aynı zamanda, bitki örtüsünün yapraklarının suyu tutma ve buharlaştırma özelliği yağışın süzülme etkisini azaltmaktadır. Yine, bitkilerin kökleri, zemin suya doygun ise zemin içinde bulunan boşluk suyunu, terleme yoluyla buharlaştırıp ortamdaki uzaklaştırarak gözenek suyu basıncının azalmasına sebep olmaktadır. Bitki örtüsünün tüm bu özellikleri, yamaç duraylılığına pozitif yönde önemli katkılar sağlamaktadır (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Ancak, bitki kök ve gövdesinin heyelan duyarlılığına olumlu özelliklerinin yanında birçok olumsuz etkileri de vardır. Bitkinin kök ve gövdesi zeminin geçirgenliğini ve pürüzlülüğünü artırarak, yüzey sularının zemin içerisine doğru sızmasını kolaylaştırarak boşluk suyu basıncının artmasına yol açmakta ve kaya kütlelerinde süreksizlikler içine girerek bozunmaya yol açarak kayacın dayanımını azaltmaktadır (Nagarajan vd., 2000). Bu durumda, heyelana karşı duyarlılığı artırıcı yönde etki etmektedir (Yüksel, 2007).

Çalışma bölgesine ait arazi kullanım durumu haritası Orman Genel Müdürlüğünden alınan meşcere haritalarından faydalanılarak ArcGIS10.4.1 programı yardımıyla oluşturulmuş ve beş sınıfa (Orman, Tarım, Yerleşim, Mera ve Su) ayrılmıştır (Şekil 3.10). Çalışma alanında bulunan heyelanların %73.8'i tarım alanlarında, %24.7'si orman alanlarında, %1.6'sı ise geriye kalan alanlarda meydana gelmiştir.

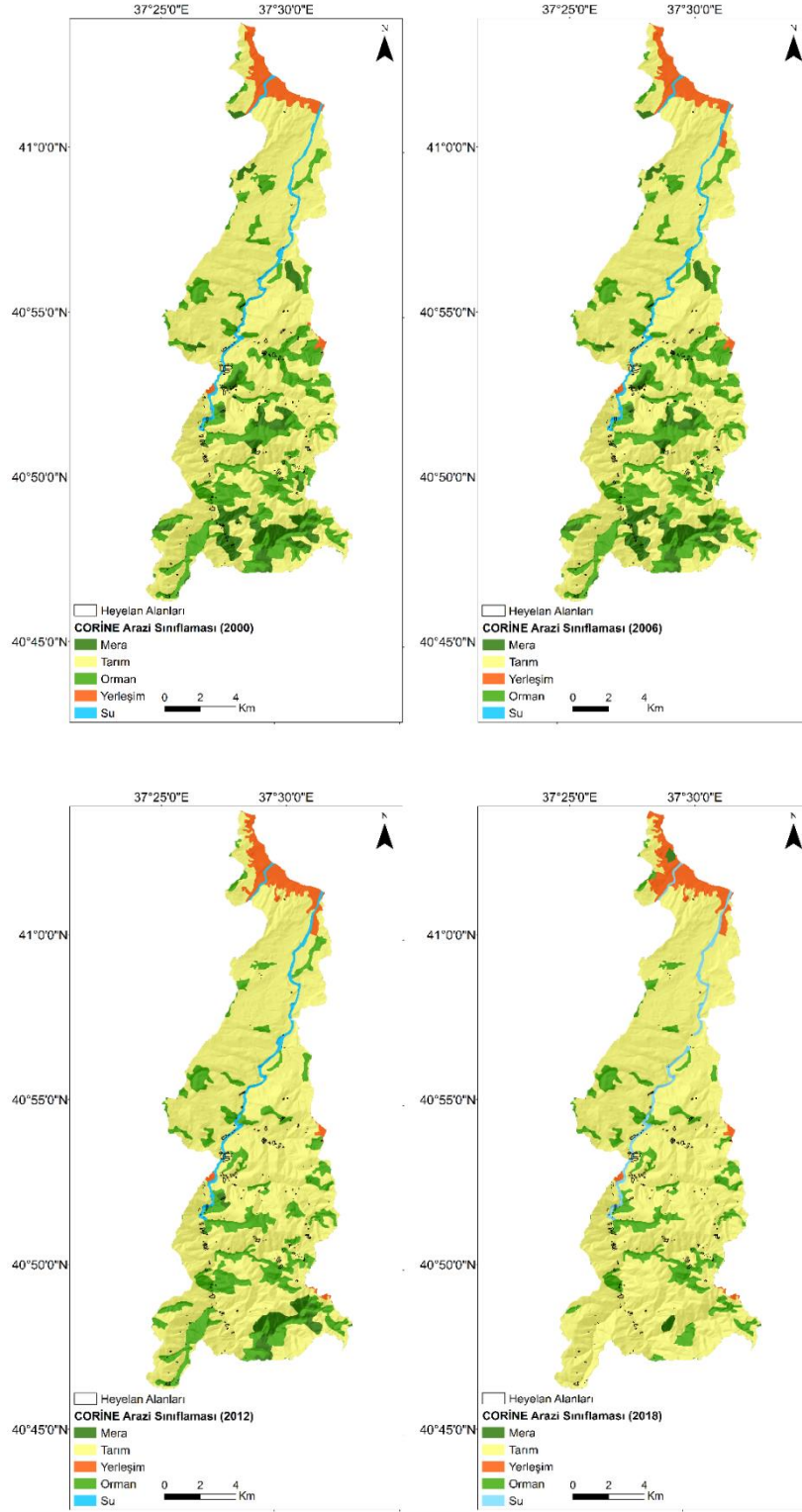


Şekil 3.10. Çalışma alanının arazi kullanım durumu (OGM, 2017)

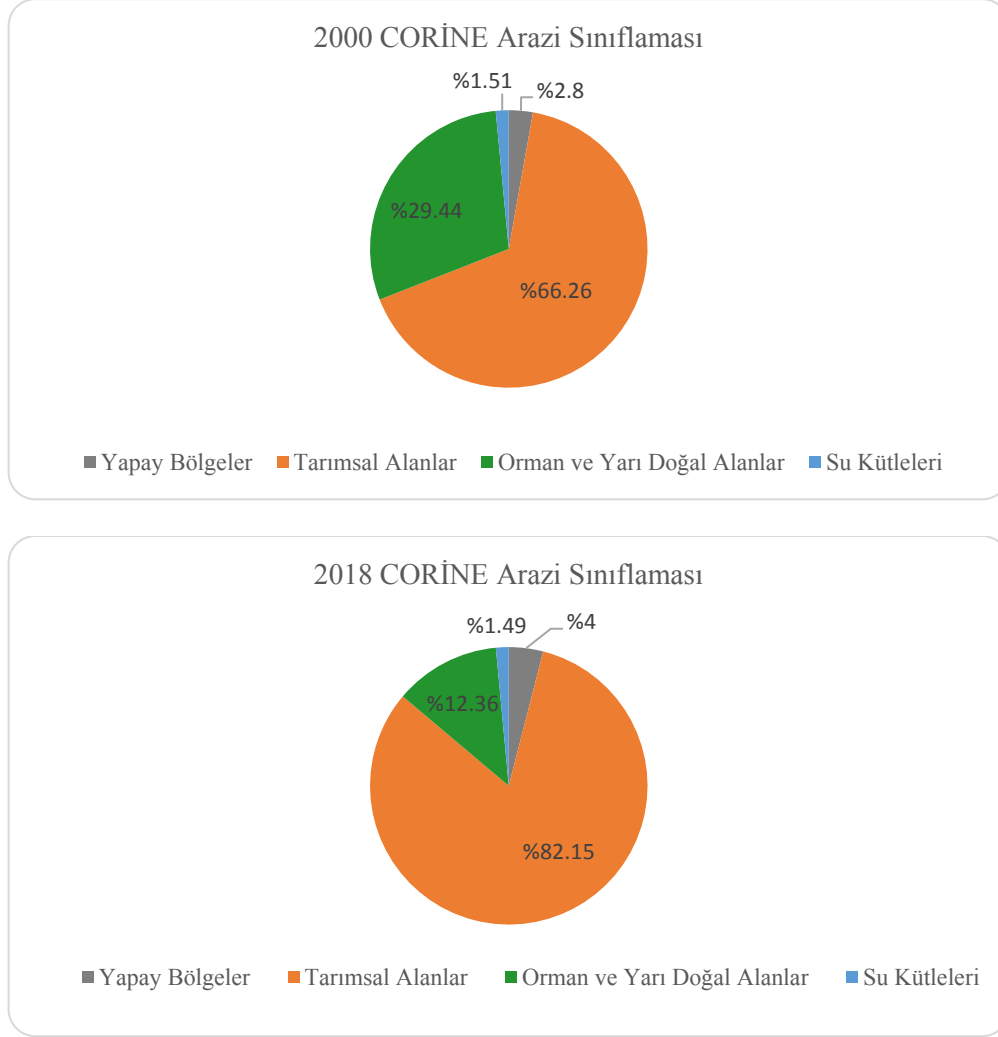
CORINE Arazi Sınıflandırma Sistemi Projesi; Avrupa Çevre Ajansının belirlediği kriterler ve sınıflandırma sistemi doğrultusunda Avrupa Birliği ülkeleri için belirli aralıklarla arazi kullanımındaki değişimlerin belirlenmesine yönelik, standart bir veri tabanının oluşturulması kapsamında 1985 yılında hayata geçirilmiştir (Bayar ve Karabacak, 2017). Bu kapsamda Türkiye, Avrupa Birliği aday ülkesi olarak CORINE 2000, 2006, 2012, 1990-2000 değişim, 2000-2006 değişim, 2006-2012 değişim ve 2018

yılına ait veri tabanları üreterek, Avrupa Çevre Ajansına teslim etmiştir (Şimşek, 2017). Bu veri tabanı, arazi örtüsü-arazi kullanımı tespiti ve değişimi çalışanları için resmi olarak kabul görmüş ve literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Bayar ve Karabacak, 2017).

Standart Corine Arazi Örtü sınıflandırma sistemi beş ana başlık altında üç seviyeden oluşan hiyerarşik bir temel üzerine kurulmuştur (Ateşoğlu, 2016). Yapay Bölgeler, Tarımsal Alanlar, Orman ve Yarı Doğal Alanlar, Sulak Alanlar ve Su Kütleleri olarak birinci seviye adlandırmasıdır. Bunların altındaki ikinci seviyede 15 ve onun altındaki 3. seviyede toplam 44 alt sınıf mevcuttur (Çivi vd., 2009; Özür ve Ataol, 2018). Tez kapsamında, Seviye 1 olarak 2000-2006-2012 ve 2018 yıllarına göre hazırlanan haritalar; mera alanları, tarım alanları, yerleşim alanları, orman alanları ve su olmak üzere toplam beş sınıfa ayrılmıştır (Şekil 3.11). Bu sınıflamalara göre yapılan tarım ve orman alanlardaki değişimler göz önünde bulundurulduğunda tarım alanları yıllara göre artarken orman alanlarında ise azalma meydana gelmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. CORİNE 2000, 2006, 2012 ve 2018 yıllarına ait arazi kullanım durumu (Copernicus Europe's eyes on Earth, 2023).

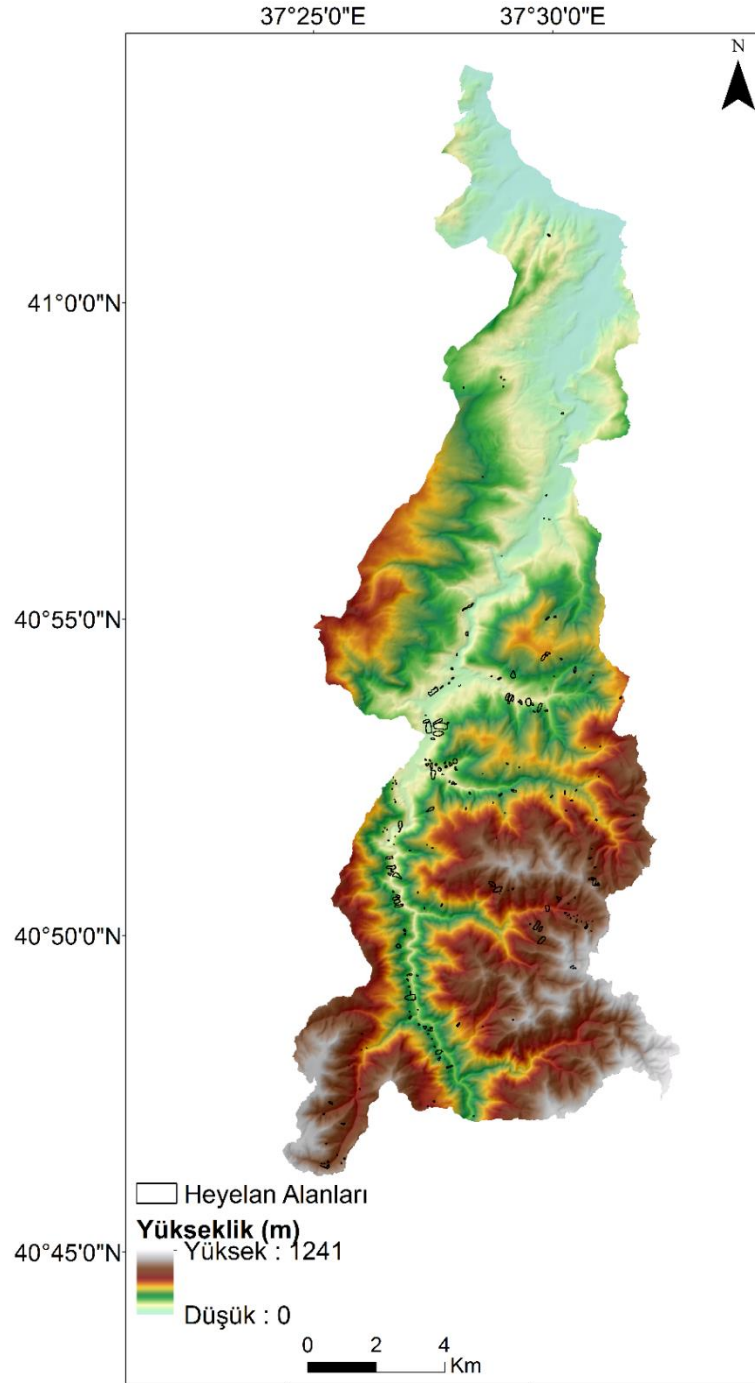


Şekil 3.12. Çalışma alanına ait CORINE 2000-2018 yılları arası arazi kullanım durumu

3.2.2.3.3. Sayısal Yükseklik Modeli

Bir noktanın deniz seviyesinden olan yüksekliği olarak tanımlanan yükselti heyelan çalışmalarında en yaygın kullanılan faktörler arasında bulunmaktadır (Yalçın vd., 2011; Maıka, 2021). Yükselti faktörü heyelan aktivitesine dolaylı olarak etki ettiğinden dolayı yüksek bölgelerin, alçak bölgelere kıyasla heyelana karşı daha duyarlı olduğu bazı araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Bu yüzden tez kapsamında yükseklik faktörü heyelan duyarlılık modelinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır. İlk olarak, inceleme alanına ait 1:25.000 ölçekli, Harita Genel Müdürlüğünden alınan sayısal topoğrafik haritalardan yararlanılarak CBS ortamında ArcGIS 10.4.1 yazılımı kullanılarak 10x10 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (SYM) elde edilmiştir. Çalışma alanında yükseklik en fazla 1241 m'ye varmaktadır (Şekil 3.13). Çalışma alanında bulunan heyelanların yarısından fazlası %53 oran ile 0-250 metre

rakımda meydana gelmiştir. Geriye kalan heyelanların %23'ü 250-350 metre arası rakımda, %24'ü ise 350 metreden yüksek (350-1100 m) rakımlarda oluşmuştur.

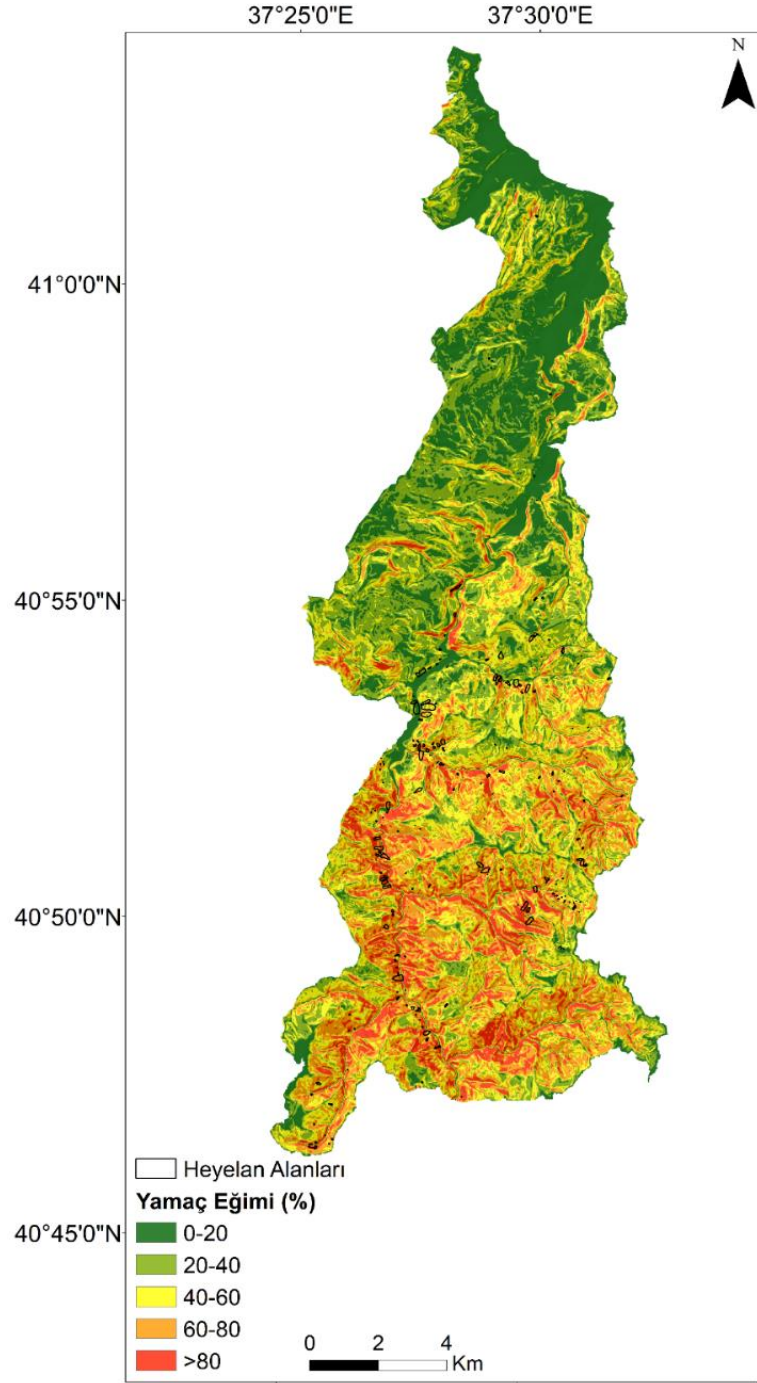


Şekil 3.13. Çalışma alanının sayısal yükseklik modeli

3.2.2.3.4. Yamaç Eğimi

İki nokta arasındaki yatay mesafenin düşey kot farkına oranı olarak ifade edilen yamaç eğimi heyelan duyarlılık analizlerinde en sık kullanılan parametrelerden biridir (Dunn ve

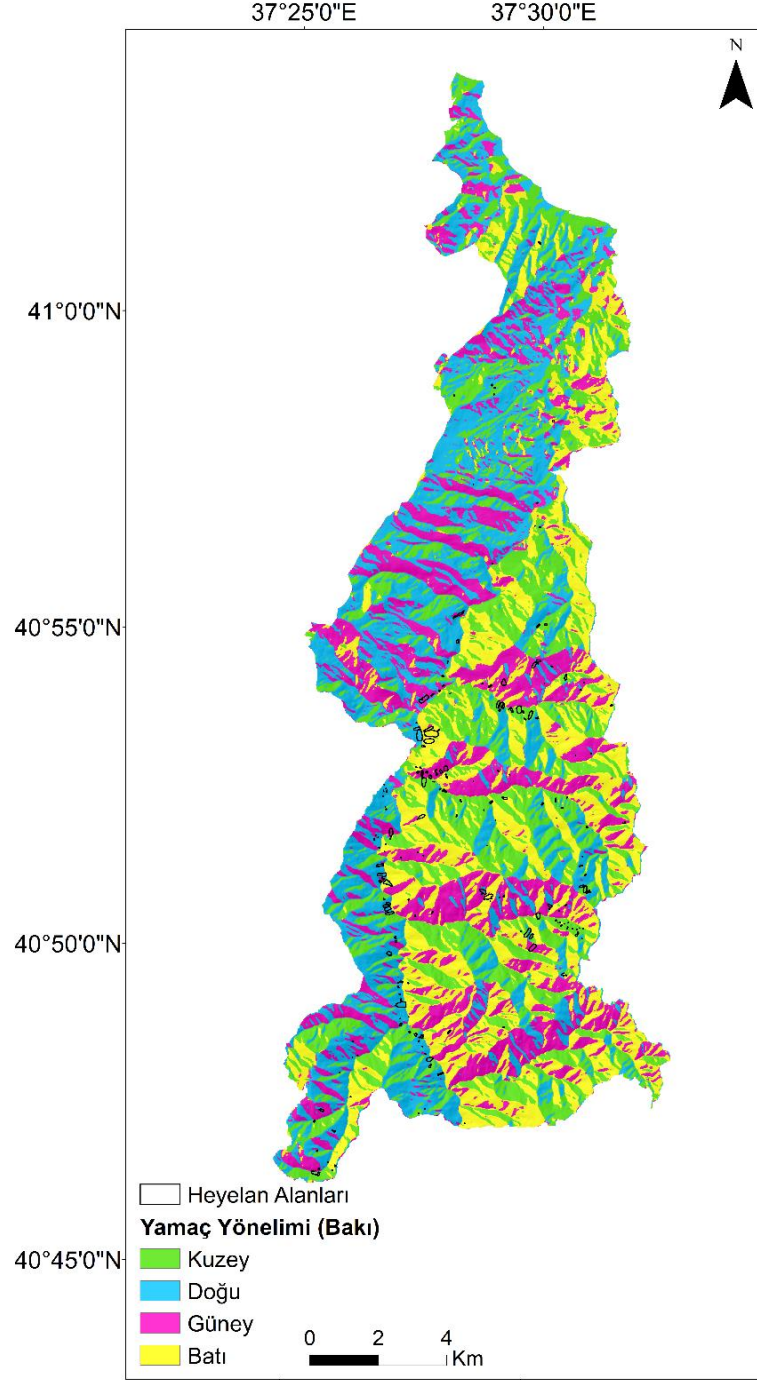
Hickey, 1998; Akgün, 2007). Heyelan oluşumunda oldukça etkili olan yamaç eğimi, heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan en önemli parametrelerden biri olup, bu çalışmada sayısal yükseklik modelinden üretilmiş ve duyarlılık modelinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır (Dou vd., 2015). SYM'den üretilen çalışma alanına ait yamaç eğimi haritası Şekil 3.14'te verilmiş olup toplam beş sınıfa ayrılmıştır.



Şekil 3.14. Çalışma alanının yamaç eğim haritası

3.2.2.3.5. Yamaç Yönelimi (Bakı)

Yamaç yönelimi, yamaçların kuzey ile yaptığı açının azimut cinsinden ifade edilmesi olarak tanımlanmaktadır (Taşkanat, 2020). Heyelan duyarlılık çalışmalarında yamaç yönelimi (bakı), oldukça sık kullanılan önemli bir parametre olma özelliğine sahiptir. Yapılan birçok çalışma ve istatistiksel değerlendirmeler heyelanların belli bir yönelime sahip yamaçlarda yoğunlaştığını işaret etmektedir (Kalafat, 2021). Heyelan vakalarının belli yönelime sahip yamaçlarda daha sık görülmesinde bu yamaçların güneş ışığını daha yoğun alması, genel yağış yönü ve rüzgâra maruz kalması gibi meteorolojik olaylar rol oynamaktadır (Youssef, 2015). Fazla yağış alan yamaçlar, zeminin süzülme kapasitesine bağlı olarak daha az yağmur alan yamaçlara göre doygunluk seviyesine daha çabuk ulaşmaktadır (He vd., 2019). Zeminin içinde bu şekilde ortaya çıkan boşluk suyu basıncı, yamaçları heyelan bakımından daha çok duyarlı hale getirmektedir. Bu nedenle, çok yağış alan yamaçların daha duyarlı olduğu düşünülmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). SYM'den üretilen çalışma alanına ait yamaç yönelimi haritası Şekil 3.15'te verilmiş olup K-D-G-B olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır.



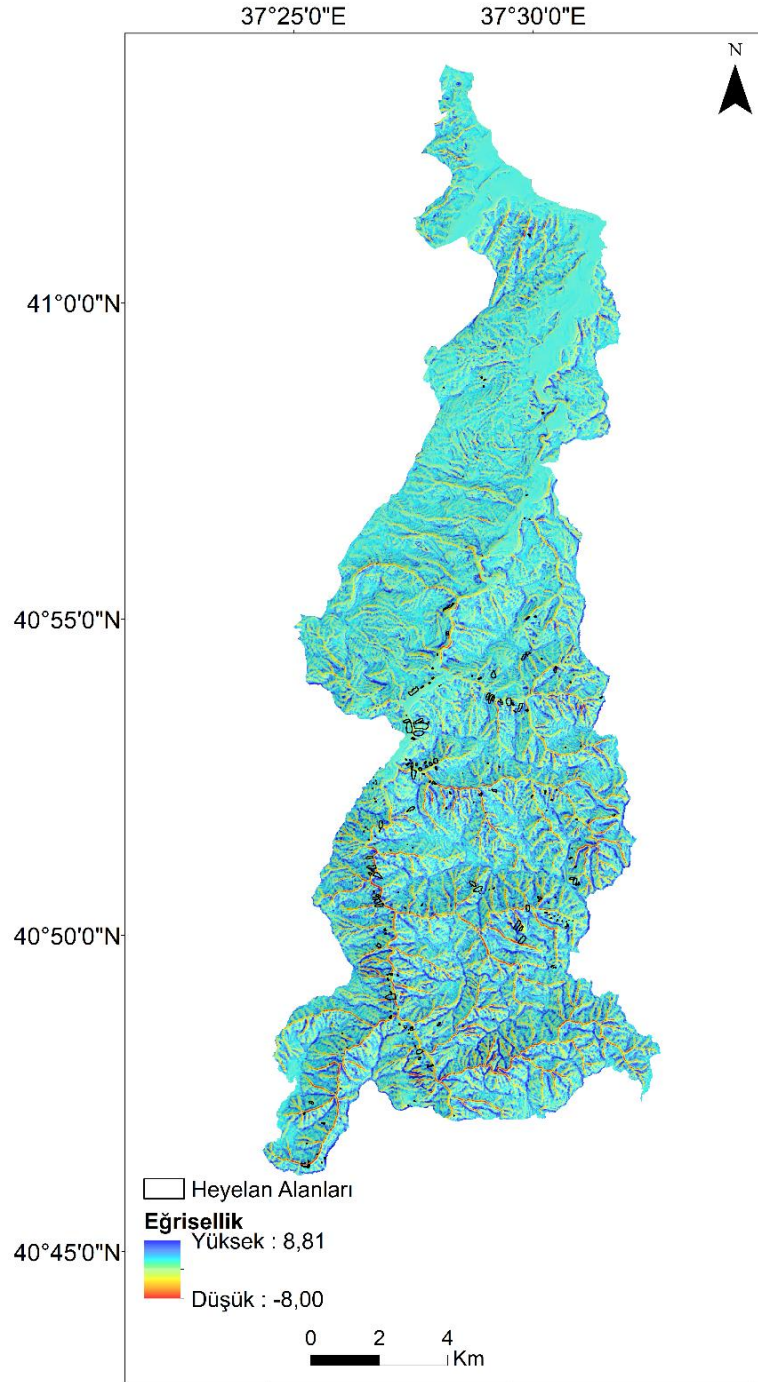
Şekil 3.15. Çalışma alanının yamaç yönelimi (Bakı) haritası

3.2.2.3.6. Yamaç Eğriselliği

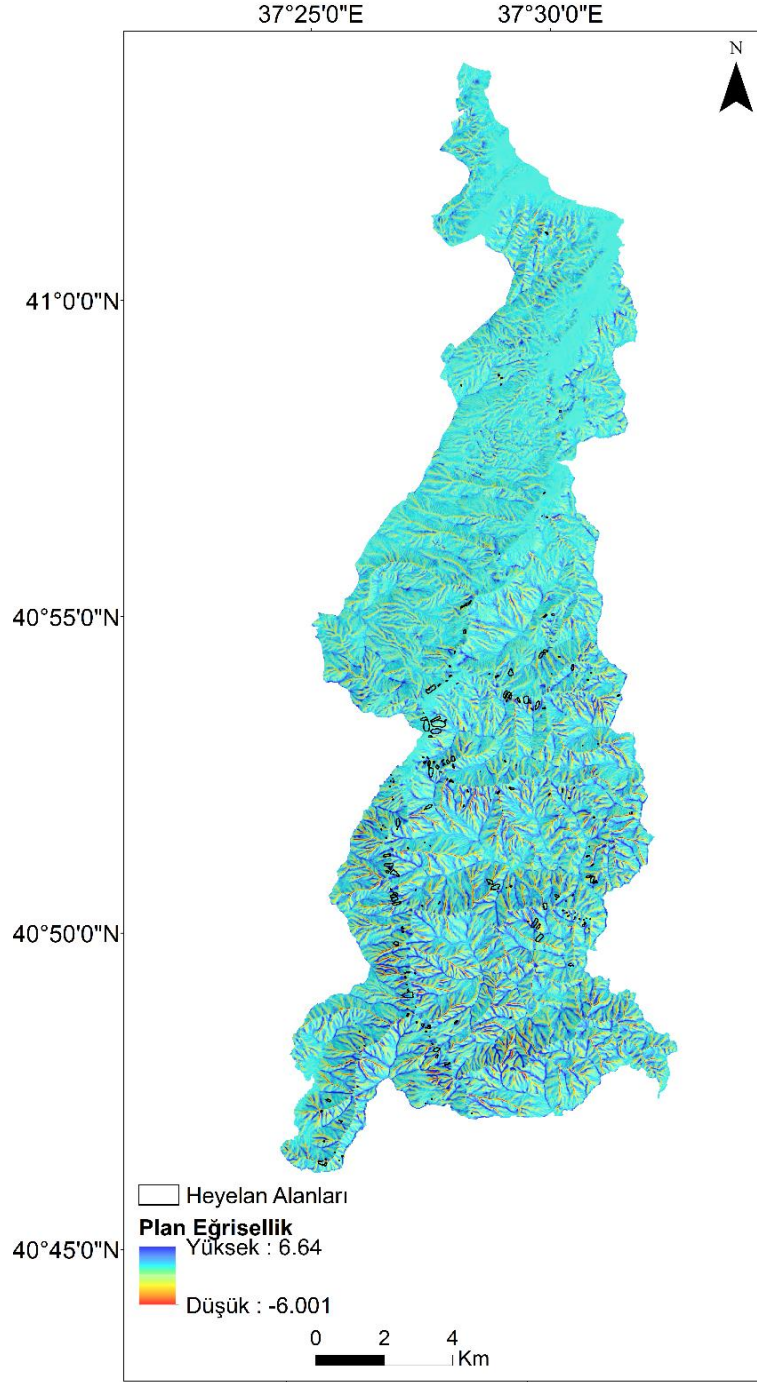
Eğrisellik, belirli bir yönde arazi eğim açısının veya yönünün değişim oranı olarak tanımlanır (Wilson ve Gallant, 2000; Chen vd., 2019). Eğrisellik, plan ve profil eğriselliği parametreleri, heyelan duyarlılık çalışmalarında kullanılan ve topoğrafyanın morfolojisi hakkında oldukça önemli bilgiler sunan faktörlerdir (Yılmaz vd., 2012; Vasu ve Lee,

2016). Çalışma alanına ait eğrisellik haritası SYM kullanılarak üretilmiş olup genel, plan ve profil olmak üzere 3 sınıfa ayrılmıştır. Plan yamaç eğriselliği, yamaç yönelime dik olarak tanımlanırken, profil yamaç eğriselliği ise, yamaç yönelimine paralel olarak gelişen eğrisellik olarak ifade edilir (Winter vd., 2013). Plan eğriselliğinde negatif değerler içbükey yüzeyleri, pozitif değerler dışbükey yüzeyleri temsil ederken, profil eğriselliğinde ise negatif değerler dışbükey yüzeyleri, pozitif değerler ise içbükey yüzeyleri simgelemektedir. Her iki eğrisellik türünde sıfıra (0) yakın değerler düz yüzeyleri ifade etmektedir (Taşkanat, 2020). Heyelan duyarlılık çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılan eğrisellik faktörünün heyelan oluşumunda etkisini, Guzzetti vd., (1999) dış bükey yamaçların iç bükey yamaçlara kıyasla daha fazla heyelan potansiyeline sahip olduğunu yaptıkları çalışmalarda belirtmişlerdir. Lee vd., (2002) yaptıkları çalışmalarda ise iç bükey ve düz yamaçların dış bükey yamaçlara göre heyelana karşı daha yüksek duyarlılığının olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumu ise meydana gelen yoğun yağışların ardından iç bükey eğimlerin daha fazla suyu bünyelerine almalarını ve bu suyu daha uzun süre tutmaları ile açıklamışlardır.

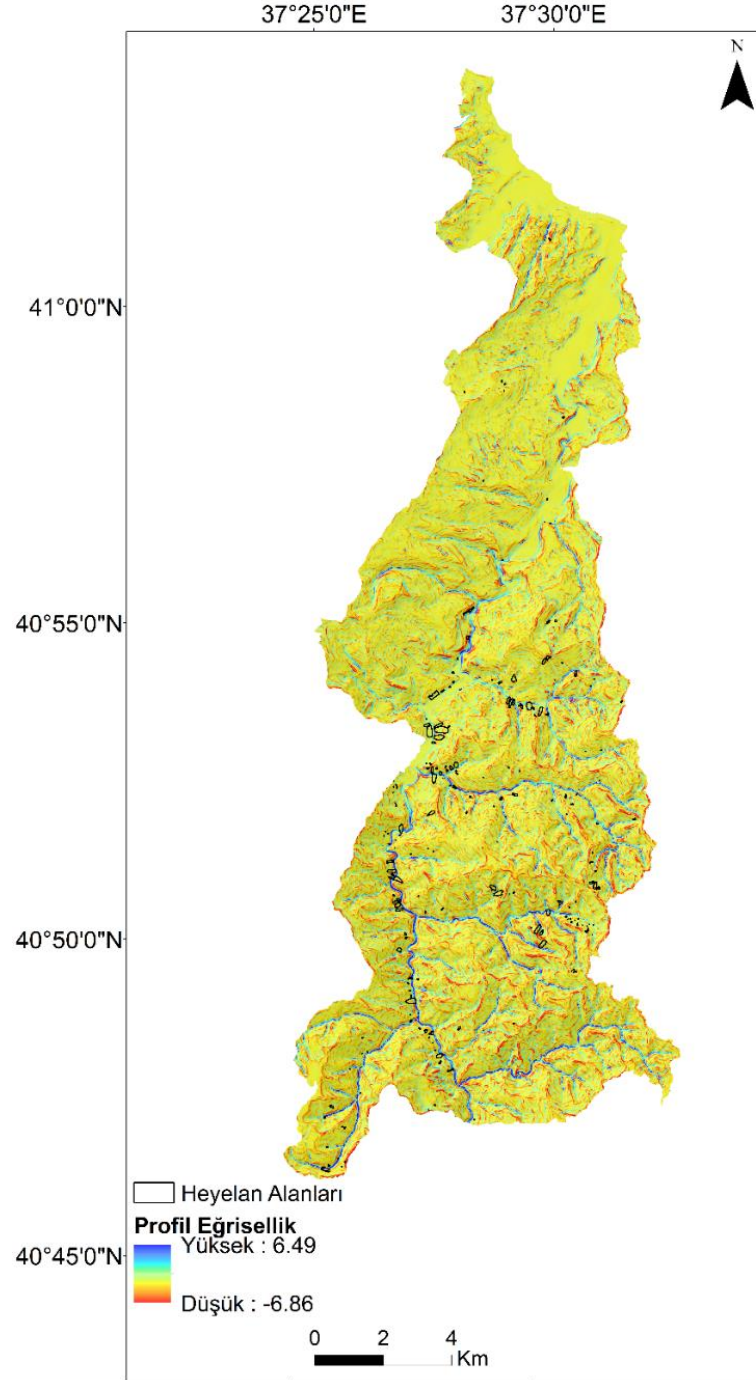
Genel eğrisellik değerlerinin çalışma alanı içerisindeki dağılımı incelendiği zaman en küçük ve en büyük eğrisellik değerlerinin -8.00 ila 8.81 arasında değiştiği; plan yamaç eğrisellik değerlerinin genel dağılımına bakıldığında zaman en küçük ve en büyük plan yamaç eğrisellik değerlerinin -6.001 ila 6.64 arasında olduğu; profil yamaç eğrisellik değerlerinin genel alandaki dağılımına bakıldığında ise -6.86 ila 6.49 arasında değiştiği görülmektedir. Çalışma alanına ait genel, plan ve profil eğriselliği haritaları sırasıyla Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.16. Çalışma alanının genel eğrisellik haritası



Şekil 3.17. Çalışma alanının plan eğrisellik haritası



Şekil 3.18. Çalışma alanının profil eğrisellik haritası

3.2.2.3.7. Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TNI)

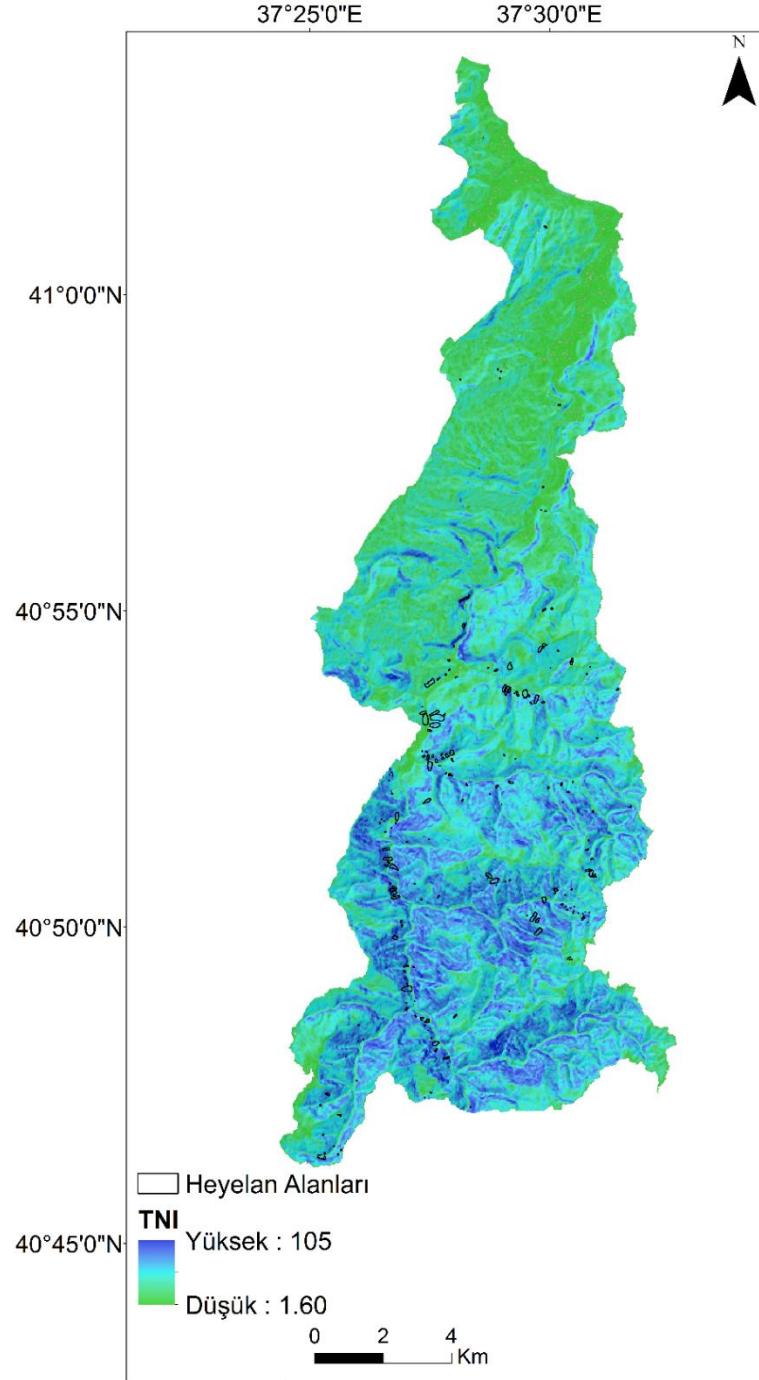
Topoğrafik nemlilik indeksi, yamaç eğimine bağlı yüzeyin su tutma kapasitesine bağlı olarak heyelan duyarlılığı artan alanların konumlarının ve boyutlarının belirlenmesi amacıyla kullanılan bir faktördür (Moore vd., 1991; Şahin, 2017). Yüzeysel akış yaklaşımı ilk olarak Beven ve Kirkby (1979) tarafından ortaya atılarak aşağıda ki eşitliği

(3.8) önermiştir. Önerilen bu eşitlik, yamaç eğiminin az ve havza alanının geniş olduğu suya daha doygun alanları tahmin etmektedir (Nefeslioğlu vd., 2012; Saleem vd., 2019). Topoğrafik nemlilik indeksi değeri eşitlik 3.8 ile hesaplanmaktadır.

$$TNİ = \ln(a / \tan\beta) \quad (3.8)$$

Burada; a , su toplama havzasını ve $\tan\beta$ ise derece cinsinden arazi eğimini göstermektedir (Yılmaz, 2023). Daha açık bir ifade ile, birimsiz olan bu indeks değeri toprak neminin mekânsal dağılımını ifade etmektedir (Devkota vd., 2013). Yüksek TNİ değerine sahip bölgeler daha nemli, düşük indeks değerine sahip değerler ise daha kuru olan alanları belirtmektedir. Dolayısıyla yüksek indeks değerine sahip bölgeler daha fazla heyelan potansiyeline sahiptir (Moore vd., 1991, Conoscenti vd., 2008; Meinhardt vd., 2015).

Çalışma alanının topoğrafik nemlilik indeks değerleri ArcGIS 10.4.1 programı yardımı ile çalışma alanına ait sayısal yükseklik modelinden elde edilmiş ve TNİ haritası üretilmiştir (Şekil 3.19). Topoğrafik nemlilik indeks değerlerinin çalışma alanı içerisindeki genel dağılımına bakıldığı zaman en büyük ve en küçük değerlerinin 105 ila 1.60 arasında değiştiği gözlenmektedir.

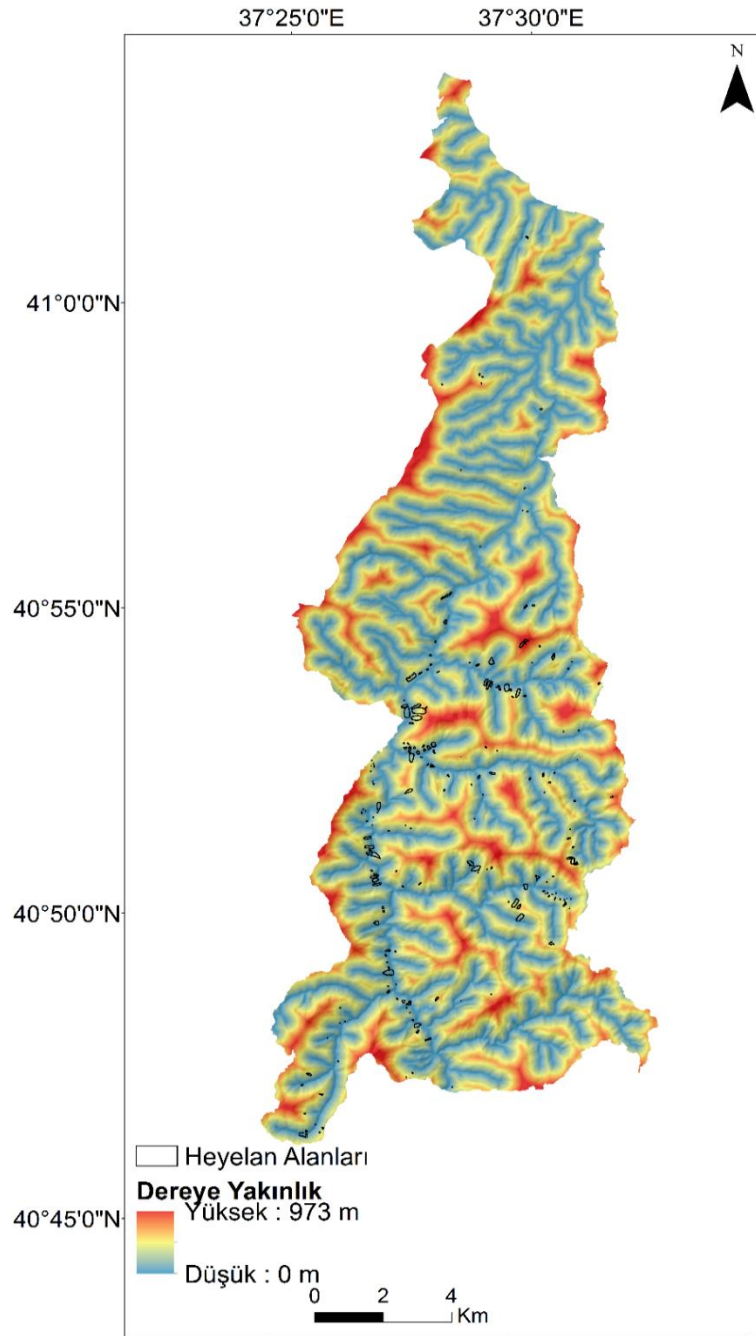


Şekil 3.19. Çalışma alanının topografik nemlilik indeksi (TNI) haritası

3.2.2.3.8. Drenaj Ağına Olan Yakınlık

Heyelan duyarlılık analizlerinde çok sık kullanılan ve heyelan oluşumuna sebebiyet veren önemli bir diğer faktör de yamaçların drenaj ağına olan yakınlığıdır (Dai vd., 2001). Drenaj ağları, yamaçların ve eski heyelanların topuk kısımlarını aşındırarak erozyona yol açmakta ve yamacın stabilitesini bozup yamaç duraylılığını olumsuz yönde

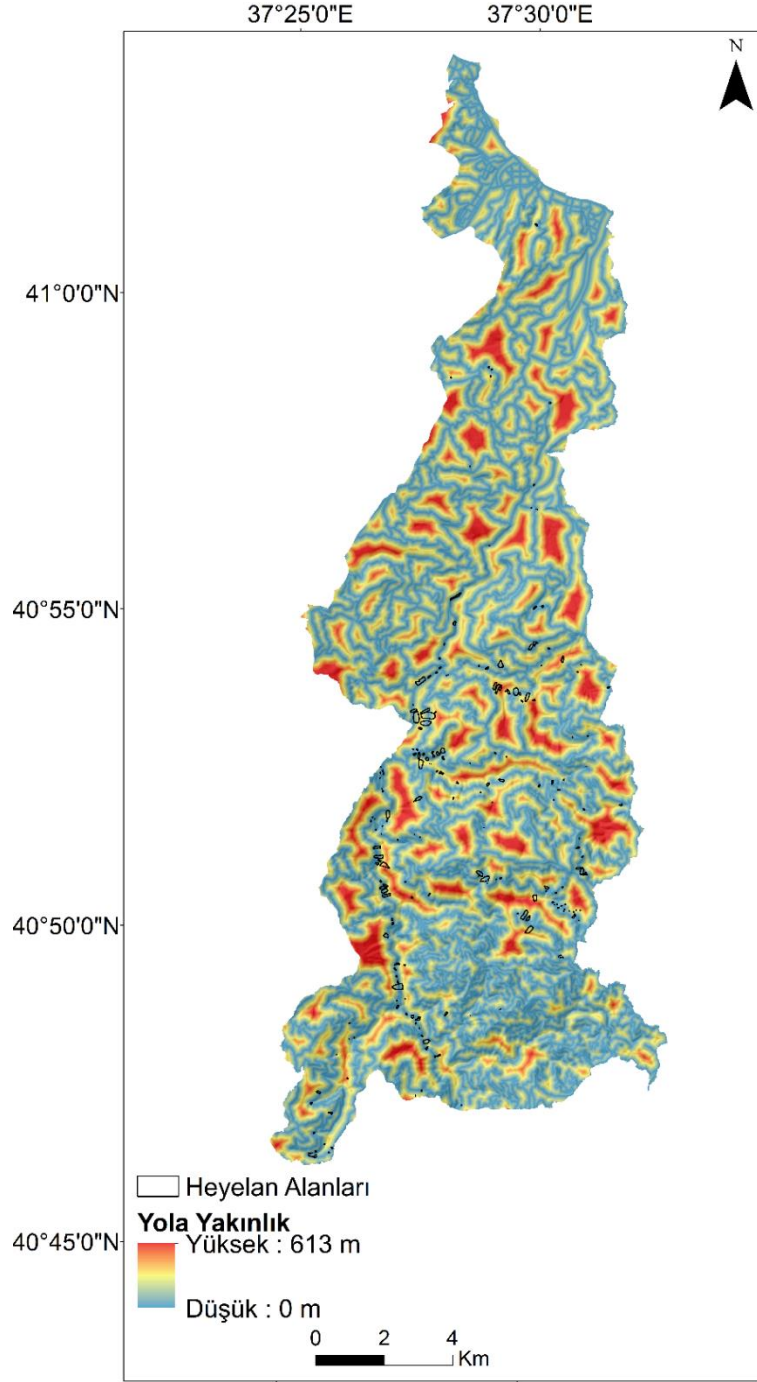
etkilemektedir (Saha vd., 2002; Süzen ve Doyuran, 2004). Ayrıca drenaj ağları yamaç malzemesinin suyla temas eden kısımlarını suya daha fazla doymun hale getirerek yine yamaçların duraylılığını bozmaktadır (Komac ve Ribicic, 2006; Çellek, 2013; Mondal ve Mandal, 2018). Drenaj ağlarına yaklaştıkça heyelana karşı duyarlılığın arttığı, drenaj ağlarından uzaklaştıkça ise duyarlılığın azaldığı birçok çalışmada gözlemlenmiştir (Ersayın, 2021). Çalışma alanına ait dereye yakınlık haritası ArcGIS 10.4.1 programında “Euclidean distance analysis” tool’u kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Çalışma alanının dereye yakınlık haritası

3.2.2.3.9. Yola Olan Yakınlık

Duyarlılık çalışmalarında sıklıkla kullanılan bir diğerk parametre ise yol ağlarına olan yakınlık parametresidir. Mevcut yol ağlarının durumu yamaçların doğal dengesinin bozulmasına sebebiyet vererek yamaçların duraylılığını bozmaktadır (Ayalew ve Yamagishi, 2005; Yalçın, vd., 2011; Zhao vd., 2022). Yamaçlarda açılan yollar hem yamaç topuğunda hem de topoğrafyada yük azalmasına sebebiyet vererek daha önce dengede olan yamaçların daha sonra yamaç gerisinde gerilme artışlarına neden olarak gerilme çatlaklarının gelişmesine yol açmaktadır (Yalçın ve Bulut, 2007; Argyriou vd., 2022). Oluşan çatlaklar daha sonra yüzeyden su girişi gibi negatif etkilerle duraysızlıkları tetikleyebilmektedir (Reis vd., 2009; Çellek, 2013). Tüm bu sebeplerden dolayı yola yakınlık parametresi de tez kapsamında dikkate alınmıştır. Çalışma alanına ait dereye yakınlık haritası ArcGIS 10.4.1 programında “Euclidean distance analysis” tool’su kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Çalışma alanının yola yakınlık haritası

3.2.2.3.10. Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi (NDVI)

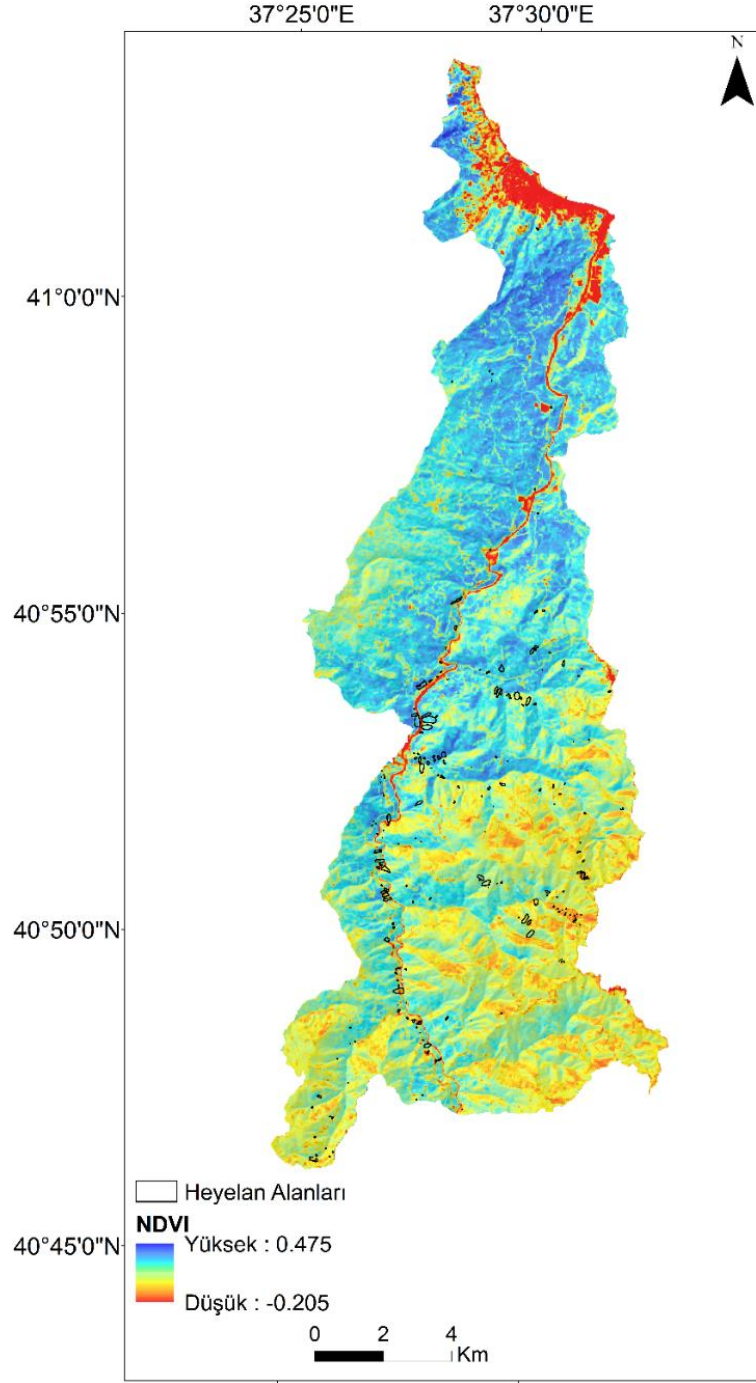
Son dönemlerde yapılan duyarlılık çalışmalarında bitki özelliklerini yansıtan optik uydu görüntülerinden kolayca elde edilebilen normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI) haritalarının kullanımı büyük bir artış göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında da bitki örtüsü yoğunluğunun tespit edilmesi amacıyla NDVI haritası kullanılmıştır.

NDVI haritasının oluşturulmasında Landsat 8 OLI uydu görüntüsünden yararlanılmış ve aşağıda verilmiş olan denklem ile hesaplanmıştır (Dou vd., 2015). NDVI değerleri bitki örtüsünün yoğunluğuna göre -1 ve +1 arasında değer almakta olup düşük NDVI değerleri düşük yoğunlukta bitki örtüsüne sahip çıplak / kayalık alanları gösterirken, yüksek değerler ise bitki örtüsünün yoğun olduğu alanları ifade etmektedir (Rouse, vd., 1974; Zhao vd., 2022). NDVI, uydu görüntüsünün RED bandının yakın kızıl ötesi banttan çıkarılması ile RED bandın yakın kızıl ötesi ile toplanmasının birbirine oranı ile elde edilmektedir. Normalize edilmiş fark bitki indeksi değeri eşitlik 3.9 ile hesaplanmaktadır (Koç ve Küçükönder, 2021).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3.9)$$

Burada; *NIR*, uydu görüntüsünün yakın kızılötesi bantına ait yansıtım değerlerini, *RED* ise görünür bölgedeki kırmızı banta ait yansıtım değerlerini belirtmektedir.

Çalışma alanına ait NDVI haritası Şekil 3.22’de sunulmuş olup NDVI değerlerinin 0.475 ile -0.250 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.22. Çalışma alanının normalize edilmiş fark bitki indeks (NDVI) haritası

3.2.2.4. Zamansal Olabilirlik

Heyelan tehlike haritalarının ikinci basamağını oluşturan zamansal olabilirlik parametresi, heyelana karşı duyarlı olan bir bölge için ya da mevcut bir heyelanın tekrar ne zaman meydana geleceğini belirleyen olasılık değeridir (Crovelli, 2000; Fu vd., 2020). Heyelan zamansal olasılık P değeri, heyelanları tetikleyen faktörlerin frekans

analizlerinden hesaplanmaktadır (Tekin, 2019). Çalışma alanındaki heyelanlar aşırı yağışlardan sonra oluştuğundan zamansal olabilirlik parametresi yağış frekans analizleri ile üretilmiştir. Yağış verileri kullanılarak hesaplanan zamansal olabilirlik değeri, belirli bir bölgede heyelan oluşumu için gerekli olan en düşük yağış şartlarını ifade etmektedir. Çeşitli ampirik temelli yaklaşımlar, minimum yağış koşullarının doğru ve güvenilir tahminini sağlayabilmelerindeki basitlik ve kolaylık nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Dikshit vd., 2020). Yağış şiddeti-süre (Giannecchini vd., 2012), kümülatif yağış değerleri (Dikshit vd., 2019) ve olay öncesi gerçekleşen yağış (Zêzere vd., 2005) gibi farklı parametreler kullanılarak çeşitli yağış eşikleri geliştirilmiştir. Bu çalışma için, 1,2, 3, 4, 5,10,15 ve 30 günlük kümülatif yağış değerleri kullanılarak gerekli yağış analizleri gerçekleştirilmiştir.

Heyelanların zamansal olabilirlikleri; Poisson, Binom, Bernoulli, Geometrik, Negatif Binom dağılımları gibi kesikli olasılık dağılımları kullanılarak elde edilmektedir (Evans ve Rosenthal, 2004). Poisson dağılımı zamansal olabilirlik parametresini hesaplamak için en yaygın kullanılan yöntem olarak literatürde karşımıza çıkmaktadır (Croveli, 2000; Bayazıt ve Önöz, 2004; Guzzetti vd., 2005; Dikshit vd., 2020).

Poisson Dağılımı: Heyelan vakalarının zamansal olabilirliklerinin saptanmasında literatürde sık kullanılan bir olasılık fonksiyonudur. t zamanında n tane heyelan oluşma olasılığı olarak tanımlanan poisson modeli aşağıda verilen eşitlikle (3.10) hesaplanmaktadır (Croveli, 2000).

$$P[N(t) = n] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad n=1,2,3,\dots \text{dir.} \quad (3.10)$$

Burada t zaman, n olay sayısıdır. λ =olay/zaman (heyelanların oluşma oranı) olarak belirtilmektedir. Belli bir t zamanda bir veya daha fazla heyelan gerçekleşmesi olasılığı, temeli Poisson dağılımına dayanan eşitlik 3.11'de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır (Croveli, 2000).

$$P [N(t) \geq 1] = 1 - P[N(t) = 0] = 1 - e^{-\frac{-t}{\mu}} \quad (3.11)$$

Yukarıda ki eşitlikte $\mu=1/\lambda$ olarak tanımlanmakta olup, gelecekteki tekrarlanma aralığını vermektedir.

Poisson modeli, aşağıdaki olasılıklar altında geçmişteki heyelan olaylarının istatistiklerine dayalı olarak farklı zamanlar için sonraki yıllarda potansiyel heyelanların belirlenmesine yardımcı olur (Croveli, 2000):

- Farklı zamanlarda meydana gelen heyelanlar birbirinden bağımsızdır;
- Heyelanların olasılık dağılımı, belirlenen zaman aralığında sabit olması ve değişmemesidir;
- Kısa bir zaman aralığında birden fazla vakanın olma olasılığı ihmal edilebilir;
- Ortalama heyelan oluşma tekrarı, geçmişte gözlemlendiği gibi gelecekte de aynı kalacaktır.

Heyelanlar için her zaman geçerli olmayan bu varsayımların sonuçları, olasılık modelinin sonuçlarını değerlendirirken dikkate alınmalıdır (Croveli, 2000).

Heyelanı tetikleyen faktörün tekrarlanma periyodu ise sürekli olasılık fonksiyonları kullanılarak elde edilmektedir. Tetikleyici faktör verileri için frekans analizleri yapılarak hangi dağılımın daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilir (Tekin, 2019). Log Normal, Burr, Weibull, Frechet, Genelleştirilmiş Extrem Değer, Gumbel, Pearson Tip III, Log Gumbel, Log Pearson Tip III, Gamma ve Exponential gibi dağılımlar literatürde en sık kullanılan dağılımlar arasında bulunmaktadır (il, 2009; Karahan ve Özkan, 2013; Tekin, 2019; Tezel, 2021). Çalışma kapsamında yağış verilerinin değerlendirilmesi sonucunda tüm dağılım sonuçları incelenmiş ve en uygun frekans dağılım modeli seçilmiştir.

3.2.2.4.1. Uygunluk Testi

Gözlemlerinin belli dağılım popülasyonlarından gelip gelmediğini anlamak amacıyla literatürde kullanılan birden fazla yöntem yer almaktadır (Karahan ve Özkan, 2013). Bunlar; Ki-Kare testi gibi korelasyona dayalı testler ve Kolmogorov-Smirnov ve Anderson Darling gibi amprik dağılım fonksiyonuna bağlı testlerdir (Di Baldassarre vd., 2006).

Bu alışmada Easyfit 5.6 paket programı kullanılarak veri setinin hangi dağılım modeline daha uygun olduğunu belirlemek için yukarıda ifade edilen tekniklerden Ki-Kare testi,

Kolmogorov-Smirnov ve Anderson-Darling testleri uygulanmıştır. Bu testler verilerin istatistiksel açıdan sıfır hipotezini test etmek için kullanılmaktadır.

(1) Ki-kare testi (X^2) niteliksel olarak belirtilen verilerin dağılımının bir diğerinden farklı olup olmadığını değerlendirmek için uygulanan bir hipotez test metodudur (Kavzaoğlu vd., 2012). Ki-kare testi, gözlenen (G) ile beklenen frekanslar (B) arasındaki farkın istatistik olarak anlamlı olup olmadığı mantığına dayanmaktadır. X^2 testi genellikle, iki veya daha çok grup arasında fark olup olmadığı testinde, iki değişken arasında bağ olup olmadığı testinde, gruplar arası homojenlik testinde, örneklemden elde edilen dağılımın istenen bir teorik dağılıma uyup uymadığının testinde, varyans için ki-kare testinde, varyansla ilgili aralık tahmininde, kontenjans katsayısının hesabında kullanılmaktadır (Güngör, 2008). Ki-kare testinin doğru kullanılabilmesi için iki temel varsayım bulunmaktadır. Bu varsayımlar;

i) Değişkenler birbirinden bağımsız olmalıdır.

ii) Ki-kare dağılımı, sürekli bir dağılımdır. Beklenen frekanslar 5'ten büyük olmalıdır eğer 5'ten küçük olur ise dağılım kesikli ve çarpık olur (Güngör, 2008).

Test istatistiği denklem. 3.12'deki gibi gösterilmektedir. G 'lerin B 'lere yaklaşması durumunda X^2 istatistiği sıfıra yaklaşacaktır (Karahana ve Özkan, 2013).

$$X^2 = \sum \frac{(G-B)^2}{B} \quad (3.12)$$

(2) Deneysel dağılım fonksiyonuna dayalı uyum iyiliği testlerinden en yaygın tercih edilen yöntemlerden biri olan Kolmogorov-Smirnov testi; Kolmogorov-Smirnov tarafından geliştirilmiş olup, iki bağımsız değişkenin dağılımlarının benzer olup olmadığını test etmek için kullanılır (Güngör, 2008). Kolmogorov-Smirnov testinde gözlem eklenik olasılık fonksiyonu, $P(x)$, ile kabul edileceği varsayılan dağılımın eklenik olasılık fonksiyonu, $P_0(x)$, arasındaki mutlak farka dayanmaktadır. Bu fark; denklem 3.13'e göre hesaplanmaktadır (Karahana ve Özkan, 2013).

$$D_n = \max P(x) - P_0(x) \quad (3.13)$$

D_n istatistiği kritik değerden küçük olursa varsayılan dağılım anlamlı kabul edilir; eğer D_n değeri kritik eşikten büyükse belirtilen anlamlılık kabul edilmez (Karahana ve Özkan, 2013). Kolmogorov-Smirnov testinde X^2 testinde olduğu gibi beklenen frekansların 5'ten

büyük olması gibi bir alt limit söz konusu olmadığından dolayı kolaylıkla uygulanabilmektedir (Güngör, 2008).

(3) Anderson ve Darling (1954), Kolmogorov-Smirnov testini uyarlayarak bu test istatistiğini önermişlerdir. Buna göre, n örnek hacmi olmak üzere test istatistiği denklem 3.14'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$A^2 = -n - \frac{s^2}{n} \quad (3.14)$$

Anderson-Darling testi, her dağılım için ayrı kritik değerin hesaplanması gereken Kolmogorov-Smirnov testinin aksine test edilen dağılımın kritik değerini kullanmaktadır (Adamson, 1979). Anderson-Darling testi tek yönlü bir test olup, test istatistiği kritik değerden büyükse sıfır hipotezi kabul edilmez (Karahan ve Özkan, 2013).

3.2.2.5. Alansal Olabilirlik

Heyelan tehlike haritalarının önemli bir diğer parametresi olan alansal olabilirlik, çalışılan bölge içerisinde meydana gelebilecek olan heyelanların ne büyüklükte oluşacağını belirleyen olasılık fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Fu vd., 2020). Heyelan alansal olabilirlik parametresi, heyelan büyüklüğü ile frekans dağılımları ilişkilendirilerek hesaplanmaktadır (Fu vd., 2020). Heyelan alanının olasılık yoğunluk fonksiyonu $p(A_L)$ eşitlik 3.15'teki gibi tanımlanmaktadır (Tebbens, 2020).

$$p(A_L; \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{t}, \mathbf{s}) = \frac{1}{N_{LT}} \frac{\delta N_L}{\delta A_L} \quad (3.15)$$

N_{LT} envanter haritasında bulunan toplam heyelan sayısı, A_L heyelan alanı, δN_L değeri A_L değerinden büyük heyelan sayısını vermekte olup ve δN_L ise A_L ile $\delta A_L + A_L$ arasındaki heyelan sayısını vermektedir (Çil, 2009; Florsheim ve Nichols, 2013; Frattini ve Crosta, 2013).

Heyelanların alan - frekans dağılımları arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde literatürde çok sayıda model yaklaşımı bulunmaktadır (Malamud vd., 2004; Hurst vd., 2013; Qiu vd., 2020b). Bunlardan en önemlileri Stark ve Hovius (2001) tarafından önerilen Double Pareto ve Malamud vd., (2004) tarafından önerilen üç parametrelili ters gamma dağılımlarıdır (Wu ve Chen, 2013; Lari vd., 2014; Tanyaş vd., 2019; Büschelberger vd., 2022). Malamud vd., (2004) üç parametrelili ters gama dağılımını

farklı alanlarda oluşan farklı türdeki heyelan vakalarıyla ilişkilendirerek, dağılımın heyelan vakaları için yapılan sıklık - alan dağılımları ile iyi uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Malamud vd., (2004) tarafından önerilen üç parametrelili ters gamma dağılımı eşitlik 3.16'da gösterilmektedir.

$$P(A_L; p, a, t, s) = 1 \frac{1}{\alpha \Gamma(p)} \left(\frac{\alpha}{A_L - s} \right)^{p+1} \exp\left(-\frac{\alpha}{A_L - s}\right) \quad (3.16)$$

Burada a , maksimum olasılığı kontrol eden değer olup ($a=1,28 \times 10^{-3} \text{ km}^2$), s parametresi küçük ölçekli heyelanları kontrol eden parametredir ($s=1,32 \times 10^{-4} \text{ km}^2$), p ise büyük ve orta ölçekli heyelanları kontrol eden parametre olup ($p=1,40$) bu değere ilişkin gama değeri $\Gamma(1.4)=0.88726$ olarak tanımlanmıştır.

Guzzetti vd., (2005) önerilen üç parametrelili ters gamma fonksiyonunun heyelanların alansal olabilirlik hesaplarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Heyelan olayının hangi büyüklükte olacağı olasılığını dağılımın integralini alarak hesaplamışlardır eşitlik 3.17.

$$P_{A_L} \int_{\alpha_L}^{\infty} p(A_L; p; \alpha; s) dA_L = \int_{\alpha_L}^{\infty} \frac{1}{\alpha \Gamma(p)} \left(\frac{\alpha}{A_L - s} \right)^{p+1} \exp\left(-\frac{\alpha}{A_L - s}\right) dA_L \quad (3.17)$$

Heyelanların frekans yoğunluğu ise eşitlik 3.18 ile hesaplanmaktadır (Van Den Eeckhaut vd., 2007).

$$f(A_L) = \frac{\delta N_L}{\delta A_L} = N_{LT} p(A_L) \quad (3.18)$$

3.2.3. Heyelan Kaynak Alanı ve Hacim Arasındaki Ampirik İlişkiler

Bir heyelanın alanı ve hacmi arasındaki ilişki, heyelanların yayılma alanını, etkilenen alanları, risk altında bulunan elemanları (binalar, yollar, altyapılar vb.) ve hasarları kısmen kontrol etmesinden dolayı heyelan risk analizlerinde değerlendirilmesi gereken önemli parametrelerden biri olma özelliğine sahiptir (Jaboyedoff vd., 2020; Meier vd., 2020).

Heyelan hacmi, genellikle heyelanın yüzey alanı ve ortalama tahmini derinliğinin çarpılmasıyla elde edilir (Legros, 2002). Bir bölgedeki heyelan sayısı, doğru ve makul ölçüde eksiksiz heyelan envanter haritalarının mevcut olduğu durumlarda kolayca elde edilen bilgilerdir. Heyelan envanter haritası sayısal biçimde mevcutsa, birim alandaki heyelan sayısı, her bir heyelanın mevcut alanı ve toplam heyelan alanı kolaylıkla

hesaplanabilir (Guzzetti vd., 2009). Fakat heyelan derinliği heyelanın farklı kısımlarına göre değişkenlik gösterdiğinden dolayı bu kadar kolay hesaplanamamaktadır. Bu yüzden, birçok araştırmacı tarafından yüzey alanı-heyelan hacmi ilişkisine dayalı tahmini hacim hesaplamaları için kuvvet yasası fonksiyonları kullanılmıştır (Amirahmadi vd., 2016; Meier vd., 2020). Heyelan alanı (A_L) ve heyelan hacmi (V_L) arasındaki ampirik ilişki $V_L = \varepsilon \times A_L^\alpha$ formunda bir denklemle ifade edilmeye çalışılmaktadır. Bu formül ile alanı bilinen bireysel heyelanların hacminin tahmin edilmesi mümkün hale gelmektedir (Cha vd., 2018). Literatürde mevcut olan heyelan alanı (A_L) ve hacmi (V_L) arasındaki mevcut ilişkiler Tablo 3.3'te gösterilmektedir. Guzzetti vd., (2009), dünya çapında yapılan heyelan envanterlerini derleyip elde ettikleri heyelan envanter kataloğunu kullanarak heyelan yüzey alanı ve hacim arasındaki ilişkileri hesaplamak için eşitlik $V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}$ kullanmışlardır. Larsen vd., (2010) yapmış oldukları çalışmada $V_L = 0.44 \times A_L^{1.145}$ formülünü kullanarak A_L ve V_L arasındaki ilişkiyi tahmin etmeye çalışmışlardır. Tseng vd., (2013) yaptıkları çalışmalarında $V_L = 0.452 \times A_L^{1.242}$, Cha vd., (2018) çalışmalarında $V_L = 0.59 \times A_L^{1.02}$ ve Pan vd., (2021) çalışmalarında $V_L = 0.0799 \times A_L^{1.3302}$ eşitlikleri kullanmışlardır. Yukarıdaki eşitliklerde verilen A_L heyelan alanını m^2 cinsinden ve V_L ise heyelan hacmini m^3 cinsinden temsil etmektedir (Meier vd., 2020).

Tablo 3.3. Heyelan alanı (A_L) ve heyelan hacmi (V_L) arasındaki ampirik ilişkiler

Heyelan Sayısı	Maximum Alan A_L (m^2)	Minimum Alan A_L (m^2)	Formüller	Kaynak
1614	1×10^5	1×10^0	$V_L = 0.644 A_L^{1.145}$	Larsen vd. (2010)
677	1×10^9	2×10^0	$V_L = 0.074 A_L^{1.450}$	Guzzetti vd. (2009)
371	2×10^5	1×10^2	$V_L = 0.452 A_L^{1.242}$	Tseng vd. (2013)
930	2.1×10^3	6×10^0	$V_L = 0.0329 A_L^{1.385}$	Cha vd. (2018)
45	3.9×10^6	4×10^4	$V_L = 0.769 A_L^{1.250}$	Whitehouse (1983)
1019	1.6×10^4	5×10^0	$V_L = 1.826 A_L^{0.898}$	Larsen ve Sanchez (1998)
615	5.2×10^4	2×10^2	$V_L = 1.0359 A_L^{0.880}$	Matrin vd. (2002)
124	$1/2 \times 10^5$	7×10^2	$V_L = 0.1549 A_L^{1.0905}$	Guthrie ve Evans (2004)

3.2.4. Heyelan Yayılma Alanı Hesabı

Bir heyelanın kaynak alanından eğim aşağı hareket ettiği en yüksek mesafeye heyelan hareket mesafesi veya heyelan yayılma alanı denilmektedir (McDougall, 2017). Afet önleme ve hafifletme kararları için bir heyelanın potansiyel yayılma alanını ve etkilenecek alanları anlamak, heyelan tehlikesi ve risk analizinin önemli bir bileşenidir (Brideau vd., 2020; Zeng vd., 2021). Moloz akımları ve çığlar gibi benzer akış gösteren heyelanlar, oldukça hızlı hareket eder ve kaynaklarından çok uzaklarda geniş alanları

etkileyebilirler (Hungar vd., 2014). Bu yüzden, risk altında bulunan elemanları tahmin etmek ve riski azaltmaya yönelik heyelan stabilizasyon yapılarını tasarlamak için heyelan yayılma alanını belirlemeye sıklıkla ihtiyaç duyulmaktadır (McDougall, 2017). Geliştirilmiş heyelan akış yolu tahmin modellerini kullanarak potansiyel heyelana eğilimli alanları ve yüksek heyelan riski taşıyan unsurları tahmin etmek mümkündür (Ju vd., 2022). Bu amaçlar doğrultusunda basit ampirik-istatistiksel korelasyonlardan gelişmiş üç boyutlu bilgisayar modellerine kadar çeşitli araçlar ve yöntemler geliştirilmiştir (Dai vd., 2002). Bir heyelanın akış davranışına ilişkin yapılmış olan araştırmalar genel olarak üç kategoriye ayrılabilir (Chen ve Lee, 2004). İlki, heyelan kütlelerinin tek bir nokta olarak kabul edildiği, heyelanların fiziksel davranışını tanımlayan basitleştirilmiş analitik modelleri içerir. İkinci kategori, malzemenin dinamik hareketini tanımlayan kütle, momentum ve enerjinin korunum denklemlerinin sayısal simülasyonlarını tanımlayan modellerdir (Dai vd., 2002; Scaringi vd., 2018). Üçüncü ve son kategori, heyelan malzemesinin yayılma alanını ve dağılımını tahmin etmek için pratik araçlar sağlamayı amaçlayan ampirik-istatistiksel modellerdir (Zhao vd., 2021). Diğer iki yöntemle göre ampirik modellerde kullanılacak parametrelerin elde edilmesi daha mümkün olduğu için, ampirik-istatistiksel yöntemler, akış tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zou vd., 2017; Zhao vd., 2021; Ju vd., 2022).

Literatürde geçmişte meydana gelmiş yenilme vakalarına dayalı olarak araştırmacılar tarafından geliştirilmiş birçok ampirik formül bulunmaktadır (Scheidegger, 1973; Hutchinson, 1988; Corominas, 1996; Jakob vd., 2005; Whittall, 2015; Zou vd., 2017; McDougall, 2017; Mitchell vd., 2018). Önerilen ampirik yöntemler genellikle heyelan alanı, hacmi ve eğim açısı ile basit korelasyonlar kullanır (Corominas, 1996; Legros, 2002; Iverson vd., 2015). Çünkü malzemenin hacmi, kütlesi ve eğim açısı heyelan hareket mesafesini etkileyen parametrelerdir (Guo vd., 2014). Özellikle araştırmacılar, heyelan akış davranışının heyelan hacmi tarafından kontrol edildiğini öne sürerek (Scheidegger, 1973) birçok ampirik ilişki geliştirmiştir (Zou vd., 2017). Heyelanlar için yayılma alanı hesaplamada kullanılan ilk ampirik ilişki, bir heyelanın gidebileceği mesafenin hacmiyle orantılı olduğunu iddia eden Heim (1932) tarafından geliştirilmiştir (Whittall vd., 2017). Heim (1932) tarafından "Fahrböschung" olarak adlandırılan tahmin yöntemi heyelanların başlangıç bölgesi ile birikme bölgesi arasındaki yükseklik farkının (H) yatay mesafeye (L) oranı olarak ifade edilmektedir (Brideau vd., 2020). Heim (1932) Fahrböschung açısı ile heyelan hacmi arasında ters bir ilişki olduğunu öne sürerek, heyelan hacmi arttıkça

elde edilecek olan Fahrböschung açısının azalacağını ifade etmiştir (Corominas vd., 2003). Fahrböschung açısı eşitlik 3.19’da verilen formül ile hesaplanmaktadır (Whithall, 2015).

$$\text{Log}(H/L) = -a\text{Log}(V_L) + b \quad (3.19)$$

Formülde a ve b parametreleri sabit, V_L ise hacmi temsil etmektedir.

Daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilerek heyelan yayılma alanı-hacim ilişkisini gösteren çeşitli ampirik formüller ortaya çıkmıştır. Örneğin; Scheidegger (1973), heyelan akış özelliklerinin heyelan hacmi tarafından kontrol edildiğini öne sürerek birçok deneysel temelli ilişki geliştirilmiştir. Davies (1982) yine bir heyelanın hareket akışının, hacmi ile kontrol edildiğini öne sürmüştür. Legros (2002)’de yapmış olduğu çalışmada yayılma alanının (L_{max}) öncelikle heyelan hacmine bağlı olduğunu ve ikisinin arasında pozitif bir korelasyon olduğunu öne sürmüştür. Literatürde mevcut olan bazı ampirik formüller Tablo3.4’te gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Heyelan yayılma alanı ve heyelan hacmi arasındaki ampirik ilişkiler

Model Simfları	Ampirik Modeller	Referans
Model 1	$H/L=0.463V^{-0.148}$	Heim (1932)
Model 2	$\text{Log}(H/L)=-0.15666\text{Log} V+0.62419$	Scheidegger (1973)
Model 3	$\text{Log}(H/L)=-0.1519\text{Log} V+0.6640$	Li (1983)
Model 4	$\text{Log}(H/L)=-0.085\text{Log} V-0.047$	Corominas (1996)
Model 5	$H/L=0.8796V^{-0.016}$	Whittall (2019)
Model 6	$H_{max}/L_{max} = 0.16V^{0.15}$	Legros (2002)
Model 7	$L_{max} = 8V^{0.25}$	Legros (2002)
Model 8	$V=0.772L^{2.108}$	Qarinur (2015)
Model 9	$L=1.0V_L^{0.55}$	Jaiswal vd. (2011)

3.2.5. Risk Altında Bulunan Elemanlar

Doğru ve yeterli düzeyde risk değerlendirmesi yapabilmenin bir sonraki adımı heyelan riski altında bulunan elemanlar hakkında bilgi toplamaktır (Sim vd., 2022). Risk altındaki unsurlar, belirli bir alanda risk altında olan nüfus, binalar, sanayi bölgesi, ulaşım hatları, tarım alanları, altyapı tesisleri, araçlar, çevresel özellikler ve ekonomik faaliyetler gibi olası bir heyelan durumunda olumsuz etkilenme potansiyeli taşıyan unsurların tamamı olarak tanımlanmaktadır (Fell vd., 2005; Ram ve Gupta, 2022).

Risk altında bulunan unsurların envanterleri, çalışmanın hedeflerine bağlı olarak çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir (Alexander, 2005). Genel olarak, risk altındaki unsurlar türleri ve yoğunlukları bakımından benzer özelliklere sahip homojen birimler şeklinde toplanmalıdır. Örneğin, doğrusal özellikler (ulaşım hatları) ve belirli alanlar (bir baraj yeri, sanayi bölgesi) şekilde kategorize edilmelidir (Corominas vd., 2014). Bu çalışma risk altında bulunan binalara, yollara, tarım arazilerine ve ormanlık alanlara odaklanmış ve her bir EAR'ın değeri, uzman görüşü, saha çalışması ve teknik rapor incelemesine dayanılarak değerlendirilmiştir.

Genellikle risk altında bulunan elemanların envanter verileri, mevcut kadastro veri tabanları ve mevcut nüfus sayımı verileri gibi veri tabanlarından üretilebilir (Van Westen vd., 2008). Ancak, risk altındaki unsurlar ve özellikleri hakkında gerekli bilgileri sağlayan güvenilir ve eksiksiz veri tabanları nadiren mevcuttur (Van Westen vd., 2005). Bu yüzden, bu tür veriler mevcut değilse, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, InSAR (Stilla vd., 2003), ve LiDAR (Priestnall vd., 2000) kullanılarak oluşturulur. Risk altındaki unsurların değerine ilişkin spesifik verilerin bulunmaması veya yokluğu durumunda ise makul varsayımlar yapılabilir. Ancak, risk altındaki unsur sınıflarına ortalama maddi hasar değeri atamak oldukça uzmanlık gerektiren karmaşık bir işlemdir. Ayrıca risk altındaki unsurlar değerlendirilirken maddi sonuçlarının yanında sosyal ve psikolojik sonuçlar da dikkate alınmalıdır (Glade ve Crozier, 2005).

Dolayısıyla, risk altındaki unsurlar:

- Olay sonrası hasar kayıt protokollerinin oluşturulması;
- Detaylı saha ve anket çalışmaları;
- Resmi istatistikler gibi diğer kaynaklardan bölgesel bilgilerin elde edilmesi şeklinde belirlenmelidir (Glade ve Crozier, 2005).

3.2.6. Hasargörebilirlik Derecesi

Hasargörebilirlik, risk altındaki elemanların potansiyel kayıp derecesini ifade eden risk değerlendirmesinin en temel bileşenlerden biridir (Ram ve Gupta, 2022). Başka bir ifade ile, hasargörebilirlik, risk altındaki elemanların 0 (hasar yok) ve 1 (hasar var) olarak ifade edildiği potansiyel hasar veya kaybının ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Fell, 1994;

Leone vd., 1996). Genel olarak; hasargörebilirlik derecesi; fiziksel (fiziksel altyapı ve binaların hasar görmesinden kaynaklanan kayıplar), ekonomik (ekonomik olarak meydana gelen kayıplar), çevresel (su, toprak kaynakları olmak üzere doğal kaynakların zarar görmesinden kaynaklanan kayıplar) ve sosyal (nüfus ve sosyal yapıdaki kayıplar) olmak üzere dört kategori altında sınıflandırılmaktadır (Singh vd., 2017; Nor Diana vd., 2021).

Hasargörebilirlik, (a) heyelan yayılma alanına; (b) heyelanın hacmi ve hızına; (c) risk altında bulunan elamanlara (binalar, insanlar vb.) ve bunların heyelanlara olan yakınlıklarına bağlıdır (Finlay, 1996). Genel olarak, heyelanların hasargörebilirlik değerlendirmelerine ilişkin üç farklı metodolojiden söz edilebilir. Bunlar nitel, yarı nicel ve nicel yaklaşımlardır (Ciurean vd., 2013). Nitel yaklaşımda, hasargörebilirlik faktörleri uzman görüşü, saha haritalaması veya tarihsel kayıtlara dayalı olarak değerlendirilir. Yarı nicel yaklaşımda, hasar matrisleri gibi kademeli hasar seviyeleri kullanılarak genelleme seviyeleri azaltılır. Bu yöntem için, heyelanların ve sonuçlarının ayrıntılı kayıtlarının istatistiksel olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Nicel yöntemler ise daha objektif olup detaylı veri gereksinimleri nedeniyle çoğunlukla yerel ölçekteki değerlendirmelerde kullanılır (Ciurean vb., 2013).

Hasargörebilirlik derecesi, heyelan büyüklüğüne ve tipine bağlı olarak değişmesinden dolayı heyelan risk analizlerinde nicel olarak temsil edilmesi en zor parametrelerden biri olarak değerlendirilir (Zeze vd., 2008). Ayrıca, etkilenme bölgesi içinde veya yakın çevresinde bulunan her bir elemanın hasargörebilme derecesi, buldukları konuma göre de farklılıklar göstermektedir. Örneğin heyelan kaynak alanı içinde ve akış yolu üzerinde bulunan elemanlar son derece yüksek savunmasız alanlar olarak sınıflandırılırken, heyelan kaynak alanı ve akış yolu dışında bulunanlar ise düşük savunmasız alanlar olarak sınıflandırılırlar. Bu yüzden hasargörebilirlik derecesi belirlenirken, risk altında bulunan elemanların yayılma alanı ve kaynak alanına olan konumları dikkate alınarak uzman görüşüne göre ya 0 ile 1 arasında değerler atanır ya da çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde sınıflara ayrılır (Fell ve Hartford, 1997; Van Westen vd., 2009). Dünya çapında heyelan hassasiyetine ilişkin araştırmalar Glade (2003) tarafından özetlenmiş olup hasargörebilme dereceleri binalar ve insanların maruz kaldığı hasar tipi ve hasar şiddetine göre hasar dereceleri sınıflandırılmıştır (Tablo 3.5).

Tablo 3.5. Risk altındaki elemanların hasargörebilme dereceleri (Glade, 2003).

Risk Altındaki Elemanlar	Hasar Şiddeti	Hasar Tipi	Hasar Derecesi
Binalar	I.	Hafif yapısal olmayan hasar, stabilite bozulmamıştır	0.01-01
	II.	Stabilite bozulmamıştır, duvarlarda çatlaklar mevcut.	0.2-0.3
	III.	Kuvvetli deformasyonlar mevcut, destek yapılarında çatlaklar var, stabilite etkilenmiştir, kapılar ve pencereler kullanılamaz hale gelmiştir, binanın tahliye gerekli.	0.4-0.6
	IV	Binada yapısal kırılmalar mevcut, kısmen tahrip olmuş, binanın tahliyesi gerekli, Hasar olan parçaların yeniden inşası gerekli	0.7-0.8
	V	Kısmen veya tamamen tahrip edilmiş, tahliye gerekli, tamamen yeniden yapılanması gerekmektedir.	0.9-1
İnsanlar	I.	Moral bozukluğu	0.001
	II.	Psikolojik problemler	0.002
	III.	Hafif fiziksel yaralanma	0.003-0.005
	IV.	Ağır fiziksel yaralanma	0.04-0.1
	V	Ölüm	1

Hasargörebilirlik derecelendirmesiyle ilişkili büyük belirsizlikler ve karmaşıklıklar göz önüne alındığında, hemen hemen mevcut tüm metodolojiler uzman görüşüne ve ampirik verilere dayanmaktadır (Corominas vd., 2014). Matematiksel olarak, hasargörebilirlik derecesi aşağıdaki denklem 3.20 ile ifade edilmektedir.

$$V_L = P(D_L) \quad (3.20)$$

Burada V_L heyelan nedeniyle meydana gelebilecek kayıp olasılığını temsil ederken, D_L ise zarar görmesi beklenen risk altındaki öğeleri temsil eder (Rahman vd., 2022).

Pan vd., (2021)'de yapmış oldukları çalışmalarda risk altında bulunan tüm elemanlar için hasar görebilirlik derecesini eşitlik 3.21' e göre hesaplamışlardır.

$$VI = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Ear}} (V_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^{N_{Ear}} W_i} \quad N_{Ear} > 0 \quad (3.21)$$

Burada VI , hasargörebilirlik indeksini, N_{Ear} , etki bölgesi içindeki toplam eleman sayısını, W_i , risk altındaki elemanların toplam ağırlık değerini ve V_i , etki bölgesindeki risk altında bulunan elemanların konumlarına göre riske maruz kalma derecelerini ifade eder.

Fu vd., (2020) yapmış oldukları çalışmada binalardaki nüfusun savunmasızlığını, bina savunmasızlığı ile bir kuvvet-yasası ilişkisine göre eşitlik 3.22 kullanarak hesaplamışlardır (Li vd., 2010) .

$$V_p = 0.0014 \times e^{6.07 \times V_b} \quad (3.22)$$

Burada V_p , binalardaki nüfusun savunmasızlığı ve V_b bir binanın savunmasızlığıdır. (Olaydan zarar görmeyen binalara 0, tamamen zarar görmüş binalara 1 verilmiştir).

Nefeslioğlu ve Gökçeoğlu, (2011)'de yapmış oldukları çalışmada ise hasargörebilirlik değerlerinin hesaplanması için aşağıda ki eşitlik 3.23'ü önermişlerdir.

$$V_i = 1, \quad d < \frac{h}{2} + m, \quad (3.23)$$

$$V_i = \frac{\frac{h}{2} + m}{n \times d}, \quad d \geq \frac{h}{2} + m,$$

Burada d risk altındaki elemanlara olan mekânsal uzaklık, h mekânsal çözünürlüğün karekökü, m artış sabiti ve n risk altındaki elemanın mekansal tanımına bağlı olarak tür sabitidir; ayrık yapılar için $n=4$ ve sürekli yapılar için $n=2$ olarak alınır. Risk altındaki elemanların heyelandan etkilenecek bölgenin uzaklığına ve uzman görüşüne bağlı olarak, m değeri denklemde 0 ile 1 arasında değişen değerler olacaktır. m değerine bağlı olarak, beklenen hasargörebilirlik değerleri de artıp ya da azalacaktır.

3.2.7. Mamdani-Bulanık Mantık Yöntemi

Belirsizlik içeren problemler karşısında doğru kararlar alınmasını sağlayan düşünme ve karar verme mekanizması olarak tanımlanan matematiksel modelleme yaklaşımı olan bulanık mantık yöntemi ilk olarak 1965 yılında Prof. Lofti Zadeh tarafından tanımlanmıştır (Sumiati vd., 2014). Zadeh (1965) "Bulanık Mantık ve Bulanık Kümeler Kuramı" makalesinin yayınlanmasının ardından belirsizlik içeren sistemlerin araştırılması yeni bir boyut kazanmış ve bulanıklık kavramı dikkat çekmeye başlamıştır (Alcan, 2014). Zadeh (1965) bulanık kümeyi, farklı üyelik derecelerine sahip elemanlardan oluşan bir topluluk olarak tanımlamaktadır. Bulanık varlık kümesinde yer alan her varlığın farklı üyelik dereceleri vardır (Topel, 2006). Varlıkların üyelik derecesi 0 ile 1 aralığında değişen değerler olabilir ve bu değerler üyelik fonksiyonları tarafından temsil edilirler (Altaş, 1999; Katambara ve Ndiritu 2009). Bu üyelik dereceleri bir varlığın bir kümeye ne derecede ait olduğunu göstermektedir (Özdemir vd., 2019).

Burada 1 tam üyeliği belirtirken, 0 ise zayıf üyeliği gösterir (Sünbül vd., 2015). Kümeye dâhil olup olmadıkları kesin olmayan varlıklara ise aitlik seviyesine göre 0 ile 1 arasında değerler verilir (Erbaş, 2012).

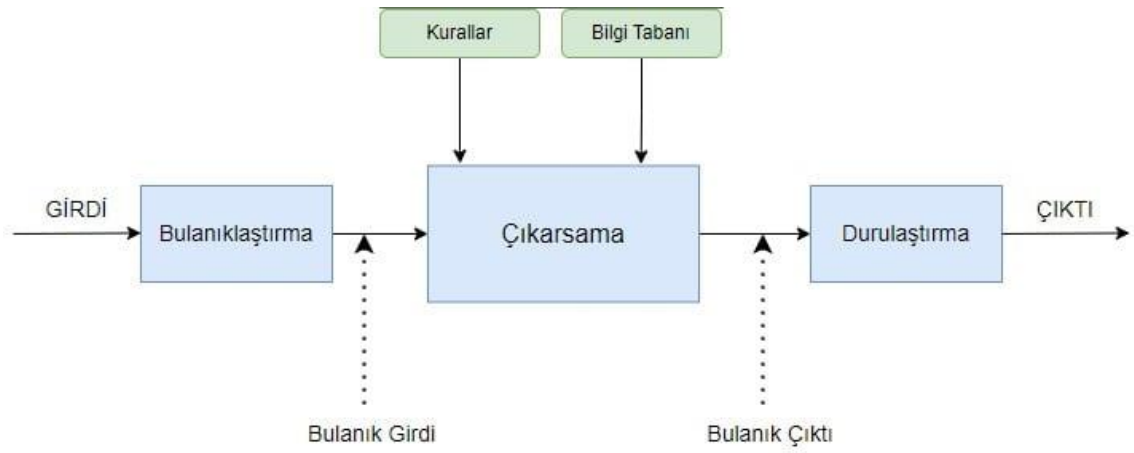
Klasik mantık teorisinde ise belirsiz eleman diye bir şey yoktur bir varlık bir kümeye ya aittir ya da ait değildir şeklinde tanımlanır (Alavi, 2013). Dolayısıyla klasik kümelerde bir elemanın alabileceği üyelik derecesi ya 0 ya da 1'dir. Klasik mantığın bu kadar kesin ve net olması, günlük yaşamda sıklıkla karşılaştığımız belirsizlikler göz önüne alındığında, ihtiyacımız olan esnekliği karşılamamaktadır (Özdemir vd., 2019). Bu yüzden, bulanık mantık yaklaşımı, klasik mantığın gerçek problemlerde yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan basit ve uygun bir araç olarak benimsenmiştir (Alavi, 2013).

Bulanık mantık, verileri işleyebilme ve makinelere insanların tecrübelerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği kazandırma açısından herhangi bir sorunun çözümü için kullanılan bir yöntemdir. Makinelere bu yeteneği verirken sayısal ifadeler yerine dilsel (sözel) ifadeler kullanılmaktadır (Çiğdem, 2022). Bu dilsel ifadeler bilgisayarlar yardımıyla matematik diline dönüştürülür. Bu dönüşüm Bulanık mantığın temeli olan bulanık kümeler teorisi ile gerçekleştirilir (Ertuğrul, 2006).

Bulanık küme teorisine dayalı bulanık modelleme temelde; Bulanıklaştırma, Bulanık Kural Tabanı, Bulanık Çıkarım Sistemi ve Durulaştırma olmak üzere 4 temel ögeden oluşmaktadır (Karakaş vd., 2023). Bulanık modellemenin ilk aşaması bulanık veri tabanının oluşturulmasıdır. Bu işlemin hedefi, kontrol edilmek istenen sistemin giriş ve çıkışındaki kesin sayısal değişken değerlerin dilsel değerler olarak ifade edilecek bir formata dönüştürülmesi ve bu ifadelerle göre giriş ve çıkış için oluşturulmuş bulanık kümelerin tanımlanmasıdır (Arslan ve Zırhlıoğlu, 2021; Ondoğan, 2022). Bulanıklaştırma, üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte dikkate alınan üyelik fonksiyonları sorunun yapısına ve amacına uygun olarak belirlenmelidir. İkinci aşamada, ilgili parametreler ve oluşturulan bulanık alt kümelere göre problemin çözümünü içeren uzman görüşüne göre *eğer-ise* bir dizi bulanık kurallar tabanı oluşturulur (Ösna, 2013).

Bir kuralın “Eğer” kısmı; bulanık kümelerin girdi kısmına referans ederken, “İse” kısmı da çıktı kısmına referans etmektedir (Dolaş, 2017). Böylece, bu aşamada uzman görüşüne dayalı sistemin yapısına uygun kurallar oluşturulur (Güneş ve İncekırık, 2016). Üçüncü

aşamada çıkarım yöntemleri seçilir yani kurallar üzerinde çıkarım işlemlerini gerçekleştirir (Mahapatra vd., 2011). Başka bir deyişle, *eğer- ise* yapısı kullanarak, bulanık kümelerle belirlenen kurallarla sistem girdileri, istenen bulanık çıktılara dönüştürülür (Bahadır, 2017). Bu adımda amaç uzman görüşü dikkate alınarak anlamlı sonuçlar çıkarmaktır (Ross, 2009). Son aşamada ise, bulanık olan değerlerin durulaştırılması yapılarak tekrardan gerçek sayısal verilere dönüştürülür (Ross, 2009; Jamshidi vd., 2013; Baral ve Aslan, 2018). Bulanık mantık sistemin çalışma prensibi Şekil 3.23'te gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Mamdani bulanık mantık sisteminin (M-BM) genel çalışma prensibi

Şekil 3.23'te sunulduğu gibi, başlangıçta girdiler, üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklaştırılır. Bu süreçte, her bir giriş değeri bir üyelik derecesine atanır ve sözsel bir yapıya dönüştürülür. Ardından, bu bilgiler, kural işleme birimine iletilmek üzere aktarılır. Daha sonra, seçilen çıkarım yöntemine göre kural tabanı kullanılarak çıkarım gerçekleştirilir. Kural işleme birimine gelen bilgiler, kural işleme biriminde depolanmış bir şekilde bulunan bilgi tabanına dayalı "*eğer – ise*", gibi kural işleme bilgileriyle birleştirilir. Son adımda, elde edilen sonuçlar, problemin yapısına uygun mantıksal karar önermeleri kullanılarak durulaştırma işlemine tabi tutulur (Erbaş, 2012). Durulaştırma aşamasında bulanık mantık sistemi tarafından üretilen belirsiz veya bulanık sonuçlar, kesin ve anlaşılabilir bir formata dönüştürülmüş olur (Zimmerman, 1990).

Zadeh'in bulanık mantık ilkeleri

Bulanık mantığın ilkeleri Zadeh tarafından şöyle belirtilmiştir (Elmas, 2007);

- Bulanık mantıkta kesin olan değerlerin yerine yaklaşık değerler kullanılır.
- Bulanık mantıkta bilgi; çok yüksek, yüksek, orta, düşük ve çok düşük gibi dilsel ifadeler ile gösterilir.
- Bulanık mantığın tüm değerleri (0-1) arasında bir üyelik derecesiyle temsil edilir.
- Mantıksal her ifade bulanık haldeki bir ifadeye dönüştürülebilir (Uğur, 2021).

Mamdani (Mamdani ve Assilian, 1975), Sugeno (Takagi ve Sugeno, 1985) ve Tsukamoto olmak üzere genel olarak üç tür bulanık algoritma mevcuttur (Arslan ve Zırhloğlu, 2021). Tez kapsamında kullanılan Mamdani yöntemi 1973 yılında Ebrahim Mamdani tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem, ilk kez bir buhar makinasının insan tecrübelerinden faydalanılarak sözel kontrol kurallarıyla kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır (Mamdani ve Assilian, 1975). Yöntemin temel amacı, bulanık girdi verileri ve belirli bir kural tabanı kullanarak doğru bulanık çıktıları elde etmek ve sonuçları anlamlı bir şekilde yorumlamaktır. Sözel bulanık yöntem olarak da ifade edilen Mamdani yöntemi nitel bilginin kullanılabilmesi için imkan tanımaktadır (İnel ve Armutlulu, 2016). Bu yöntem, uzman görüşüne dayanan, geniş bir uygulama alanına sahip ve her türlü problemin çözümünde kullanılabilir (Ayçin ve Özveri, 2015). Özellikle karmaşık, belirsizlik içeren sistemlerin modellemesinde ve kontrolünde oldukça etkilidir. Mamdani bulanık yöntemi, popüleritesi ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle en yaygın kullanılan çıkarım yöntemi olarak ifade edilmektedir (Nasr vd., 2012). Mamdani yönteminin avantajları modelin oluşturulmasının basit olması, sezgisel olması, yaygın kullanılması ve insan davranışına çok uygun olması olarak sıralanabilmektedir (Mamdani ve Assilian, 1975; Mamdani, 1977). Bu yüzden tez kapsamında çalışma alanının risk haritasını oluşturmak için Mamdani Bulanık Mantık yöntemi tercih edilmiştir.

3.2.8. Risk Analizi

Heyelan gibi doğal tehlikeler için risk analizleri yapılırken; (1) Risk seviyesi nedir? (2) Risk seviyesi tolere edilebilir mi? (3) Risk seviyesi tolere edilemezse ne yapılmalıdır? gibi sorular dikkatlice incelenmeli ve ona göre cevaplar verilmelidir (Ho vd., 2000). Risk

değerlendirilmesi yapılarak risk seviyesinin tolere edilebilir olup olmadığını incelenir, eğer tolere edilemez düzeyde ise, risk yönetimi için maliyet analizi yapılır ve gerekli görülen heyelan stabilizasyon çalışmalarıyla bölgenin risk seviyesi azaltılır ve güvenilirliği artırılır. Doğru ve özenle hazırlanmış bir risk yönetimi, genellikle doğal afetin birim zamanda meydana gelme olasılığını ve olayın sonuçlarının değerlendirilmesini içerir (Pan vd., 2021).

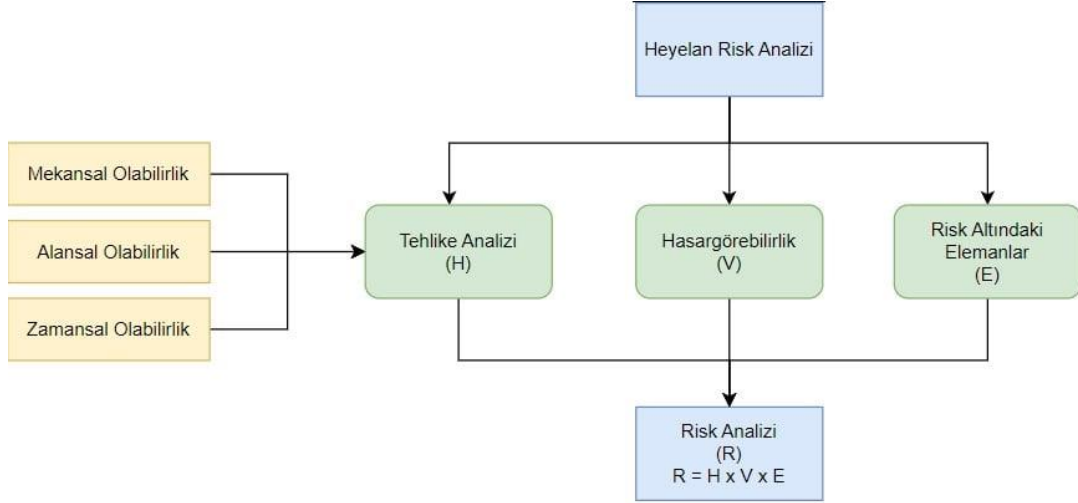
Heyelan riski, belirli bir alanda ve belirli bir zaman diliminde meydana gelebilecek bir heyelan olayı nedeniyle oluşacak en yüksek potansiyel kaybı ifade eder (Liu ve Miao, 2018). Heyelana karşı duyarlı olan bir sahasının risk durumu: tehlike durumu, risk altında bulunan elemanlar ve hasargörebilme derecesi dikkate alınarak eşitlik 3.24'e göre hesaplanır (Dikshit vd., 2020).

$$R = (H)x(E)x(V) \quad (3.24)$$

Burada R = risk, H = tehlike, E =Risk altında bulunan elemanlar ve V = hasargörebilme derecesini temsil etmektedir (Varnes, 1984; Fell, 1994; Segoni ve Caleca, 2021). Denklem ne kadar basit ve anlaşılması kolay görünse de; küçük ve iyi incelenmiş bir potansiyel heyelan sahası olmadığı sürece nicel olarak uygulanması çok kolay değildir. Bu yüzden, heyelana karşı duyarlı küçük bir sahada ayrıntılı incelemeler sonucunda nicel risk analizi yapmak çok daha kolaydır (Van Westen vd., 2006). Literatürde, nicel risk analizleri ağırlıklı olarak küçük alanlar için veya en fazla bölgesel ölçekli uygulamalar için değerlendirilmiştir (Fell vd., 2005; Lu vd., 2014; Guo vd., 2020). Çünkü, havza ölçeğinde nicel risk analizi, özellikle risk değerlendirmesinin ön aşamasında oldukça zor bir hedeftir (Pereira vd., 2020). Bu nedenle, risk değerlendirmesinin ön aşamasında, genellikle geniş bir alanı kapsayan ve muhtemelen zor bir araziye sahip bir saha da kapsamlı jeolojik ve hidrojeolojik modellerin eksikliği nedeniyle ayrıntılı bir araştırma yapılması oldukça güçtür (Pan vd., 2021). Bu yüzden, bu değerlendirmeler ve analizler yapılırken, risk yönetiminin daha hızlı yapılabilmesi için belirlenmesi daha kolay ve daha hızlı parametreleri olan basit bir nitel yaklaşım tercih edilmelidir.

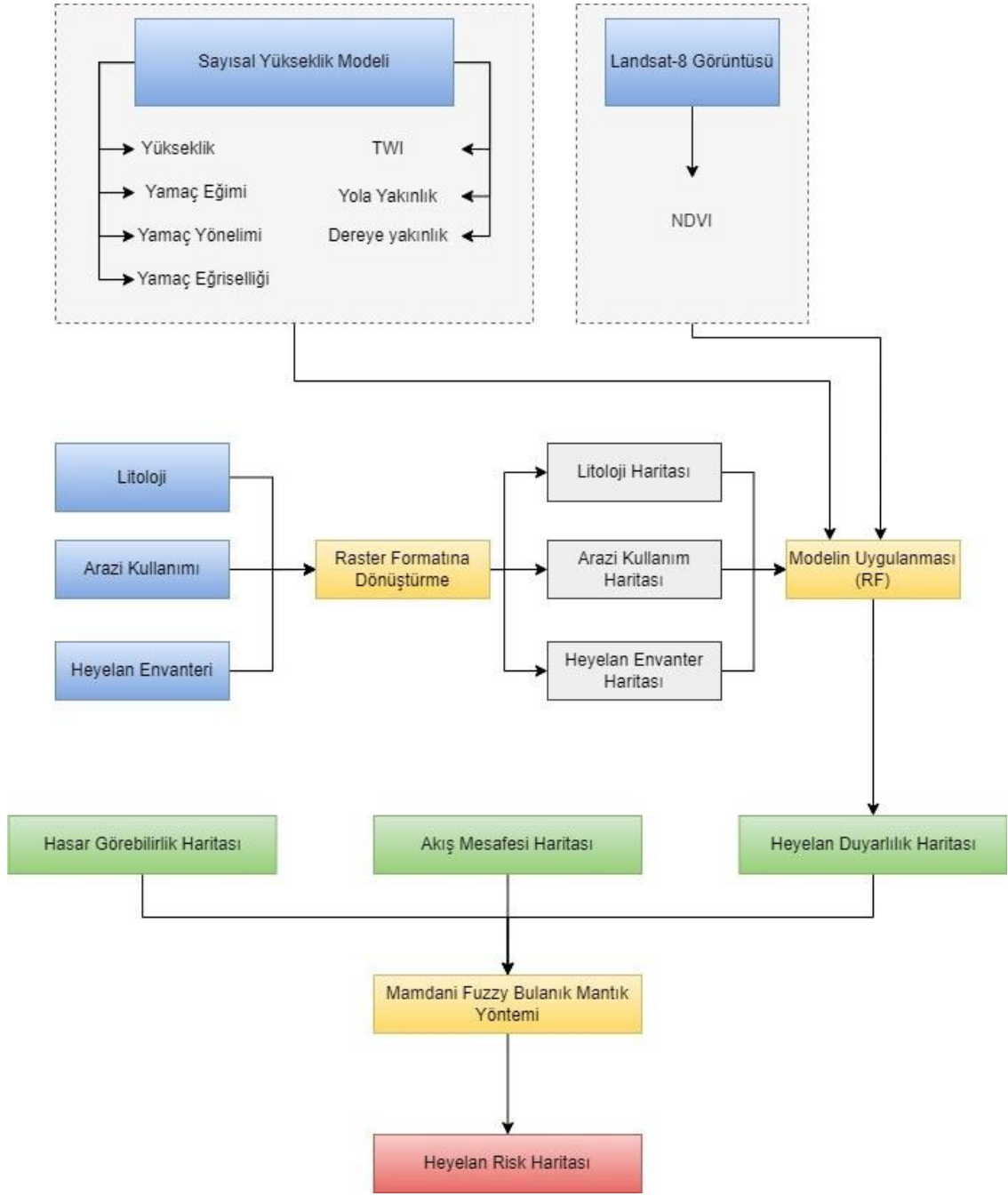
Çalışma kapsamında uygulanacak olan risk yönetimi çerçevesi, çok aşamalı SYM'ler, uydu görüntüleri ve bölgesel jeoloji haritaları dâhil olmak üzere yalnızca ön aşamada mevcut olan temel bilgileri gerektirir. Önerilen ilk çerçevede gerekli olan bilgiler (tehlike, hasargörebilirlik, risk altında bulunan elemanlar) hızlı bir şekilde elde edilebilmekte ve

değerlendirmenin her bir bileşeni nitel olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 3.24). Tehlike derecesi (H), maruziyet derecesi (E) ve hasargörme derecesi (V)'nin belirlenmesinden sonra, risk (R), CBS ortamında eşitlik 3.24 kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen heyelan risk haritası sırasıyla çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.24. Heyelana risk haritasının hazırlanmasında kullanılan parametreler

Önerilen ikinci çerçevede ise girdi parametreleri olarak heyelan duyarlılık, hasargörebilirlik ve heyelan yayılma alanı değerleri ile Mamdani-Bulanık Mantık Yöntemi kullanılarak çalışma alanına ait ikinci bir risk haritası üretilip hem 0-1 arasında hemde çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde sınıflandırılmıştır (Şekil 3.25).



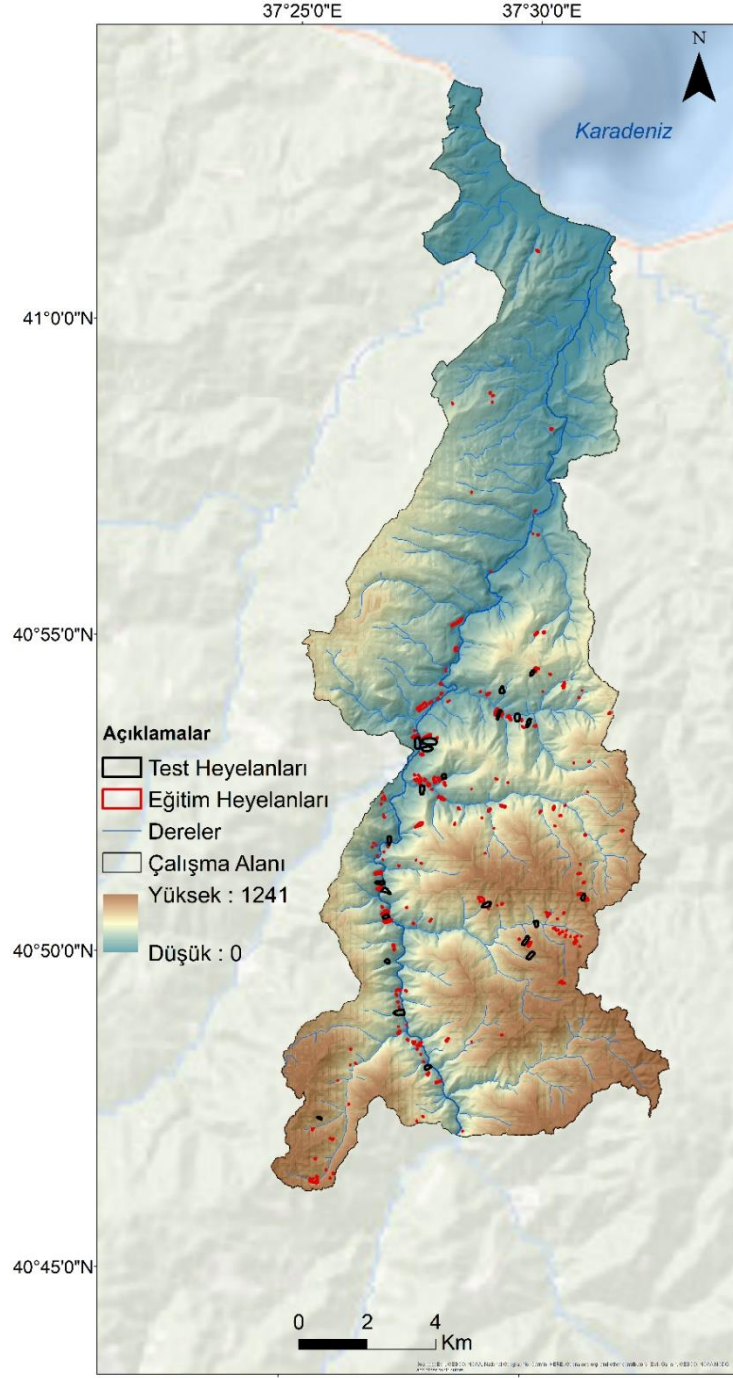
Şekil 3.25. Mamdani-Bulanık mantık yöntemi kullanılarak üretilen heyelan risk haritasının hazırlanmasında kullanılan parametreler

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Heyelan Envanteri

Doğru ve güvenilir heyelan envanterinin ve heyelan oluşumunda etkili olan faktörlere ilişkin veri tabanının üretilmesi, heyelan duyarlılık, tehlike ve risk analizlerinin en kritik aşamasını temsil etmektedir. Elde edilen haritaları doğruluğunun yüksek olmasında, kullanılan verinin kalitesi önemli bir rol oynamaktadır. Heyelan envanter haritaları daha önce oluşmuş heyelanların derlenmesi, arazi çalışmaları, hava fotoğrafı ve uydu görüntülerinin incelenmesiyle yapılabilmektedir. Çalışma alanının kapsamlı heyelan envanter haritası, yüksek çözünürlüklü Google Earth görüntüleri ve uydu görüntüleri gibi uzaktan algılama teknikleri ile kapsamlı saha gözlemleri neticesinde oluşturulmuş olup 10742 piksel içeren toplam 231 tane heyelan tespit edilerek ArcGIS 10.4.1 programıyla sayısallaştırılmış ve daha sonra 10x10m grid hücre formatına dönüştürülmüştür (Şekil 4.1).

İnceleme bölgesinde meydana gelmiş olan heyelanlar daha çok sığ heyelanlar olup genel olarak bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik yapısından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.2). Envanter haritası üzerindeki heyelanların dağılımları dikkate alındığında; heyelanlar mekânsal olarak Bolaman Çayı kanalı boyunca yer almaktadır (Şekil 4.1). Heyelanların %80.3'ü Çağlayan Formasyonu üzerinde, %11.9'u Fatsa Formasyonu üzerinde, geriye kalan %7.8'lik kısım ise diğer formasyonlar üzerinde bulunmaktadır. Ayrıca, havzada bulunan heyelanların %73.8'i tarım alanlarında, %24.7'si orman alanlarında meydana gelmiştir. Çalışma alanında gelişen heyelanlarda meteorolojik etkenlerde önemli rol oynamaktadır. Özellikle bölgede gerçekleşen aşırı yağışlardan sonra heyelanların çoğu ayrışmış zonlarda dairesel yenilmeler şeklinde meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.3). Çalışma alanında genel olarak yüzeysel heyelanlar tespit edilmiş olup en büyük heyelanın alanı 0.063501 km², en küçük heyelanın alanı ise 0.000036 km² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Çalışma alanının heyelan envanter haritası



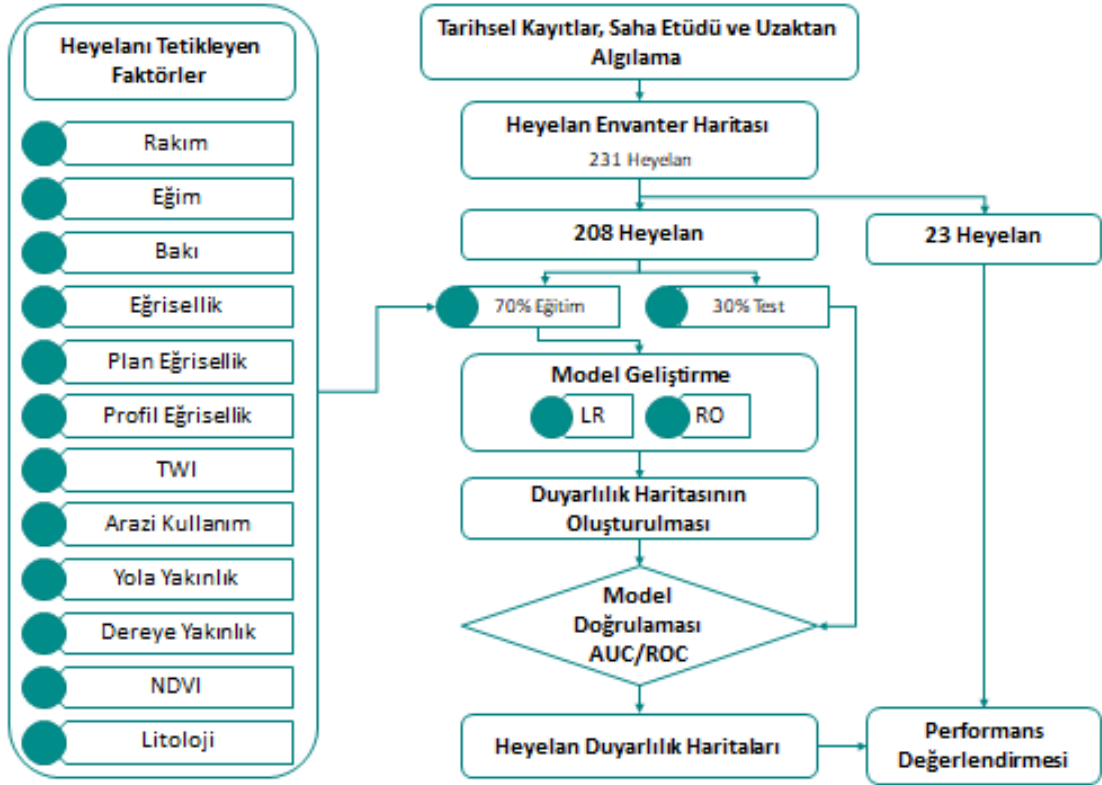
Şekil 4.2. Çalışma alanında gözlenen heyelanlardan bazı görüntüler



Şekil 4.3. Çalışma alanında ayrışma zonunda meydana gelmiş olan heyelan

4.2. Heyelan Duyarlılık Çalışmaları

Heyelan duyarlılık analizi, heyelanların mekansal dağılımına ve heyelan oluşumunu etkileyen faktörlere dayalı olarak heyelana karşı duyarlı alanları tahmin etmeyi amaçlar. Heyelan duyarlılık haritaları, heyelan tehlikesini azaltmak ve hatta gelecekte meydana gelebilecek tehlikelerden kaçınmak için heyelana karşı eğilimli alanlar için bir kılavuz olması bakımından oldukça önemlidir (Wu vd., 2016). Duyarlılık haritalarının güvenilirliği; yeterli ve doğru veriye; ayrıca analizlerde uygulanacak modellerin iyi seçilmesine bağlı olarak değişmektedir (Tekin, 2019). Bu çalışmada Lojistik Regresyon ve Rasgele Orman yöntemleri ile 10 x 10 haritalama ünitesi kullanılarak duyarlılık haritaları üretilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.4).



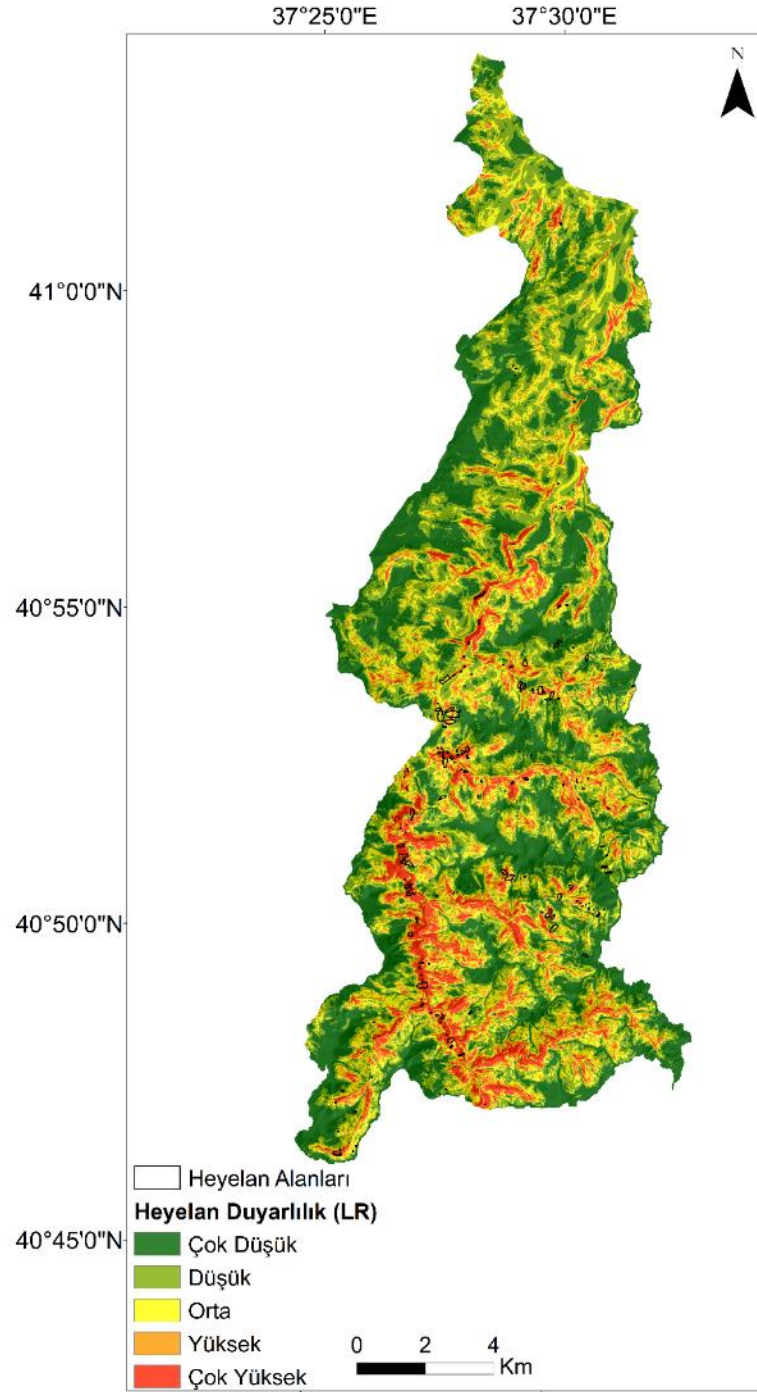
Şekil 4.4. Lojistik Regresyon ve rastgele orman modellerinin oluşum şeması

4.2.1. Lojistik Regresyon Yöntemi

Tez çalışması kapsamında heyelan duyarlılık analizleri ilk olarak lojistik regresyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Heyelan duyarlılık analizlerinin LR yöntemiyle değerlendirilmesi için, ArcGIS 10.4.1 yazılımı, SPSS paket programı, GDAL library in Python, ve Jupyter Notebook library in Anaconda Navigator kullanılmıştır. Lojistik regresyon analizlerinde, 12 adet bağımsız değişken (yükseklik, yamaç eğimi, yamaç yönelimi, yamaç eğriselliği, plan eğriselliği, profil eğriselliği, topografik nemlilik indeksi (TNİ), dere ve yola yakınlık, jeoloji, arazi kullanım durumu ve normalize edilmiş bitki fark indeksi (NDVI) ve bağımlı değişken olarak 208 adet heyelan kullanılmıştır. Analizde kullanılacak olan bağımlı ve bağımsız değişkenler ArcGIS 10.4.1 yazılımı kullanılarak raster formatında hazırlanmıştır. Hazırlanan veri matrisinde Bolaman Çayı alt havzası toplam 1892032 piksel, heyelan envanteri ise 5390 (208 heyelan) piksel ile temsil edilmektedir.

Modeli çalıştırmak için rastgele özellik seçim yöntemi ile heyelansız alanlardan heyelanlı piksel sayısının iki katı kadar örnek seçilerek eğitim ve test veri setleri hazırlanmıştır. Modelin eğitim aşamasında kullanılan eğitim veri seti, modelin tahmin hatasını en aza

indirmek ve doğru tahmin yapabilme kabiliyetini artırmak amacıyla oluşturulmuştur. Test veri seti ise model eğitilirken değerlendirilmeye alınmayıp öğrenme işlemi tamamlandıktan sonra, modelin daha önce görmediği yeni verilerin modelin sonuçlarının tahminindeki başarısını test etmek için kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında 10742 heyelanlı pikselin 5352 pikseli (siyah ile gösterilen 23 büyük heyelan) duyarlılık haritalarının performansını değerlendirmek için hiç işleme katılmadan veri setinden ayrılmıştır (Şekil 4.1). Daha sonra geriye kalan 5390 pikselin (kırmızı ile gösterilen 208 heyelan) %70' i (3773) eğitim veri seti, kalan %30'u (1617) ise test veri seti olarak ayrılmış ve LR metodu ile görüntüler sınıflandırılmıştır (Şekil 4.1). Son olarak LR modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası ArcGIS 10.4.1 yazılımı kullanılarak çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfa bölünmüştür (Şekil 4.5). Heyelan envanter haritası, üretilen heyelan duyarlılık haritası ile karşılaştırıldığında mevcut heyelanların %37.9'u çok düşük, %27.6'sı düşük, %17.4'ü orta, %17.1'i yüksek ve çok yüksek sınıf içerisinde yer almaktadır (Tablo 4.1).

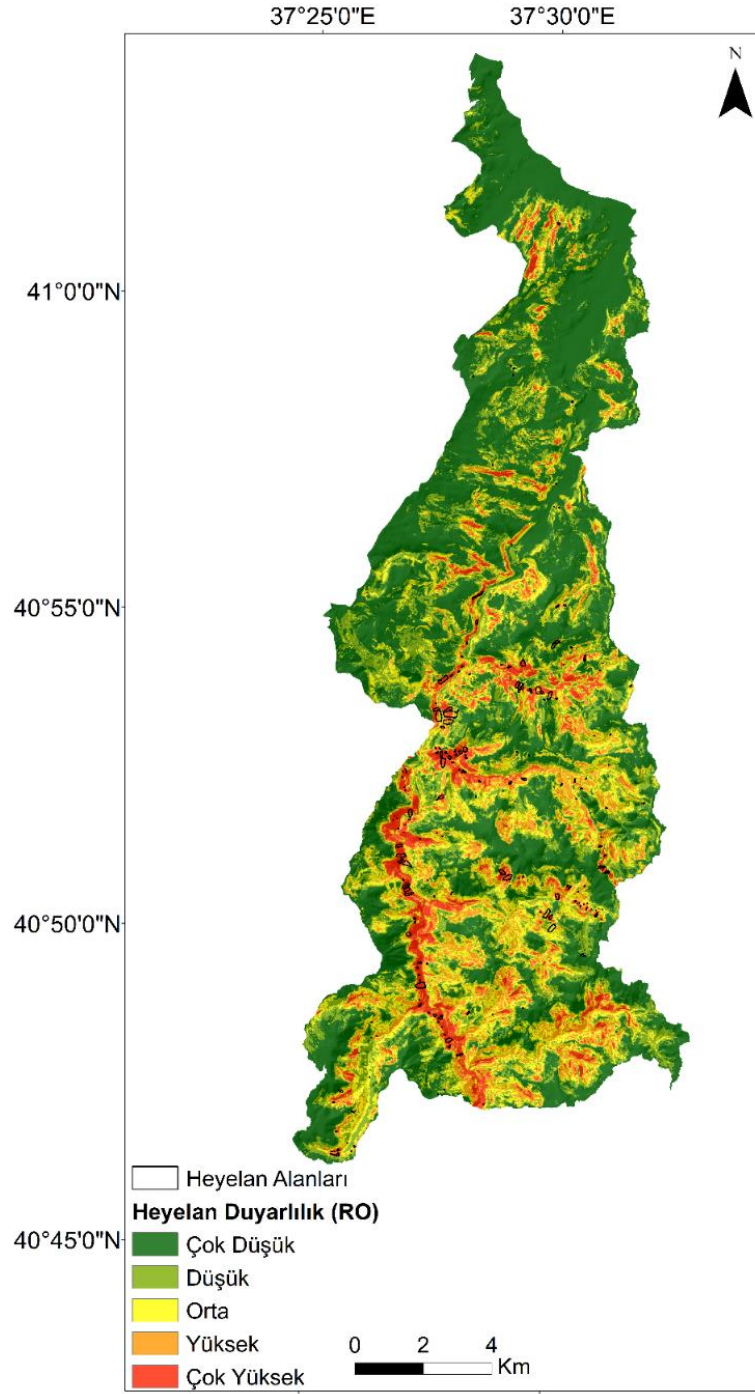


Şekil 4.5. Çalışma alanının lojistik regresyon modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası

4.2.2. Rastgele Orman (Random Forest) Yöntemi

Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde oldukça başarılı sonuçlar veren rastgele orman yöntemi özellikle son zamanlarda oldukça yaygın kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Gupta vd., 2015; Youssef vd., 2015a; Arabameri vd., 2019; Dang vd., 2020).

Tez çalışması kapsamında heyelan değerlendirmelerinin RO yöntemiyle gerçekleştirilebilmesi için, ArcGIS 10.4.1 yazılımı, GDAL library in Python ve Jupyter Notebook library in Anaconda Navigator kullanılmıştır. Rastgele Orman metodu içerisinde toplam 208 adet heyelan bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, tez çalışması kapsamında elde edilmiş olan yükseklik, yamaç eğimi, yamaç yönelimi, yamaç eğriliği, topografik nemlilik indeksi (TNİ), drenaj ağlarına ve yola yakınlık, jeoloji, arazi kullanım durumu ve normalize edilmiş bitki fark indeksi (NDVI) olmak üzere toplam 12 adet bağımsız değişken dikkate alınmıştır. Analizde kullanılacak olan bağımlı ve bağımsız değişkenler ArcGIS 10.4.1 yazılımı kullanılarak raster formatında hazırlanmıştır. Lojistik regresyonda olduğu gibi 5352 (23 adet büyük heyelan) piksel daha sonra duyarlılık haritalarının performans değerlendirmesini yapmak için ayrılmıştır. Sonrasında, geriye kalan toplam 5390 (208 adet heyelan) adet heyelanlı pikselin iki katı kadar heyelansız piksel rastgele özellik seçim metodu kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Rastgele seçilen 5390 pikselin yine %70' i eğitim veri seti, kalan %30'u ise test veri seti olarak ayrılmış ve RO metodu ile görüntüler sınıflandırılmıştır. Son olarak RO modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası ArcGIS 10.4.1 yazılımı kullanılarak çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır (Şekil 4.6). Heyelan envanter haritası, üretilen heyelan duyarlılık haritası ile karşılaştırıldığında mevcut heyelanların %46.3'ü çok düşük, %22'si düşük, %15.7'si orta, %16'sı yüksek ve çok yüksek sınıf içerisinde yer almaktadır (Tablo 4.1).



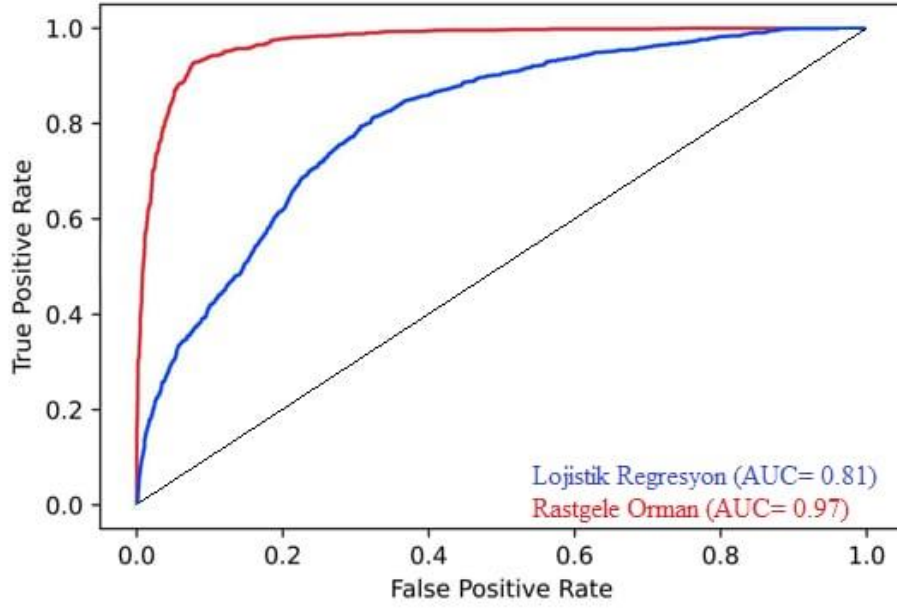
Şekil 4.6. Çalışma alanının rastgele orman modeli ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası

Tablo 4.1. Lojistik regresyon rastgele orman modellerine dayalı farklı heyelan duyarlılık sınıfları altında heyelanlı piksel sayısı ve alan oranları

Heyelan Duyarlılık Sınıfları	RO Modeli		LR Modeli	
	Heyelanlı Piksel	Alan %	Heyelanlı Piksel	Alan %
Çok Düşük	876176	46.3	718275	37.9
Düşük	415623	22	522672	27.6
Orta	297864	15.7	329679	17.4
Yüksek	202820	10.7	201896	10.7
Çok Yüksek	100895	5.3	120856	6.4

4.2.3. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Performans Değerlendirmeleri

Heyelan duyarlılık haritalarının doğrulanması duyarlılık analizlerinde en önemli görevlerden biri olarak görülmektedir. Çünkü doğrulama olmadan tahmin edilen modelin akademik bir önemi olmayacaktır. Bu nedenle, üretilen duyarlılık modellerinin doğrulanması esastır (Wu vd., 2016). Bu çalışmada, LR ve RO heyelan duyarlılık modellerinin doğruluklarının tahmin edilmesi ve karşılaştırılması amacıyla ilk olarak işlem karakteristik eğrisi (ROC) altındaki alan (AUC) eğrisi kullanılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının ROC değerlendirmesinden elde edilen AUC değeri lojistik regresyon için 0.81; rastgele orman yöntemi için ise 0.97 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler modellerin başarılı olduğunu ve heyelanlı bir pikselin heyelansız bir piksele göre ileride heyelana maruz kalabilme olasılığının LR için %81; RO için ise %97 olduğunu ifade etmektedir (Şekil 4.7). Ayrıca heyelan modelinin doğruluğunu test etmek için istatistiksel metriklerde hesaplanmıştır (Tablo 4.2). Lojistik regresyon için duyarlılık değeri %87, özgüllük değeri %47, kesinlik değeri % 77.3 ve doğruluk değeri %74 olarak hesaplanmıştır. Rastgele orman için ise duyarlılık değeri % 91.5, özgüllük değeri %92.3, kesinlik değeri %96.1 ve doğruluk değeri %91.7 olarak bulunmuştur. İki yöntem performans olarak karşılaştırıldığında RO yönteminin performansının LR yöntemine göre daha yüksek sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 4.7. Lojistik regresyon ve rastgele orman modeline ait roc grafiği

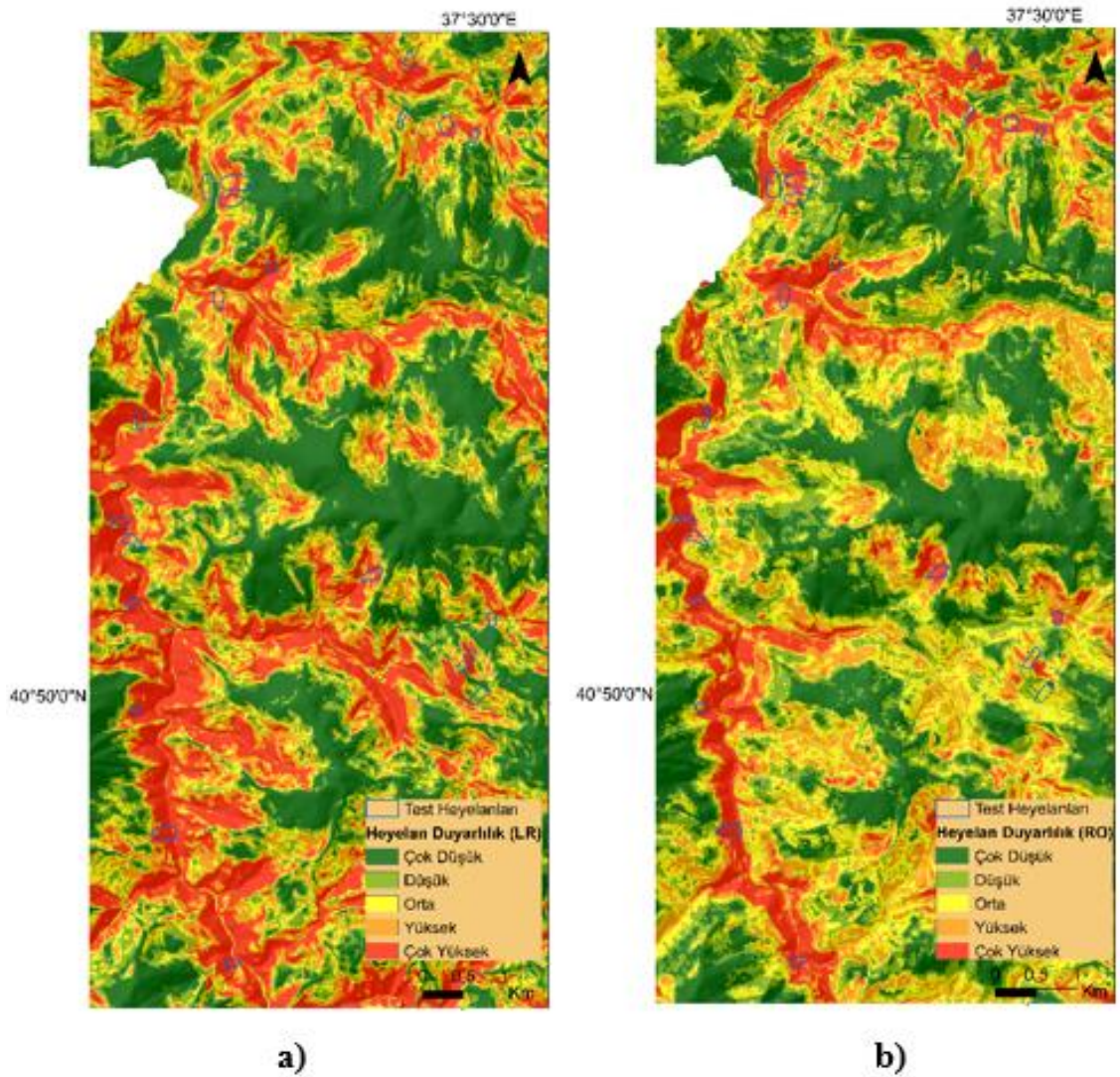
Tablo 4.2. Rastgele orman ve lojistik regresyon modeli için istatistiksel metrikler

İstatistiksel Metrikler	RO Modeli	LR Modeli
TP	2995	2850
TN	1455	740
FP	121	836
FN	280	425
AUC	0.97	0.81
Duyarlılık (%)	91.5%	87%
Özgüllük (%)	92.3%	47%
Kesinlik (%)	96.1%	77.3%
Doğruluk (%)	91.7%	74%

ROC eğrisine ek olarak, elde edilen duyarlılık haritalarını genel doğruluk kriterine göre doğrulamak için modellemede kullanılmayan 23 heyelan (5352 piksel), iki heyelan duyarlılık haritası ile karşılaştırılarak beş farklı duyarlılık sınıfının her birine düşen mevcut heyelan piksellerinin sayısı belirlenmiştir. Sadece doğrulama analizinde kullanılan 23 büyük heyelan ile yapılan doğruluk analizleri sonucunda lojistik regresyon için heyelanları %73'ü, rastgele orman yöntemi için ise heyelanların %89.4'ü orta, yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarına denk geldiği görülmüştür (Tablo 4.3). Yapılan doğrulama analizleri sonucunda iki model tarafından üretilen haritaların iyi bir tahmin doğruluğuna sahip olduğu ve heyelan duyarlılığını değerlendirmek için iki heyelan modeli yaklaşımının kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir. LR ve RO haritalarındaki mavi heyelan poligonları, nihai doğrulama için kullanılan heyelan envanterini temsil etmektedir (Şekil 4.8 a-b).

Tablo 4.3. Rastgele orman ve lojistik regresyon modeline dayalı farklı heyelan duyarlılık sınıfları altında genel doğruluk kriter yönteminin sonucu

Heyelan Duyarlılık Sınıfları	RO Modeli		LR Modeli	
	Heyelanlı Piksel Sayısı (23)	Alan %	Heyelanlı Piksel Sayısı (23)	Alan %
Çok Düşük	118	2.3	332	6.4
Düşük	434	8.3	1077	20.6
Orta	870	16.7	1214	23.3
Yüksek	1041	20	1355	26
Çok Yüksek	2749	52.7	1234	23.7



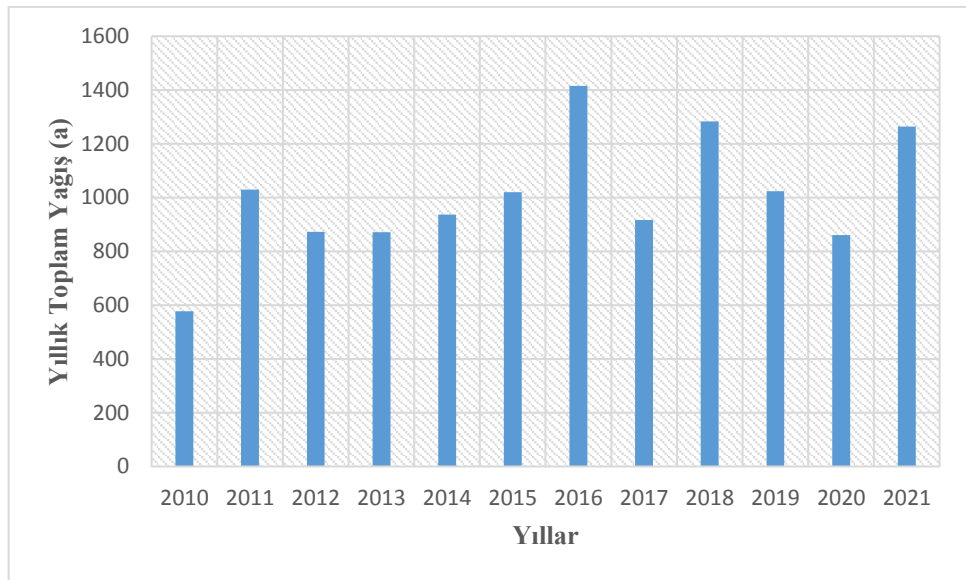
Şekil 4.8. Duyarlılık haritalarının bir kısmı (a) lojistik regresyon (b) rastgele orman

4.3. Zamansal Olabilirlik

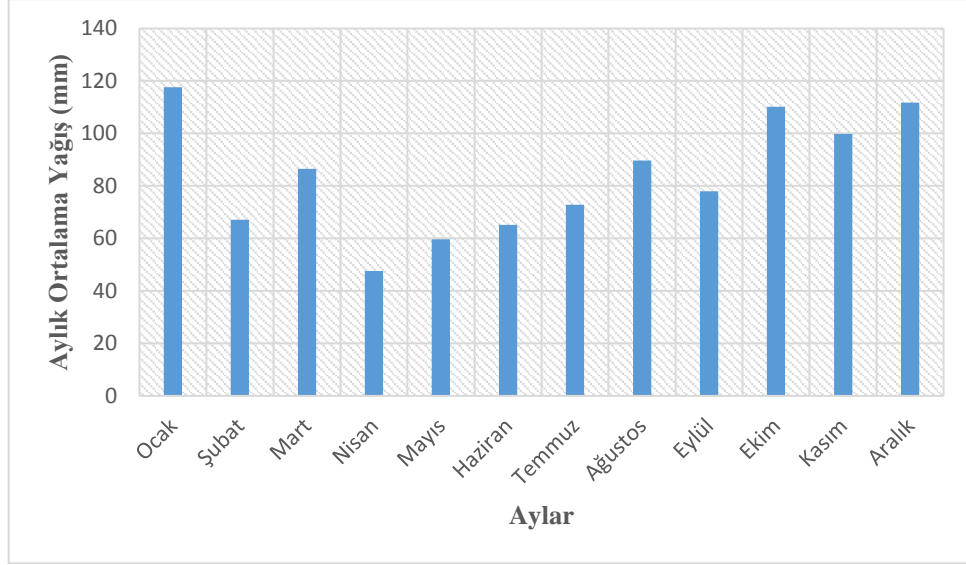
Heyelanların zamansal olarak tekrarlanma periyotları iki yaklaşım ile elde edilmektedir. Bunlardan ilki, yağış, hızlı kar erimeleri ve deprem gibi tetikleyici faktörlerin uzun yıllar

frekans-büyüklik ilişkilerinin belirlenmesi ile hesaplanırken; ikinci yaklaşım ise, çok zamanlı heyelan envanterinin oluşturulması ile hesaplanmaktadır. Karadeniz bölgesinde bulunan çalışma alanının iklim koşullarından ve topoğrafik yapısından ötürü meydana gelen heyelan olayları daha çok aşırı yağışlar ve ani kar erimeleri ile tetiklemektedir. Bu sebeple, tez çalışması kapsamında yağış verileri kullanılarak materyal ve metod bölümünde açıklanan heyelan zamansal olasılık değerleri sürekli ve kesikli olasılık fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Bolaman havzası içerisinde bulunan Fatsa istasyonunun uzun yıllara ait günlük yağış verileri temin edilmiş ve bu veriler detaylı bir şekilde incelenerek istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen Fatsa istasyonu 2010 Ocak-2021 Aralık ayları arasındaki günlük yağış verilerine göre, bölgede 1414.8 mm ile en yüksek yıllık toplam yağış 2016 yılında; en düşük yıllık toplam yağış ise 577.8 mm ile 2010 yılında gerçekleşmiştir (Şekil 4.9). Fatsa istasyonunun 2010-2022 yılları arasında aylara göre yağış verilerinin dağılımı incelendiğinde en yağışlı geçen ayların Ocak, Ekim, Kasım ve Aralık ayları olduğu gözlemlenmiştir. Bu yıllar arasındaki en fazla ortalama yağış 118 mm ile Ocak ayına aittir (Şekil 4.10).

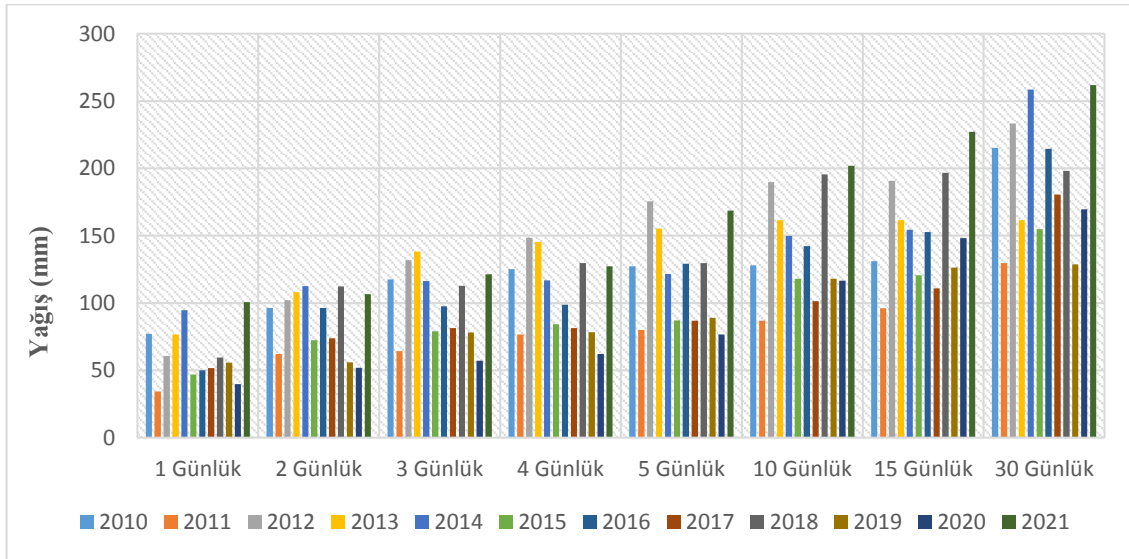


Şekil 4.9. Fatsa istasyonu yıllık toplam yağış değerleri

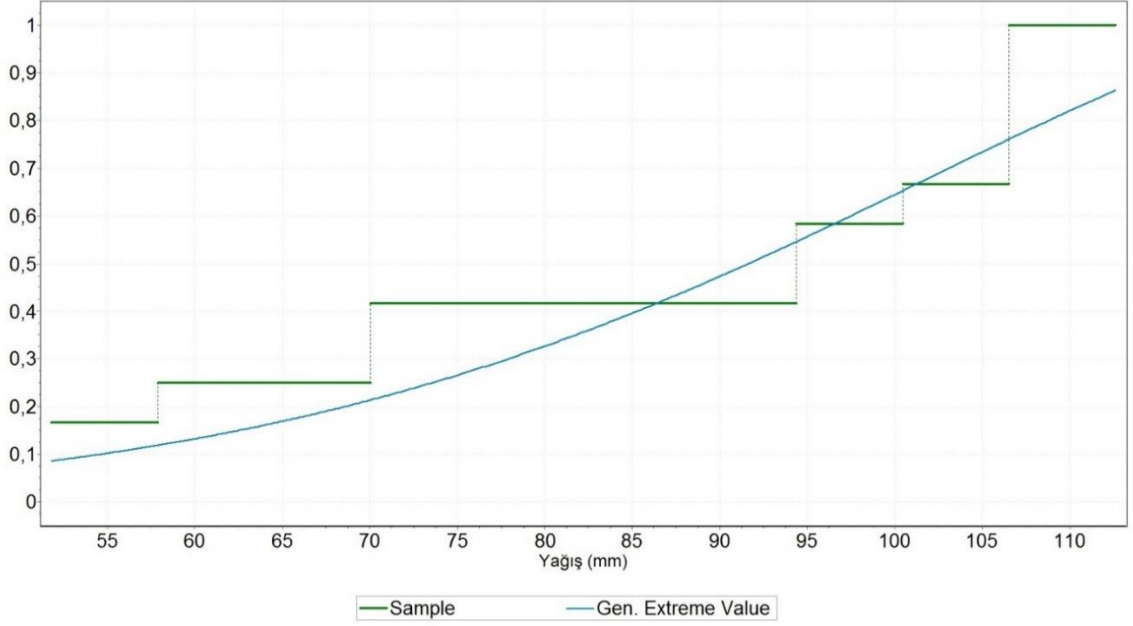


Şekil 4.10. Fatsa istasyonu aylık ortalama yağış değerleri

Yağmurla tetiklenen heyelan vakalarının oluşum zamanından önce meydana gelen yağışların göz önünde bulundurulması gerektiğinden dolayı, Fatsa istasyonunun 2010-2022 yıllarını kapsayan günlük yağış verileri için 1,2, 3, 4, 5,10,15 ve 30 günlük ekstrem yağışlar hesaplanmıştır (Şekil 4.11). Ordu ilinde meydana gelen heyelanlar daha çok 2 gün üst üste yağın yağışlar sonucunda olduğundan dolayı bu yıllar arasındaki 2 günlük maksimum yağış verileri değerlendirilmiş, 2 günlük maksimum yağış verilerinin hangi dağılıma uygun olup olmadığı incelenmiş ve sürekli kuvvet yasasına göre kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) hesaplanmıştır (Şekil 4.12).



Şekil 4.11. Fatsa istasyonu 2010-2022 yılları günlük maksimum yağış değerleri



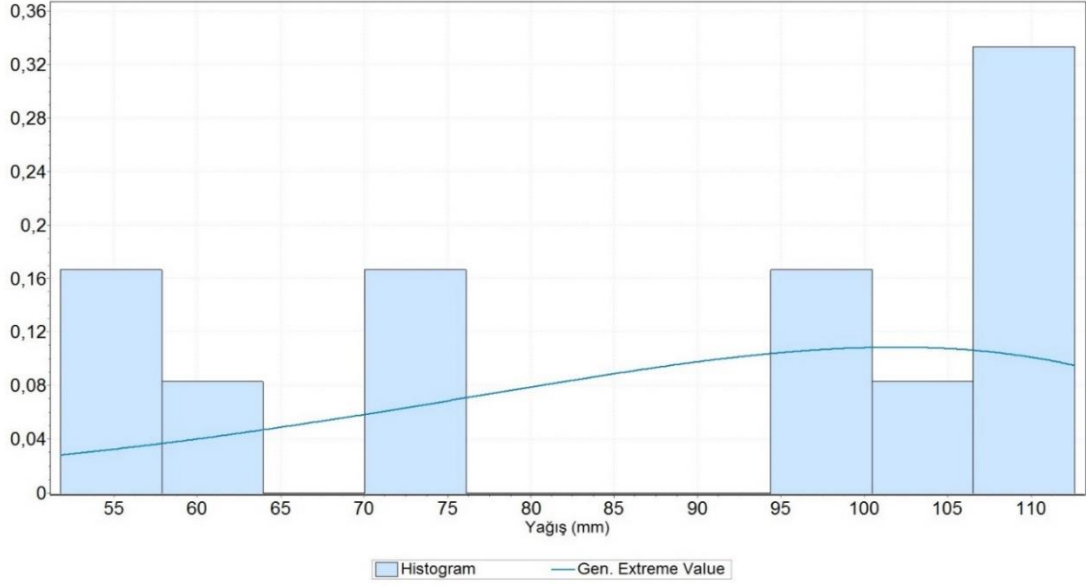
Şekil 4.12. İki günlük maksimum yağış verilerinin kümülatif dağılım fonksiyonu

Belirlenen günlük yağış değerleri için uygunluk testlerinden, Kolmogorov-Smirnov testi ile hangi dağılımın daha uygun olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.4). 2 günlük maksimum yağış verileri için en uygun sonucu Genelleştirilmiş Uç Değer dağılımı vermiştir (Şekil 4.13).

Tablo 4.4. Kolmogorov-Smirnov testine göre en uygun yoğunluk fonksiyonu

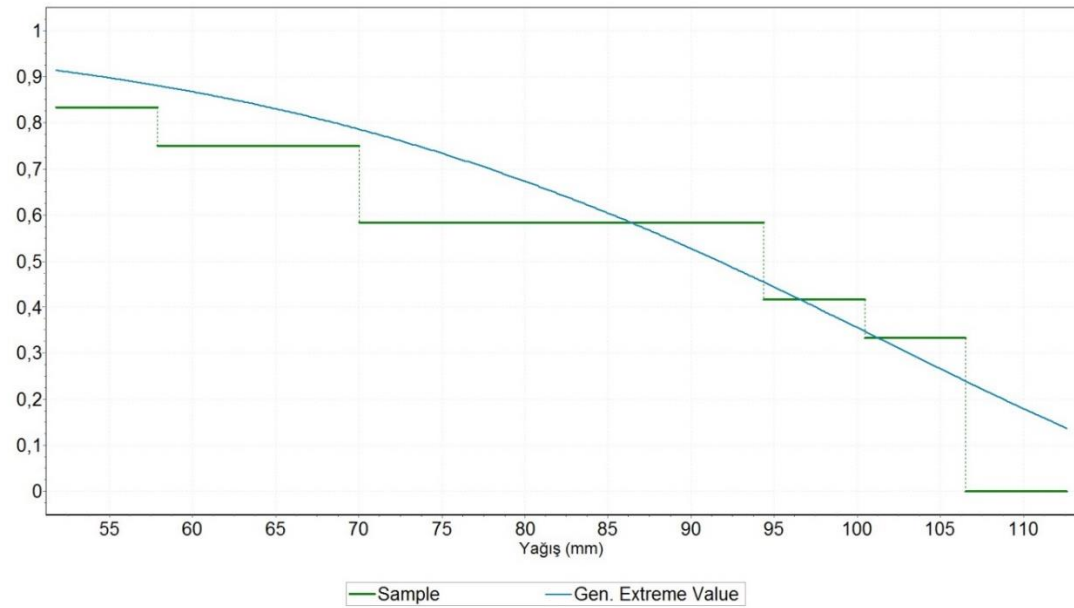
Veri sayısı	6				
D-istatistiği	0.16441 (Genelleştirilmiş Uç Değer)				
Olasılık Değeri	0.85085 (Genelleştirilmiş Uç Değer)				
Aşılma Olasılığı	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Kritik Değer	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905
H-hipotezi	Kabul	Kabul	Kabul	Kabul	Kabul

En uygun dağılım modeli olarak bulunan Genelleştirilmiş Uç Değer dağılımına ait istatistiksel sonuçlar; $k=-0.61191$; $\sigma=26.237$; $\mu=83.027$ şeklinde tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. İki günlük maksimum yağış verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Bölgede 2 günlük en yüksek yağış miktarının aritmetik ortalaması yaklaşık 86 mm olmasından dolayı 86 mm'den büyük yağışların olma olasılıkları ve tekrarlanma periyodları hesaplanmıştır. 86 mm'den büyük yağışların olma olasılıkları 0,58902, kümülatif 2 günlük toplam 86 mm'lik yağışın tekrarlanma periyodu ise 2 yıl olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.14). Daha sonra hesaplanan tekrarlanma periyoduna göre Poisson dağılımı kullanılarak heyelan olaylarının 1, 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yılda en az bir kez oluşması için aşılma olasılıkları hesaplanmıştır (Çizelge 4.1).



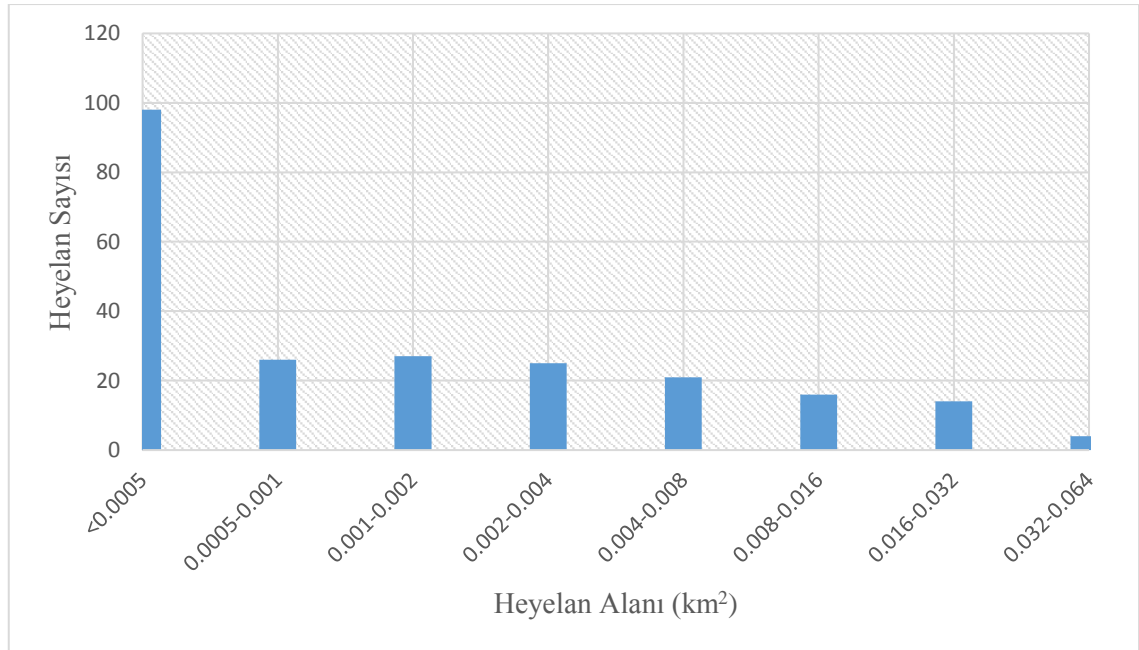
Şekil 4.14. İki günlük maksimum yağış verilerinin yaşam fonksiyon eğrileri

Çizelge 4.1. Poisson dağılımına göre 1, 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yılda heyelanların gerçekleşme olasılıkları

Yıl	Tekerrür	Aşılma Olasılığı
1	2	0.445
2	2	0.692
5	2	0.947
10	2	0.997
25	2	1
50	2	1
100	2	1

4.4. Alansal Olabilirlik

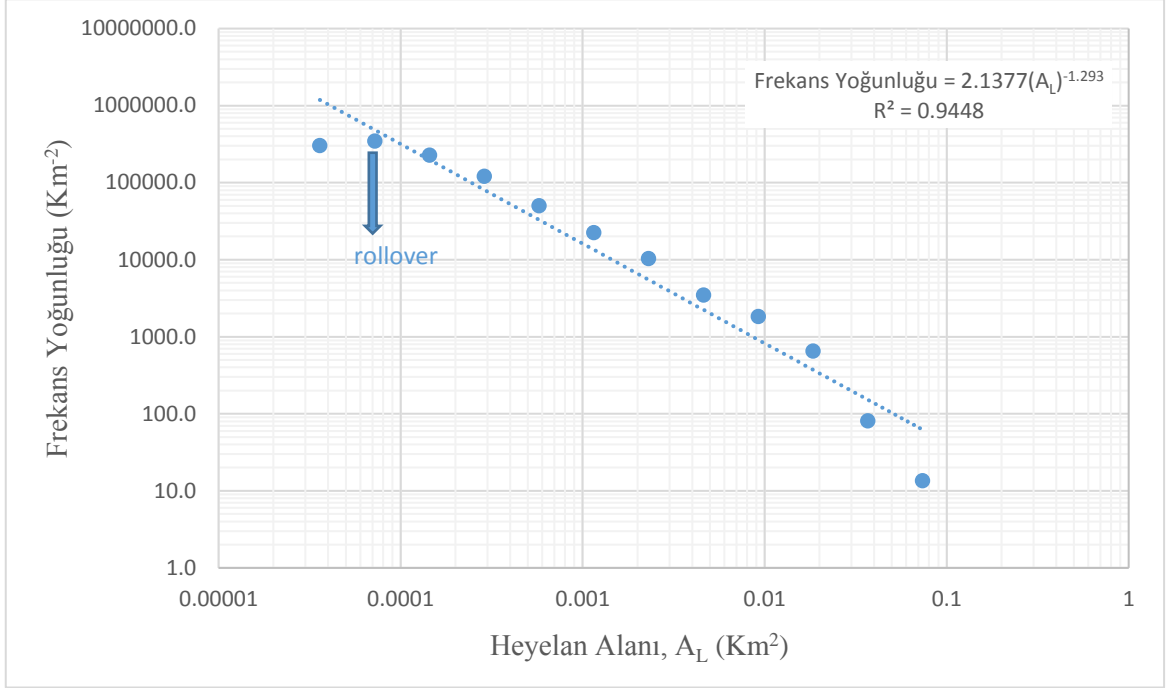
Tez kapsamında çalışma alanında mekânsal olarak yerleri tespit edilmiş ve haritalanmış toplam 231 adet heyelan bulunmaktadır. En küçük heyelan alanı 0,000036 km², en büyük heyelan alanı 0,063501 km², ortalama alan değeri 4151,4 km² ve standart sapma değeri 8231 km² olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.15).



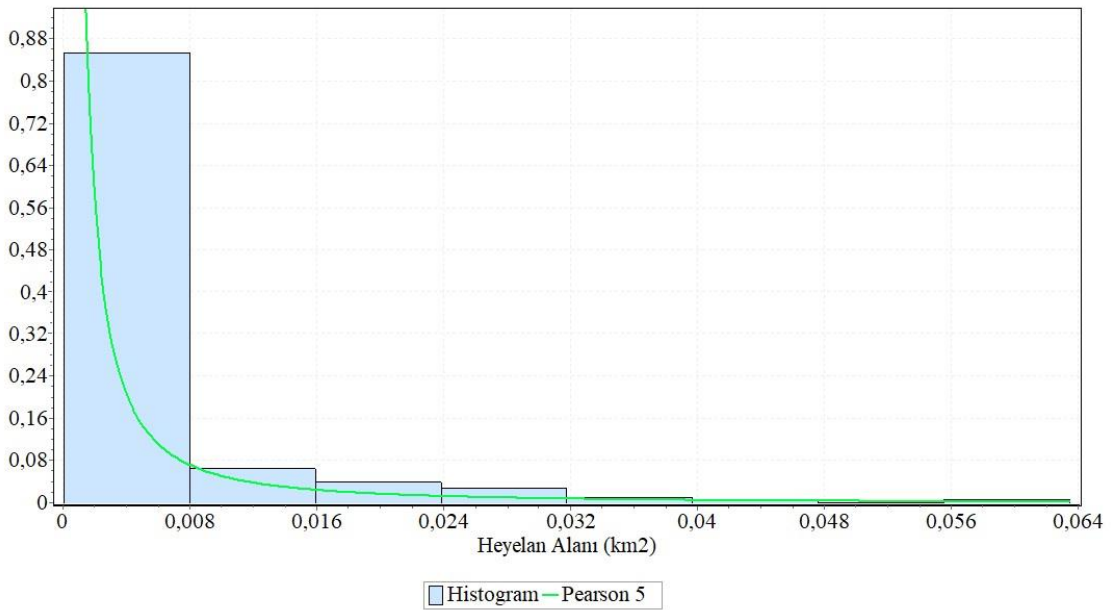
Şekil 4.15. Çalışma alanına ait heyelan alansal dağılımları

Çalışma alanı içinde yer alan 231 adet heyelan kullanılarak heyelan alansal büyüklüğü ile frekans yoğunluk değerleri hesaplanmış ve grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.16). Frekans yoğunluk grafiğine göre rollover değeri yaklaşık olarak 0.00007 km² olarak belirlenmiştir. Daha sonra Easyfit 5.6 paket programı kullanılarak heyelan alanlarının Pearson 5 dağılımına göre olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplanmıştır (Şekil 4.17). Dağılım parametreleri çalışma alanı için $\alpha = 0.5485$ km², $\beta = 1.6695E-4$ km² olarak tespit

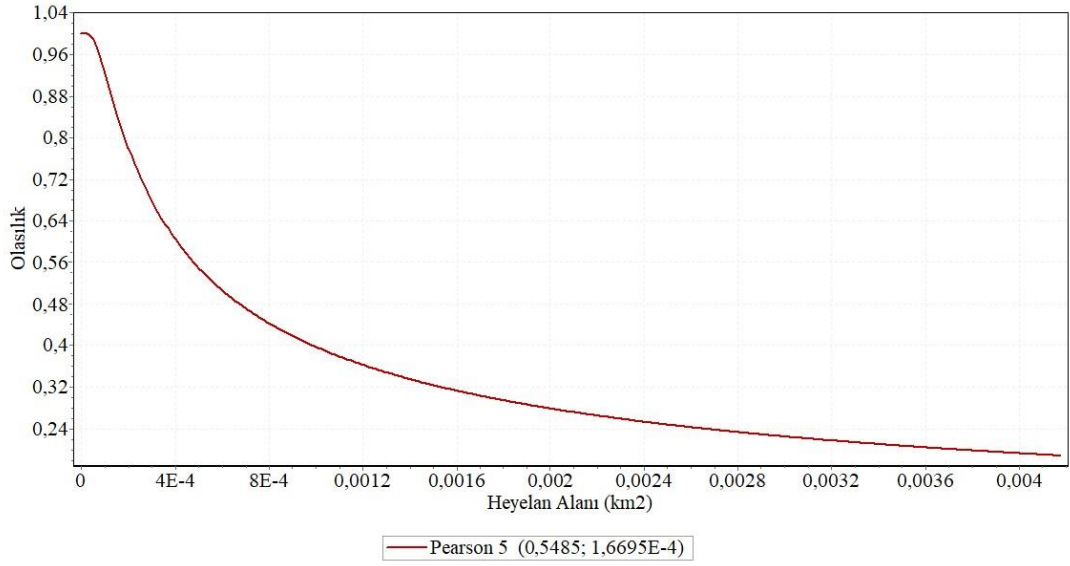
edilmiştir (Şekil 4.18). Hesaplanan olasılık yoğunluk fonksiyonu dikkate alınarak çalışma bölgesinde belirli bir büyüklükten daha büyük heyelanların meydana gelmesi için yine Easyfit 5.6 programı kullanılarak aşılma olasılıkları hesaplanmıştır. Çalışma alanı için 0.00007 km², 0.0003 km² ve 0.002 km²'den büyük bir heyelanın meydana gelme olasılığı sırasıyla 0.96, 0.68, 0.28 olarak bulunmuştur (Şekil 4.19).



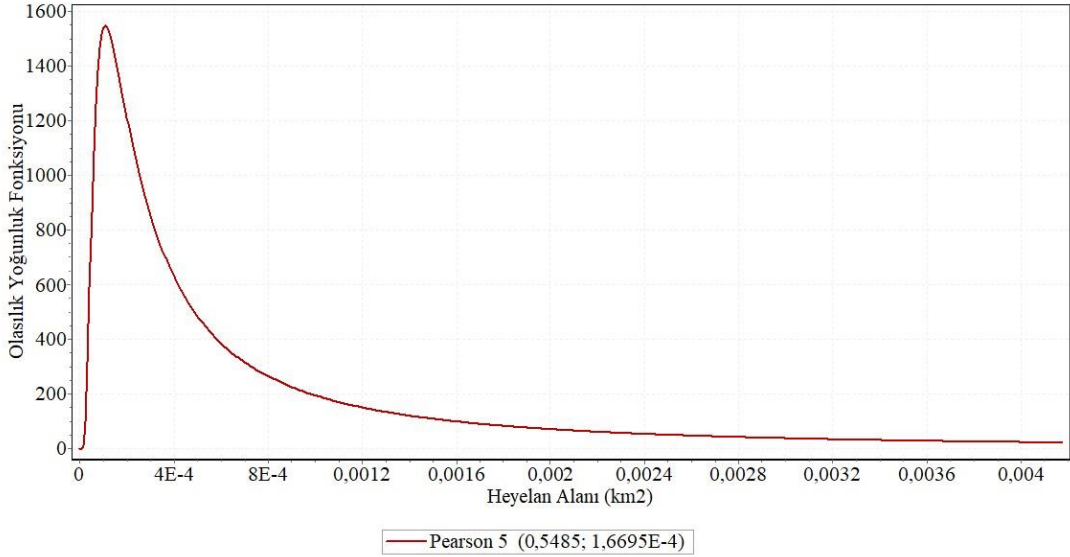
Şekil 4.16. Çalışma alanına ait heyelan alanı-frekans yoğunluğu grafiği



Şekil 4.17. Çalışma alanına ait heyelan envanter verilerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 4.18. Çalışma alanına ait heyelan envanterine uygun olasılık yoğunluk fonksiyonu

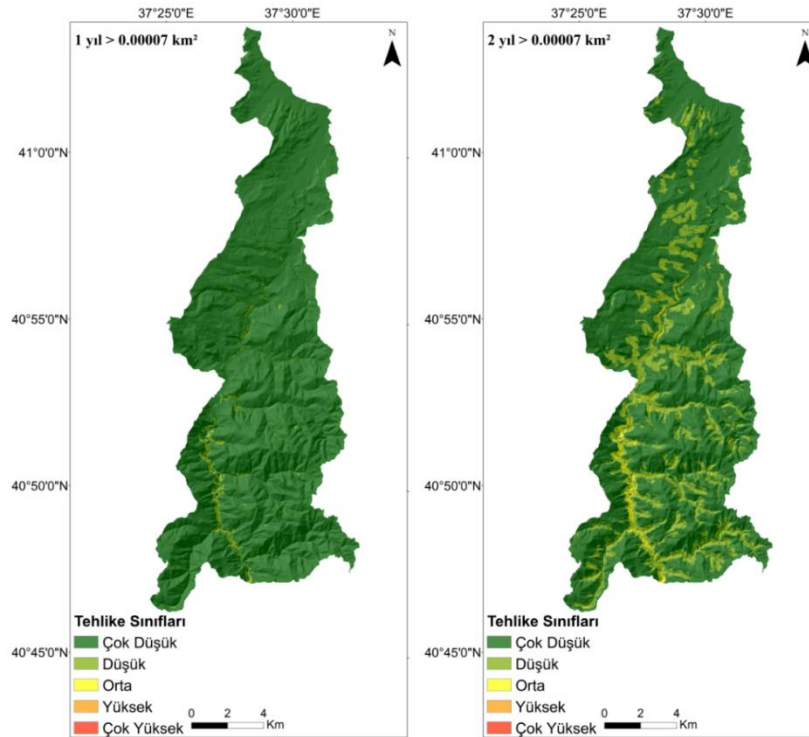


Şekil 4.19. Çalışma alanına ait heyelan yoğunluk fonksiyonuna göre alansal olarak 0,00007, 0,0003, 0,002 km² 'den büyük heyelanların aşılma olasılıkları

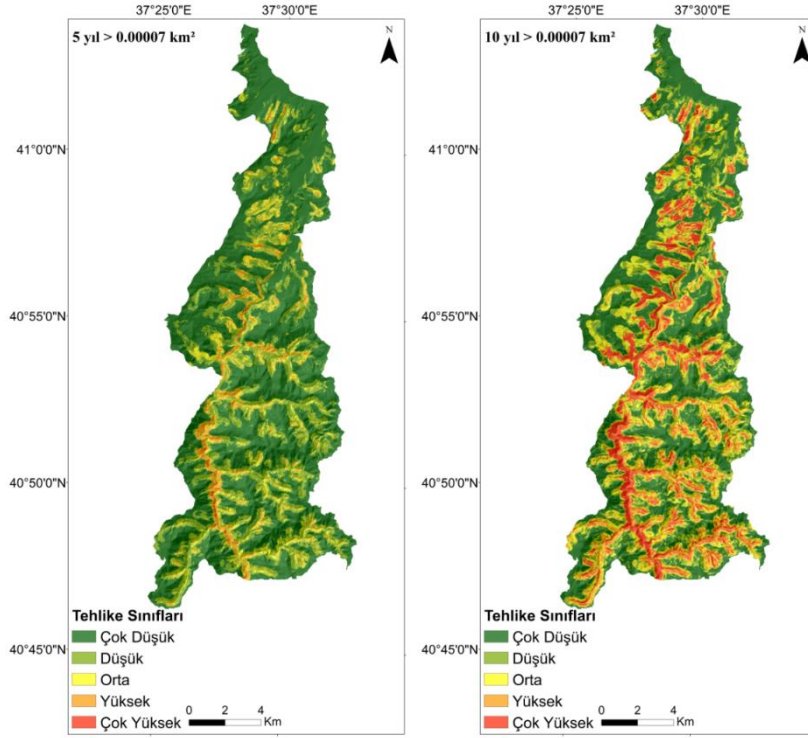
4.5. Heyelan Tehlike Haritaları

Heyelan tehlike haritaları duyarlılık haritalarından elde edilen mekansal olabilirlik, yağış analizlerinden elde edilen zamansal olabilirlik ve envanter haritasından elde edilen alansal olabilirliklerinin çarpılması sonucu elde edilmiştir. LR ve RO yöntemleri ile yapılan duyarlılık değerlendirmelerinde, yapılan test analizleri sonucunda Rastgele Orman yöntemi ile üretilen duyarlılık haritasının doğruluk yüzdesinin daha yüksek olmasından dolayı, Bolaman Çayı Alt Havzasına ait tehlike haritalarının üretilmesinde

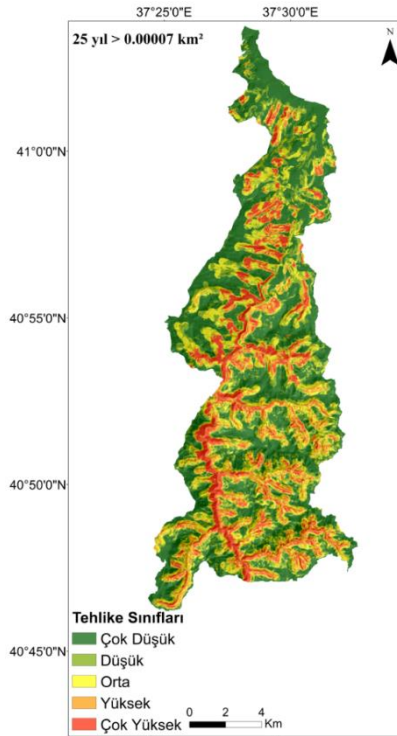
Rastgele Orman yöntemiyle üretilen duyarlılık haritasının kullanılmasına karar verilmiştir. Bölgede heyelanların genellikle aşırı yağışlardan sonra meydana gelmesinden dolayı, zamansal olasılık parametresinin üretilmesinde, uzun yıllar (2010-2022) yağış verileri kullanılarak yıl içindeki 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 ve 30 günlük maksimum yağış değerleri hesaplanmıştır. Gerekli analizler ve uyum iyiliği testleri sonucunda 2 günlük maksimum yağış değerleri için 2 yıllık tekrarlanma periyodu sabit tutularak Poisson dağılımı ile 1, 2, 5, 10 ve 25 yıllık zaman aralıklarında heyelan gerçekleşme olasılık değerleri ile envanter haritasındaki heyelanların büyüklük – frekans ilişkileri göz önünde bulundurularak Pearson 5 olasılık yoğunluk fonsiyonuna göre farklı alansal büyüklüklere (0.00007 km^2 , 0.0003 km^2 ve 0.002 km^2) sahip heyelanların meydana gelme olasılık değerleri hesaplanmış ve toplam 15 adet heyelan tehlike haritası üretilmiştir (Şekil 4.20 - 4.28). Zaman aralığı arttıkça heyelan olma olasılıklarının arttığı üretilen heyelan tehlike haritalarından net bir şekilde gözlemlenmektedir. Özellikle meydana gelen bu artış küçük boyutlu heyelanlarda daha fazla, büyük boyutlu heyelanlarda ise daha azdır.



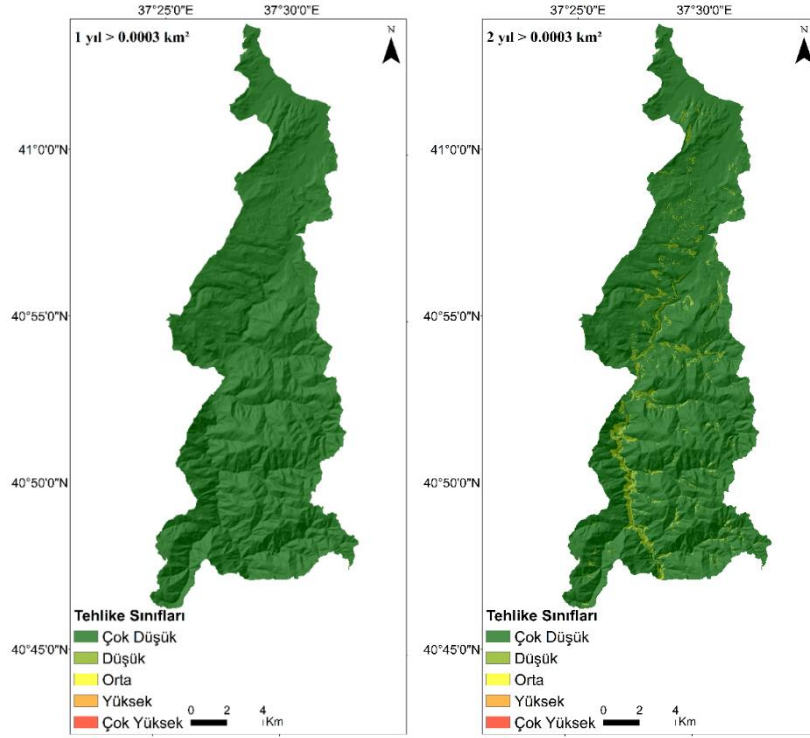
Şekil 4.20. 0.00007 km^2 'den Büyük ve 1, 2 Yıllık Aşılma Olasılık Değerlerine Göre Heyelan Tehlike Haritaları



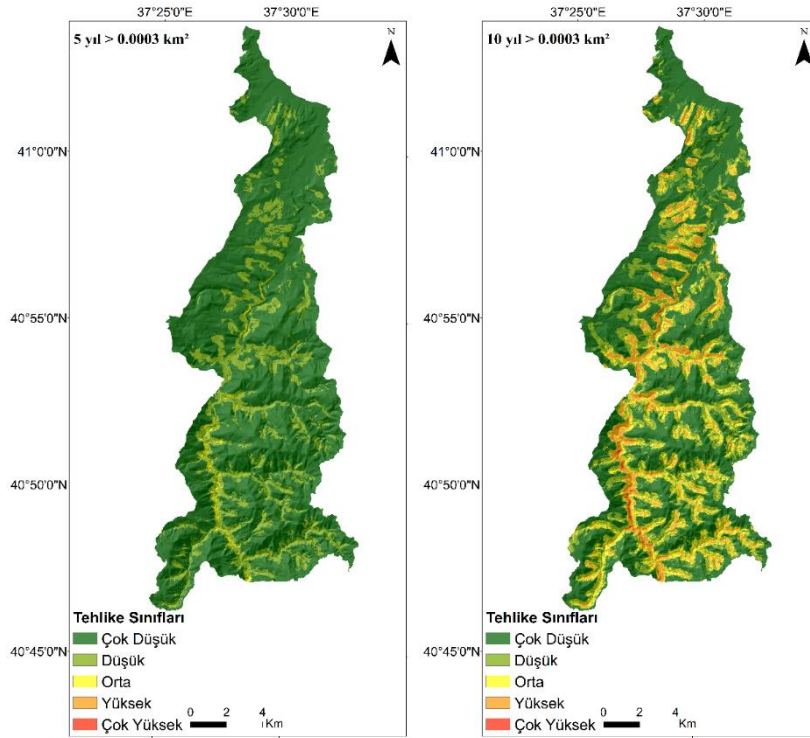
Şekil 4.21. 0.00007 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları



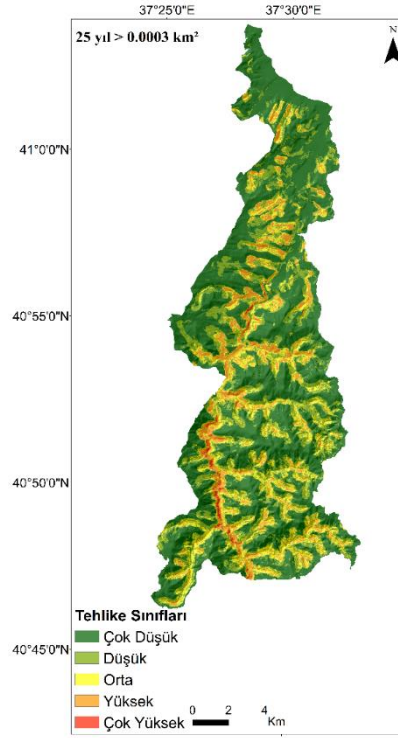
Şekil 4.22. 0.00007 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası



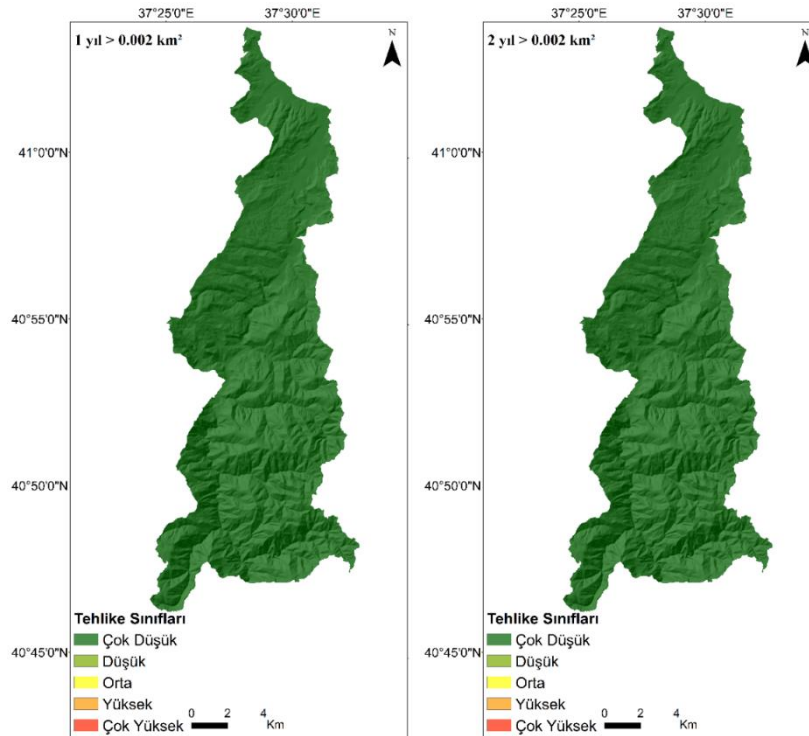
Şekil 4.23. 0.0003 km² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları



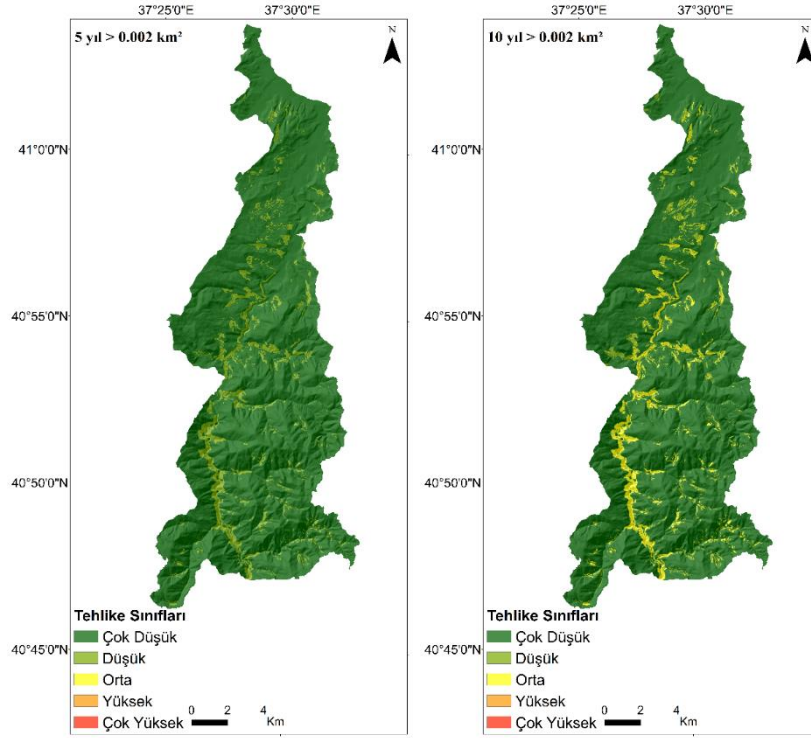
Şekil 4.24. 0.0003 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları



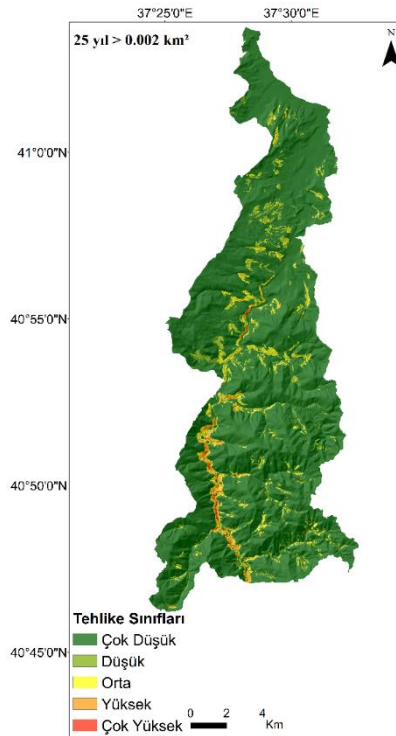
Şekil 4.25. 0.0003 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası



Şekil 4.26. 0.002 km² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları



Şekil 4.27. 0.002 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan tehlike haritaları



Şekil 4.28. 0.002 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan tehlike haritası

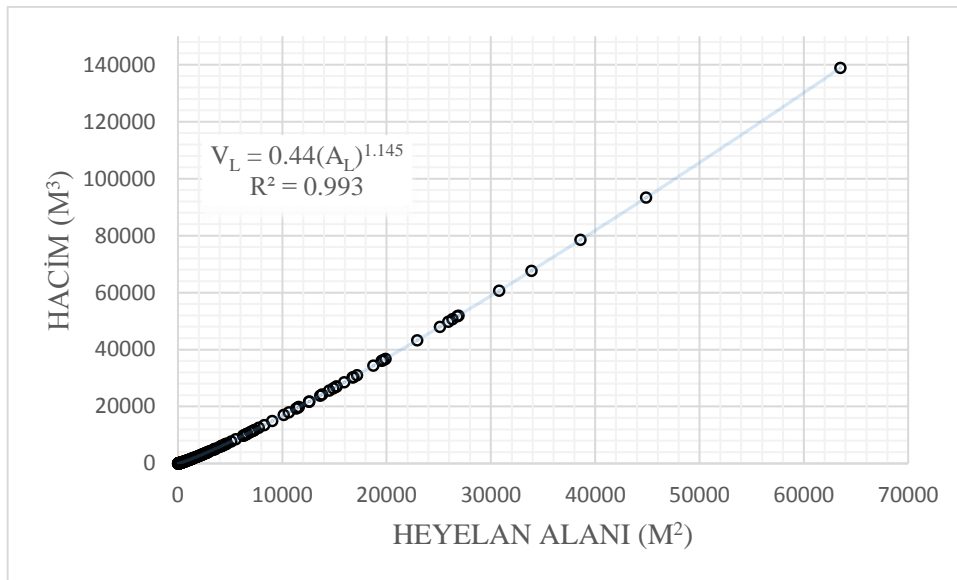
4.6. Heyelan Hacim Hesabı

Heyelan envanter haritası sayısal biçimde mevcutsa, her bir heyelanın mevcut alanı ve toplam heyelan alanı kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Guzzetti vd., 2009). Bu yüzden, heyelan alanının kolaylıkla belirlenmesinden dolayı literatürde birçok araştırmacı tarafından heyelan hacmi hesaplamaları için alan-hacim arasındaki ilişkileri gösteren çeşitli deneysel kuvvet yasası fonksiyonları sıklıkla kullanılmıştır (Xu vd., 2016). Bu çalışma kapsamında heyelan alanı ile heyelan hacmi arasındaki ilişki Larsen vd., (2010) tarafından geliştirilen aşağıdaki denklem 4.1'e dayalı olarak değerlendirilmiştir.

$$V_L = 0.44 \times A_L^{1.145} \quad (4.1)$$

Burada V_L Heyelan hacmini, A_L Heyelan alanını temsil etmektedir (Meier, 2020).

Hesaplanan heyelan hacimleri ve alanları arasında ki ilişki Şekil 4.29'da özetlenmiştir. Heyelan hacmi $26 \times 10^0 < V_L < 1.4 \times 10^5$ değerleri aralığında olup heyelan alanı ise $35 \times 10^0 \text{ m}^2 < A_L < 6.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ aralığında değerler almaktadır (Şekil 4.29). Çalışma alanında bulunan en küçük heyelan hacmi $26,6 \text{ m}^3$, en büyük heyelan hacmi 138878 m^3 , ortalama hacim değeri 7297 m^3 ve standart sapma değeri $16526,43 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır.



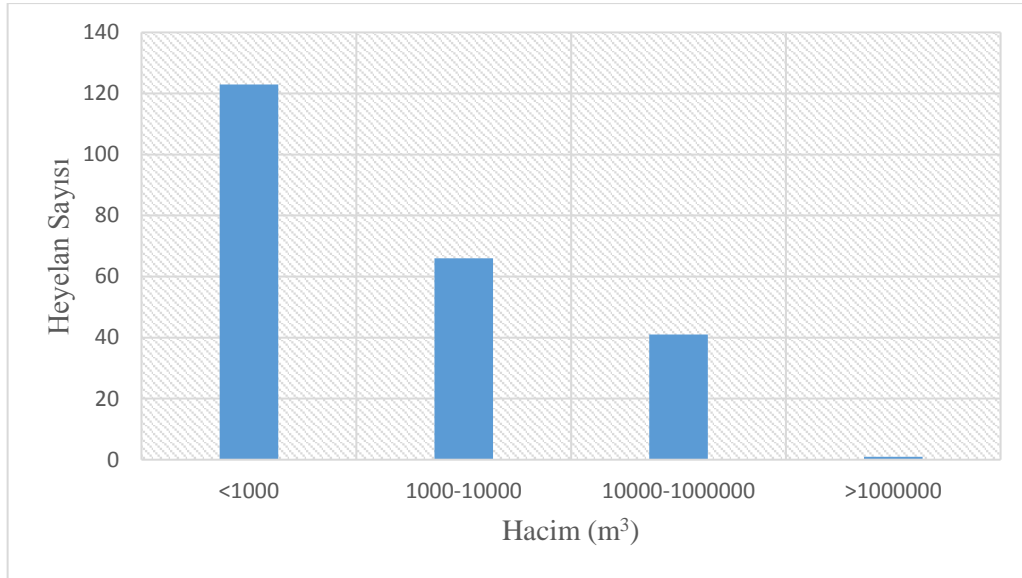
Şekil 4.29. Çalışma alanına ait heyelan alan-hacim ilişkisi

Tablo 4.5'te düşük ($<1000 \text{ m}^3$) ile çok yüksek ($>1,000,000 \text{ m}^3$) arasında değişen heyelan hacim sınıfları gösterilmektedir (Singh vd., 2019). Şekil 30'a göre çalışma alanında

bulunan heyelanların 123 tanesi düşük hacimli sınıfa girerken, 66 adet heyelan orta, 41 adet heyelan yüksek ve son olarak sadece 1 adet heyelan çok yüksek sınıfa girmektedir.

Tablo 4.5. Heyelan hacim sınıfları (Sarkar vd., 2015).

Hacim (m ³)	Sınıf	Simge
<1000	Düşük	V ₁
1000-10,000	Orta	V ₂
10,000-1,000,000	Yüksek	V ₃
>1,000.000	Çok Yüksek	V ₄



Şekil 4.30. Heyelanların hacimsel dağılımları

4.7. Heyelan Yayılma Alanı Hesabı

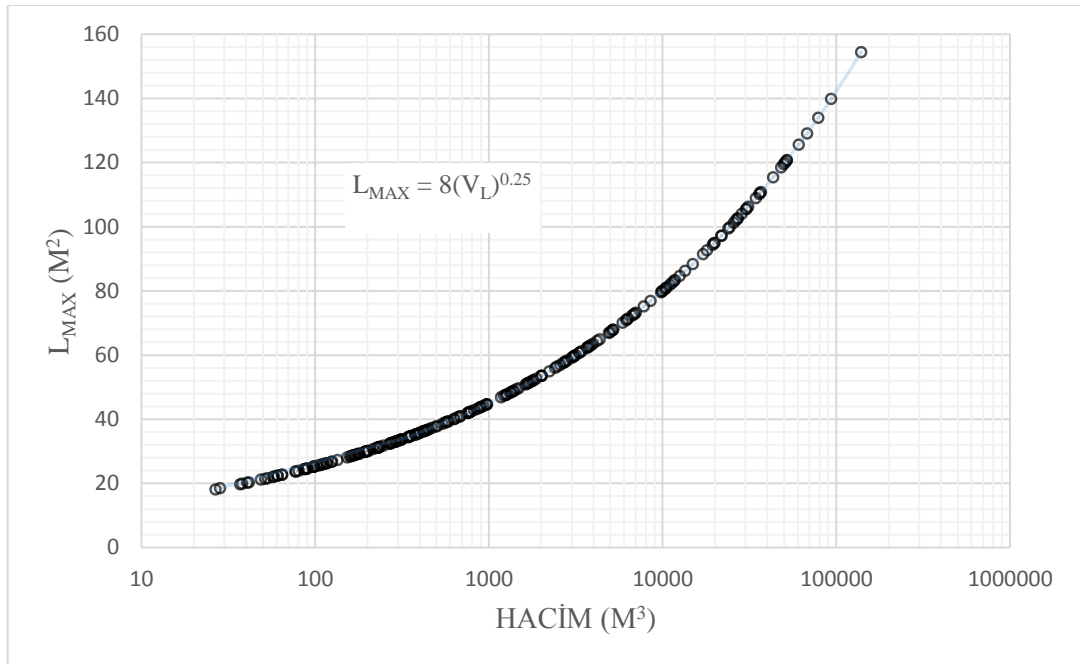
Heyelanların yayılma alanı, bir heyelanın topuk kısmı ile tepesi arasında ki yatay mesafe olarak tanımlanmaktadır. Yayılma alanı (L_{max}), heyelan riskinin ölçülmesinde ve risk azaltma yapılarının tasarımında oldukça etkili olan kritik bir faktördür. Yayılma alanının tahmin edilmesi için birçok yöntem geliştirilmiş olup, bunlardan ampirik-istatistiksel yöntemler mühendislik uygulamalarında daha pratik ve anlaşılır olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhao vd., 2021).

Bu çalışmada, yayılma alanını ve etkilenecek bölgeyi tahmin etmek için Legros (2002) tarafından geliştirilen 4.2’de verilen formül kullanılmıştır.

$$L_{max} = 8V_L^{0.25} \quad (4.2)$$

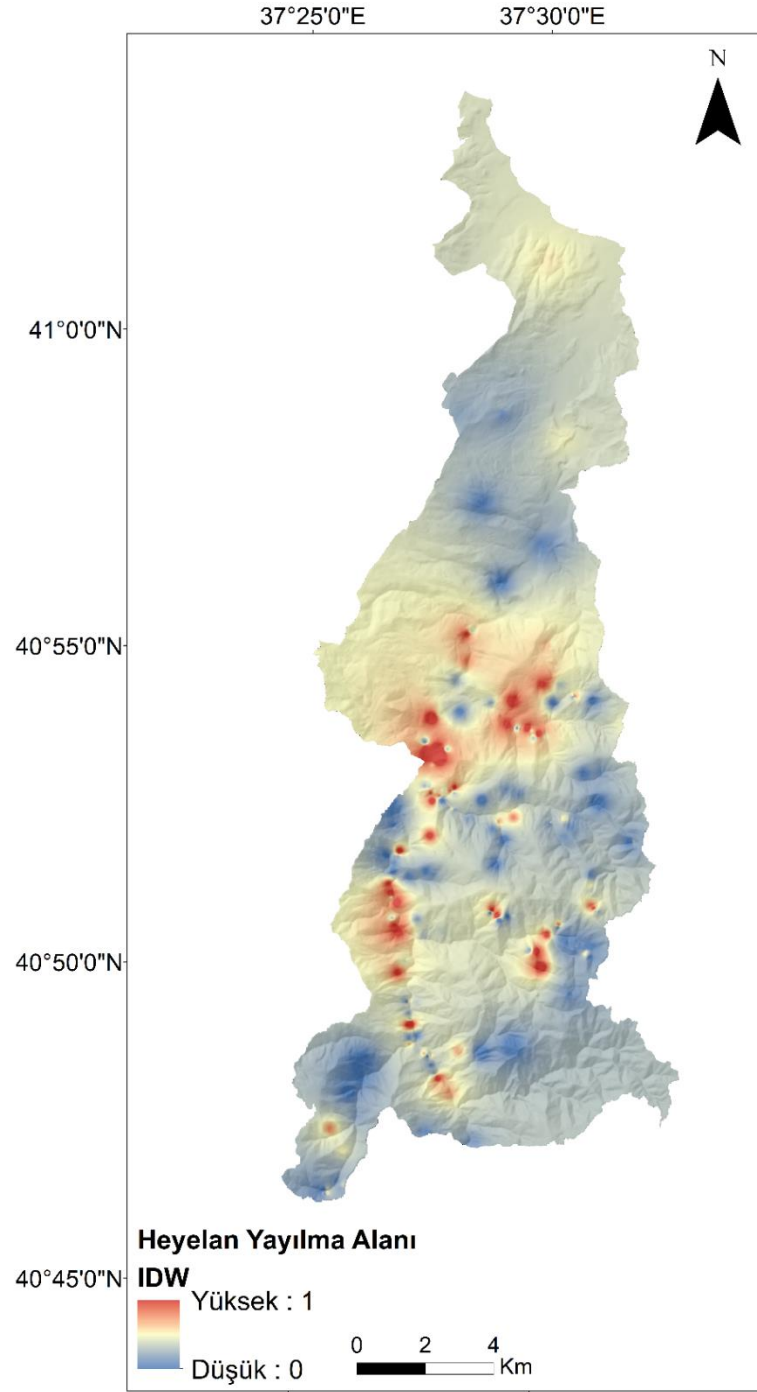
Burada V_L Heyelan hacmini, L_{max} Heyelan Yayılma Alanını temsil etmektedir (Legros, 2002).

Hesaplanan yayılma alanı-heyelan hacmi arasında ki ilişki Şekil 4.31'de özetlenmiştir. Yayılma alanı $18 \text{ m}^2 < L_{max} < 154 \text{ m}^2$ değerleri aralığında olup heyelan hacmi ise $26 \times 10^0 \text{ m}^3 < V_L < 1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ aralığında değerler almaktadır. Şekil 4.31'te net bir şekilde görüldüğü gibi L_{max} değeri, artan heyelan hacmi ile artış eğilimi göstermektedir (Legros, 2002).



Şekil 4.31. Çalışma alanına ait heyelan hacim-yayılma alanı ilişkisi

IDW enterpolasyon yöntemi ile heyelan envanteri kullanılarak heyelan yayılma alanı yoğunluk haritası CBS ortamında ArcGIS 10.4.1 programı kullanılarak üretilmiş ve 0 ila 1 arasında normalize edilmiştir (Şekil 4.32).

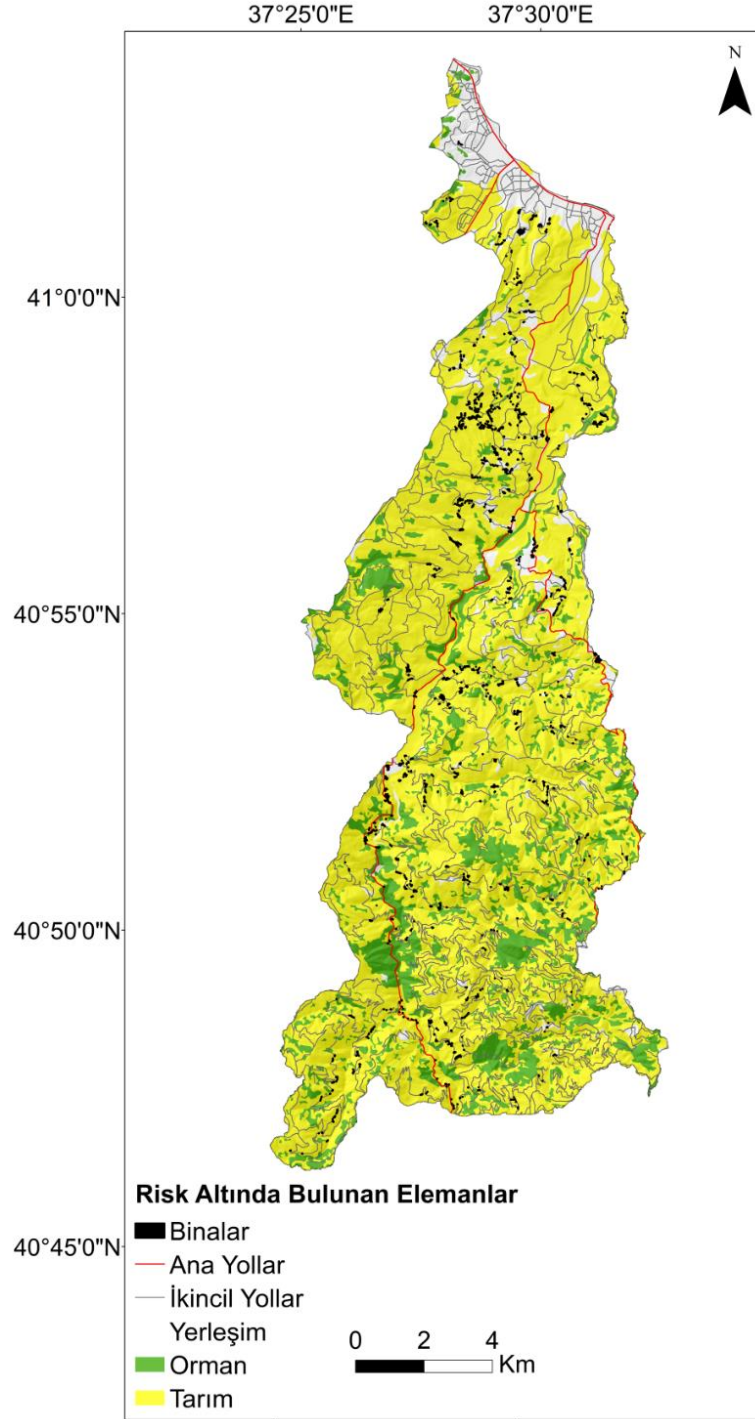


Şekil 4.32. Çalışma alanının heyelan yayılma alanı yoğunluk haritası

4.8. Risk Altında Bulunan Elemanların Hasargörebilme Dereceleri

Risk altındaki unsurlar, olası bir heyelan sonucunda olumsuz olarak etkilenme potansiyeli olan nesnelere veya sistemlere olarak tanımlanmaktadır. Hasargörebilirlik ise tehlikeden etkilenen alan içerisinde bulunan nesnelere potansiyel hasar seviyesi veya kayıp derecesi olarak ifade edilmektedir (Ram ve Gupta, 2022). Çalışma alanında risk altındaki

elemanlar binalar, yollar, tarım arazileri ve ormanlık alanlar olarak dikkate alınmıştır (Şekil 4.33). Hareket halinde bulunan insanlar, canlı hayvan ve taşıtlar ise risk altındaki elemanlar olarak dikkate alınmamıştır.

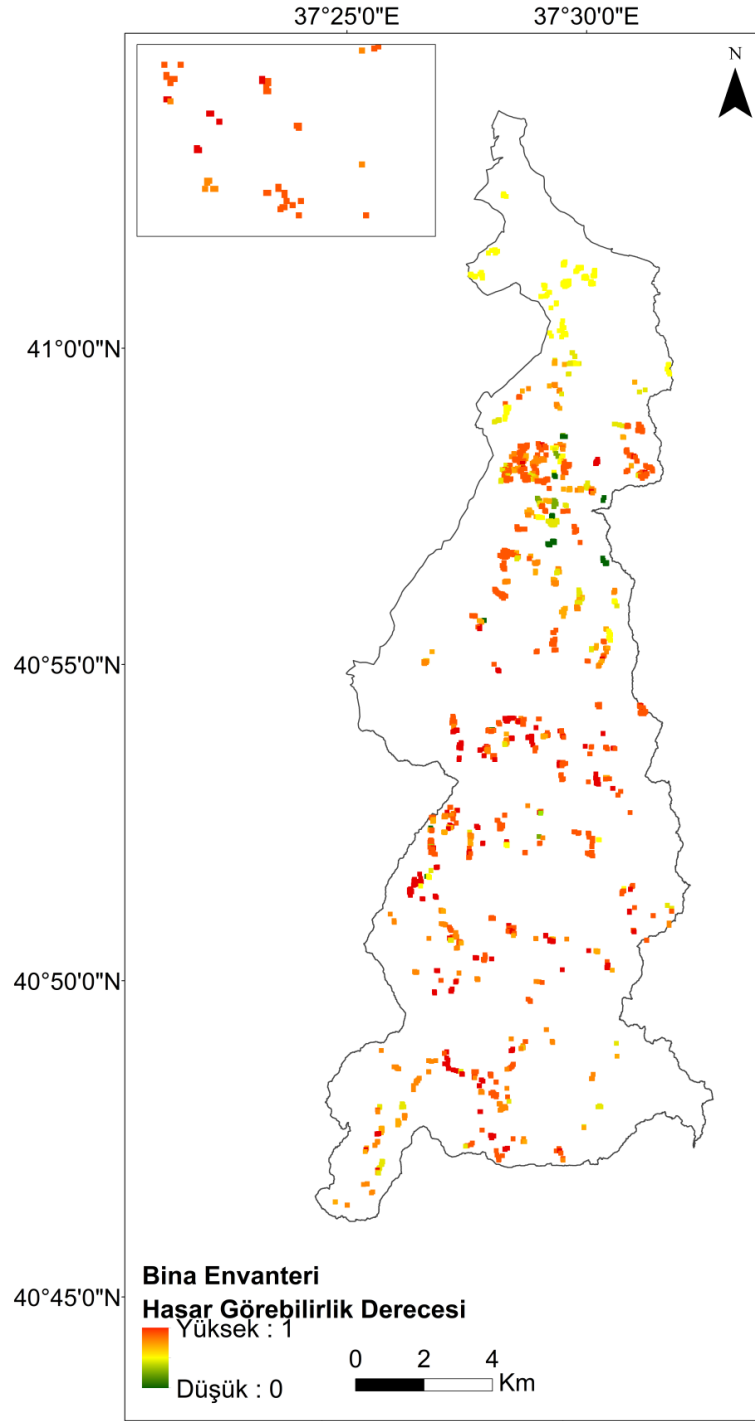


Şekil 4.33. Çalışma alanının risk altında bulunan elemanlar haritası

Tez çalışması kapsamında yapılan fiziksel hasargörebilirlik değerlendirmesinde risk altında bulunan unsurlar, heyelan duyarlılık haritası ile heyelan yayılma alanı haritasına

göre hasargörebilme dereceleri incelenmiş ve uzman görüşü esas alınarak ArcGIS 10.4.1 aracılığı ile değerler atanmıştır. Genel olarak yüksek ve çok yüksek duyarlılık bölgesine düşen risk altındaki her bir unsur için hasar görebilme potansiyeli yüksek olarak değerlendirilmiştir yine benzer şekilde, düşük ve çok düşük duyarlılık bölgesinde bulunan elemanlar ise düşük hasar görebilme potansiyeline sahip unsurlar olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, envanter haritasında bulunan heyelanların topuk kısımlarından itibaren risk altında bulunan elemanların noktasına olan mesafe L_{min} olarak ifade edilmiştir. Buna göre; eğer L_{min} parametresi L_{max} (heyelan yayılma alanı) parametresinden büyük bir değere sahip ise bölgede risk altında bulunan elemanlar için herhangi bir riskin olmadığı kabul edilmiştir. Fakat L_{min} parametresi L_{max} parametresinden küçük ise risk altında bulunan elemanlar için risk durumu mevcut olup hasargörebilirlik derecesinin oldukça yüksek olduğu kabul edilmiştir. Böylece, yayılma alanı içinde kalan risk altındaki elemanlara ilişkin hasar görebilme olasılıkları yayılma alanına olan mesafelerine göre 0 ile 1 arasında değerler verilerek risk seviyeleri ortaya konulmuştur.

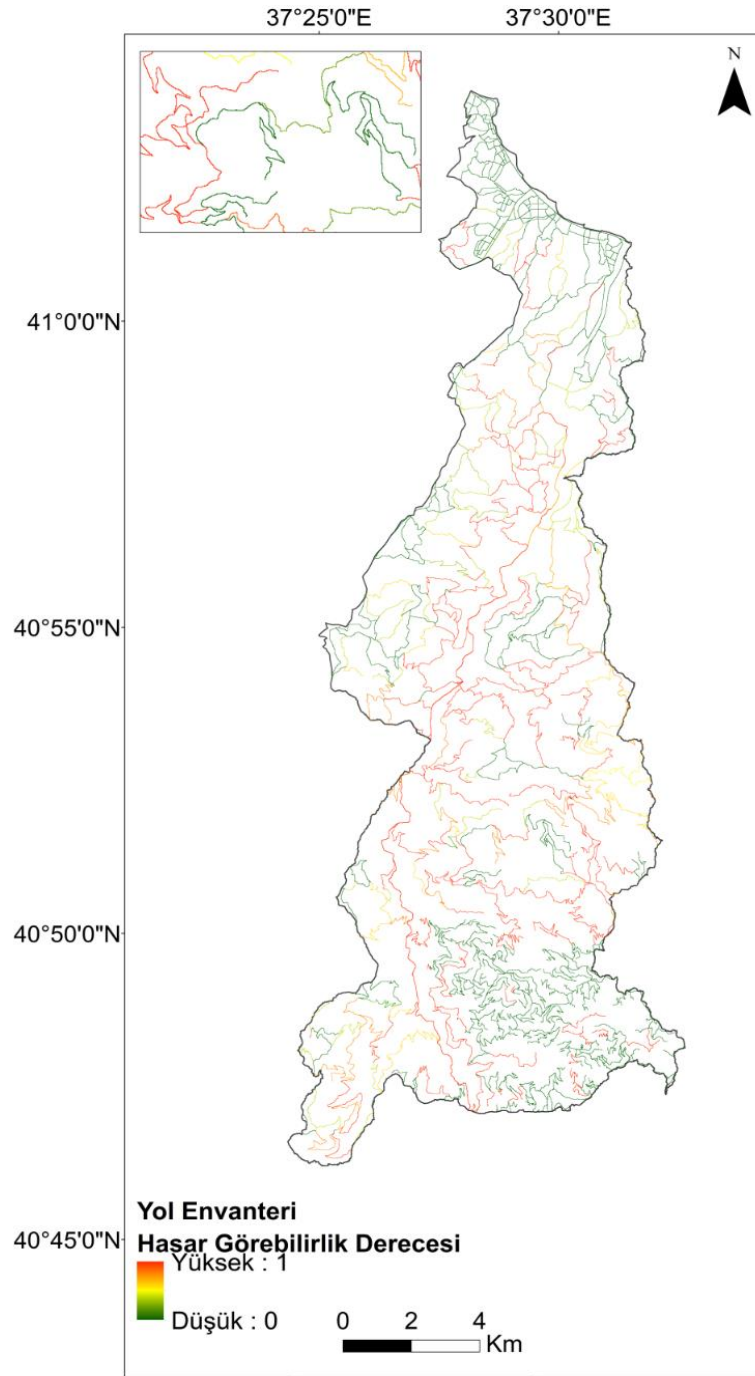
Bolaman çayı alt havzası çalışma sınırı içerisinde duyarlılık haritası ve yayılma alanı haritasına göre Google Earth görüntüleri ile tespit edilen toplam 1671 bina (konut, okul, cami vb.) risk altında bulunmaktadır. Evler tuğla ağırlıklı olup çoğunlukla iki katlı inşa edilmiştir. Evler genellikle bolaman deresi kenarında ve yamaçlarda inşa edilmiştir. Bu nedenle, evlerin çoğu heyelanlara karşı oldukça savunmasızdır. Havzada bulunan toplam 1671 bina etki alanındaki konumları dikkate alınarak toplam 1157 adet binaya 0.8 ile 1 arasında, toplam 303 adet binaya 0.8 ile 0.5 arasında ve son olarak toplam 211 adet binaya 0.5 ile 0.0 arasında puanlar verilerek derecelendirilmiştir. Şekil 4.34'te, risk altında bulunan binaların hasargörebilme dereceleri gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Çalışma alanının risk altında bulunan bina envanter haritası

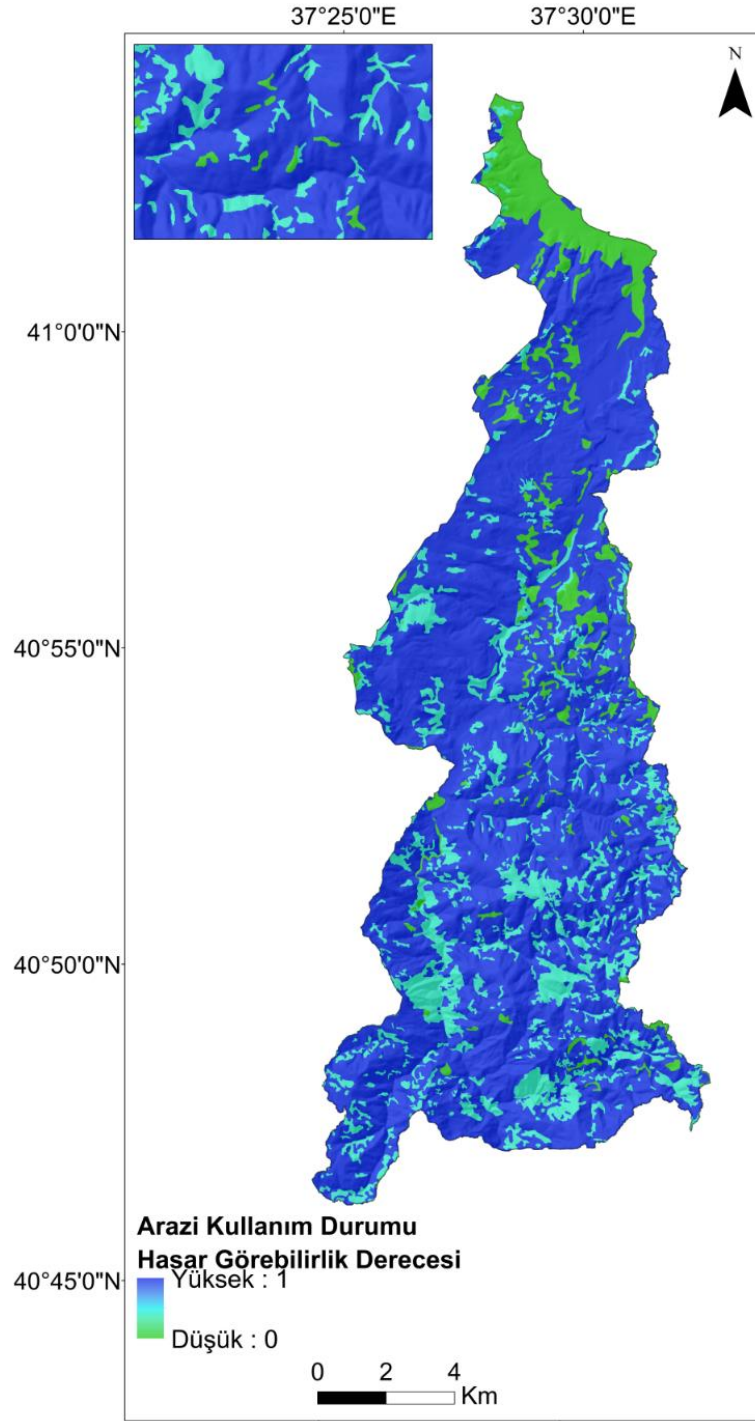
Hasargörebilirlik ve risk değerlendirme yapılacak olan yol verileri Tarım ve Orman Bakanlığı, Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığından 2021 yılında temin edilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere çalışma alanında bulunan yollar; ana yollar ve ikincil yollar olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılarak derecelendirilmiştir (Şekil 4.33). Uzman görüşü temel alınarak yapılan çalışmalar neticesinde, yol ağlarının buldukları yayılma alanına göre hasargörebilirlik değerleri 0 ile 1 arasında puanlandırılmıştır. Yapılan hasargörebilirlik

analizi çalışmaları sonucunda, Bolaman çayı alt havzasında, toplam uzunluk olarak 55,4 km'lik bir ana yol ağı bulunmaktadır ve bunun 21,2 km'si yüksek düzeyde hasargörebilme sınıfına dahil edilmiştir. Çalışma alanında ikincil yollar ilçeleri birbirine bağlamakta olup toplam uzunluğu 687076,72 km'dir ve bu yolların toplam 200818,6 km'si yüksek hasargörebilme potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.35). Havzada bulunan ana yollar çoğunlukla Bolaman Çayı kanalını takip eder, bu nedenle nehir erozyonu bölgede ciddi bir tehdit oluşturmaktadır.



Şekil 4.35. Çalışma alanının risk altında bulunan yol envanter haritası

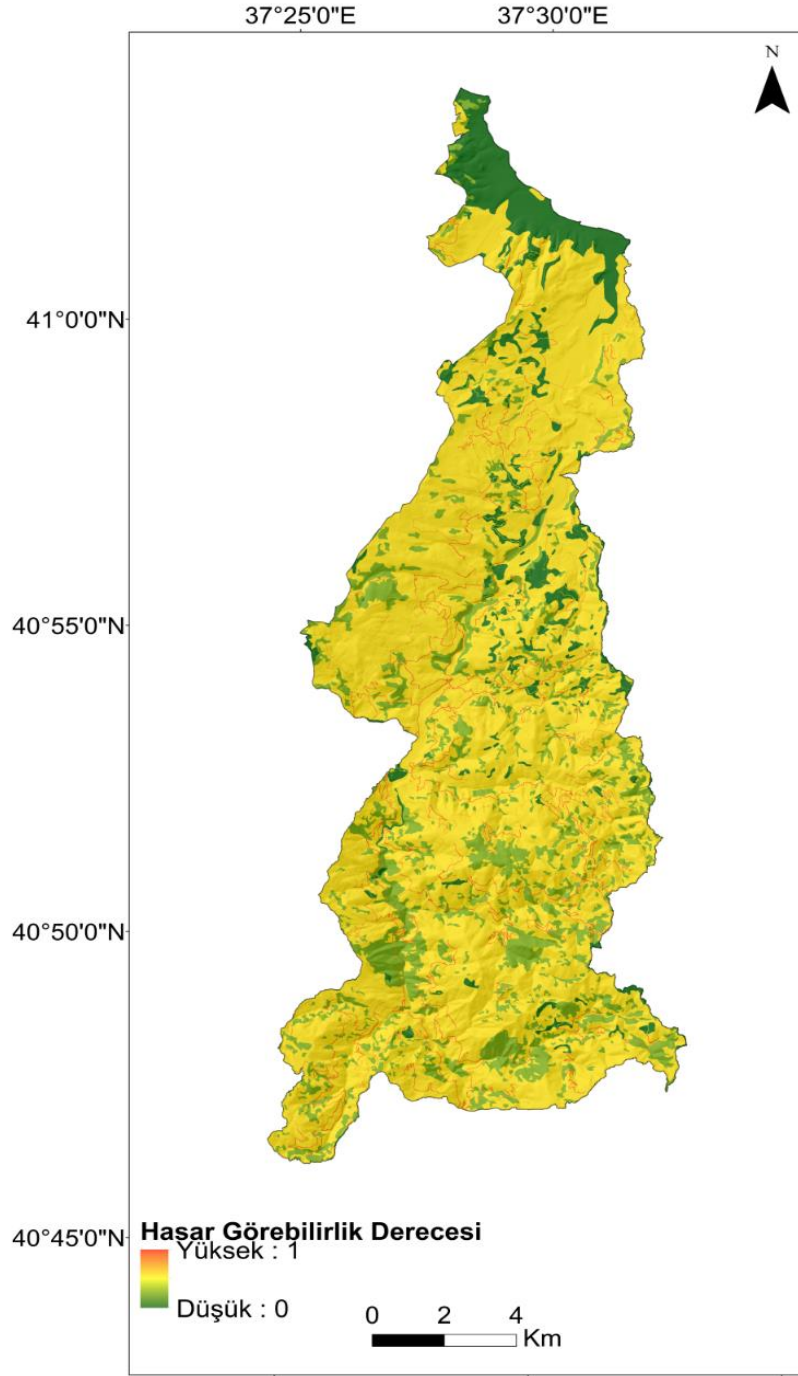
Orman Genel Müdürlüğünden alınan meşcere haritasına göre çalışma alanının %75'i tarım alanları ile %17'si ise orman alanları ile kaplıdır (Şekil 4.36). Tarım alanları çoğunlukla fındık bahçelerinden oluşmaktadır. Bolaman havzasında fındığın oldukça önemli bir gelir kaynağı olmasından dolayı yöre halkı tarafından genellikle ormanlar yok edilerek fındık bahçelerine dönüştürülmüştür. Bu yüzden ormanların fındık bahçelerine dönüştürülmesi bölgede heyelan tehlikelerine karşı savunmasızlığı artırmakta olup tarım sektörüyle uğraşan insanlar için büyük tehdit oluşturmaktadır. Bölgesel ölçekte çözünürlüğün düşük olması nedeniyle, risk altındaki farklı unsur türleri için farklı hasargörebilirlik değerleri belirlemek kolay değildir. Bu sebeple, 10x10 m çözünürlükte hasargörebilirlik derecesi tüm tarım alanları için 0.8 ve ormanlık alanlar için 0.4 olarak puanlandırılmıştır. Tarım ve orman alanlarının hasargörebilirlik dereceleri Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Çalışma alanının risk altında bulunan tarım ve orman alanları haritası

Havzada bulunan binalar, yollar, tarım arazileri ve ormanlık alanlar risk altında bulunan elemanlar olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra heyelan yayılma alanı değeri ve duyarlılık haritası dikkate alınarak risk altındaki elemanlar için etki alanı içindeki konumlarına göre 0 ile 1 arasında değerler verilerek bölgenin hasargörebilirlik haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.37). Üretilen hasargörebilirlik haritasına göre, yolların ve binaların havzanın tamamında yoğun bir şekilde dağılış göstermesinde dolayı en fazla risk altında kalan unsurlar olarak

değerlendirilmiştir. Özellikle Bolaman Çayı kanalı boyunca var olan ana yollar yüksek hasar görebilme derecesine sahiptir. Tarım alanları ise heyelana karşı orta düzeyde maruziyet derecesine sahiptir. Havzada bulunan ormanlık alanlar ise nispeten düşük hasargörebilirlik derecesine sahip olarak tespit edilmiştir. Fiziksel hasargörebilme analizi sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmektedir. Farklı duyarlılık sınıflarında yer alan risk altındaki tüm unsurların hasargörebilme derecelerine bakıldığında, heyelana maruz kalma değerlerinin yüksek olduğu açıktır (Tablo 4.6).



Şekil 4.37. Çalışma alanının hasargörebilme haritası

Tablo 4.6. Risk altında bulunan elemanların hasargörebilme dereceleri ve piksel değerleri

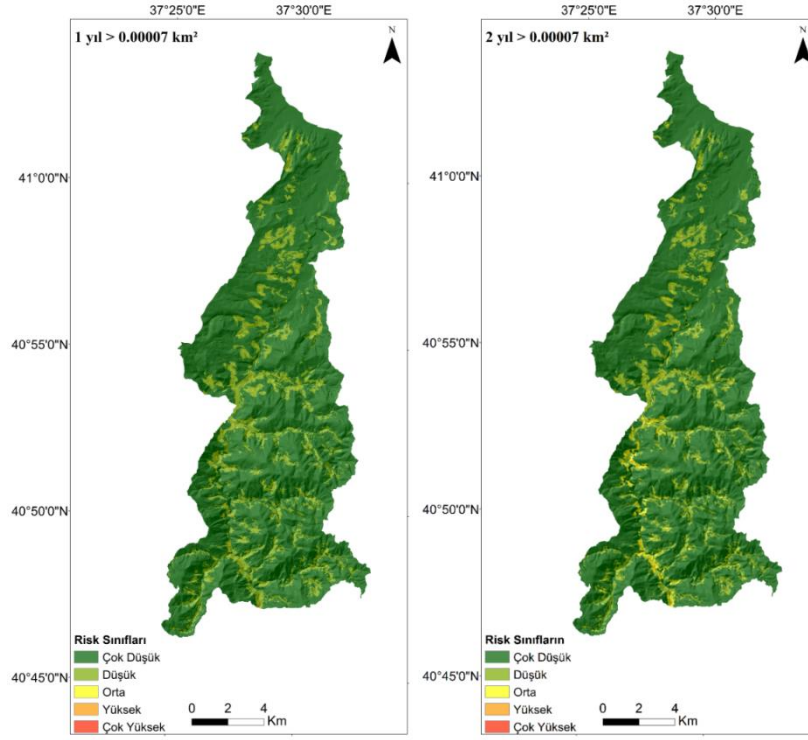
Risk Altında Bulunan Elemanlar	Hasargörebilme Dereceleri	Piksel Sayıları ve Oranları
Binalar	0 - 0.5	485 (%17)
	0.5 - 0.8	942 (%33)
	0.8 - 1	1455 (%50)
Ana Yollar	0 - 0.5	1636 (%33)
	0.5 - 0.8	578 (%12)
	0.8 - 1	2712 (%55)
İkincil Yollar	0 - 0.5	13298 (%30)
	0.5 - 0.8	8001 (18)
	0.8 - 1	23132 (%52)
Tarım Alanları	0.8	1420116 (%82)
Orman Alanları	0.4	314834 (%18)

4.9. Heyelan Risk Haritaları

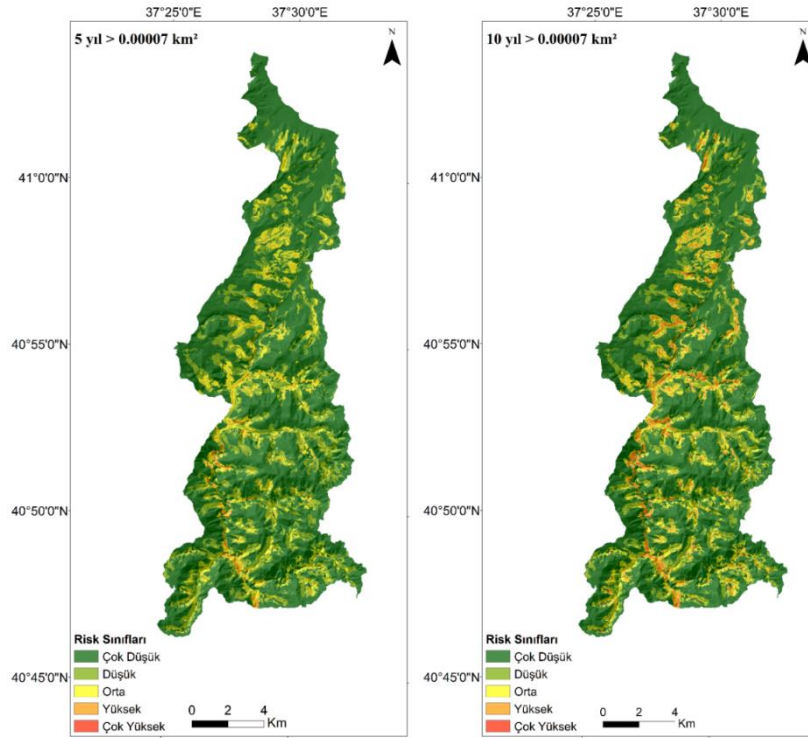
Heyelan risk değerlendirmesi, belirli bir bölgenin farklı yerlerinde nicel veya nitel olarak ölüm veya ekonomik kayıp açısından risk düzeyini gösteren bir risk haritası oluşturmayı amaçlayan risk yönetiminin temel bir bileşenidir (Ayyub, 2014; Guillard-Gonçalves ve Zezere, 2018). Heyelan risk haritası; heyelan tehlikesi, hasargörebilirlik ve risk altındaki unsurların CBS ortamında çarpılması sonucu elde edilmektedir. İlk olarak, hasargörebilirlik değerlendirmesi yapabilmek için öncelikle, çalışma alanındaki risk altındaki elemanlar (binalar, yollar, tarım arazileri ve ormanlık alanlar) haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.33). Daha sonra, heyelan yayılma alanı değerleri ve heyelan duyarlılık haritası dikkate alınarak uzman görüşüne göre hasargörebilirlik değerlendirilmiş ve risk altında bulunan her bir eleman 0-1 aralığında değerler alacak şekilde öznel olarak puanlandırılmıştır. Dah sonra, dikkate alınan risk altındaki elemanların birleştirilmesiyle hasargörebilirlik haritası oluşturulmuştur (Şekil 4.37). Elde edilen hasargörebilirlik haritası ve heyelan tehlike haritalarından üretilen heyelan risk haritası Varnes'' in (1984) tanımına uygun olarak geliştirilen eşitlik 4.3 ile hesaplanmıştır (Guzzetti vd., 2009).

$$R = (H)x(V) \quad (4.3)$$

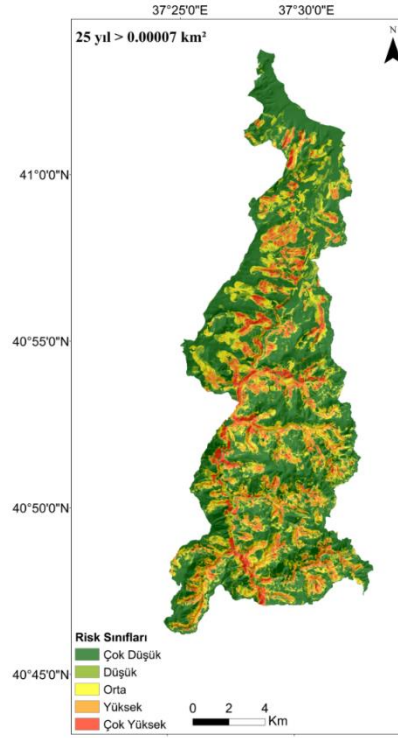
Yapılan hesaplamalar ile çalışma bölgesine ait 1, 2, 5, 10 ve 25 yıllık zaman içerisinde 0.00007 km², 0.0003 km² ve 0.002 km²'den büyük heyelanların oluşma olasılıklarına göre toplam 15 adet heyelan risk haritası üretilmiştir (Şekil 4.38 - 4.46).



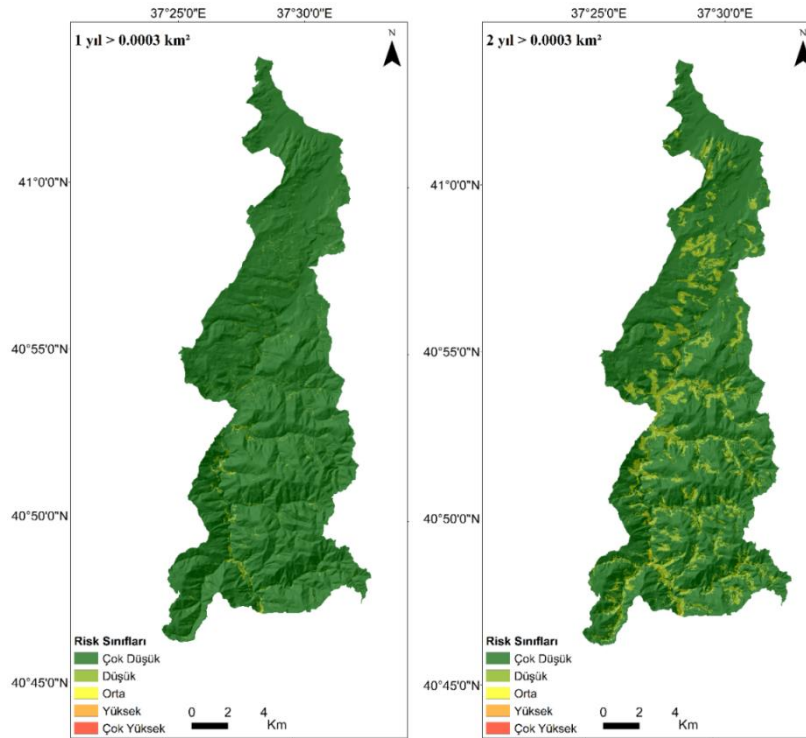
Şekil 4.38. 0.00007 km² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



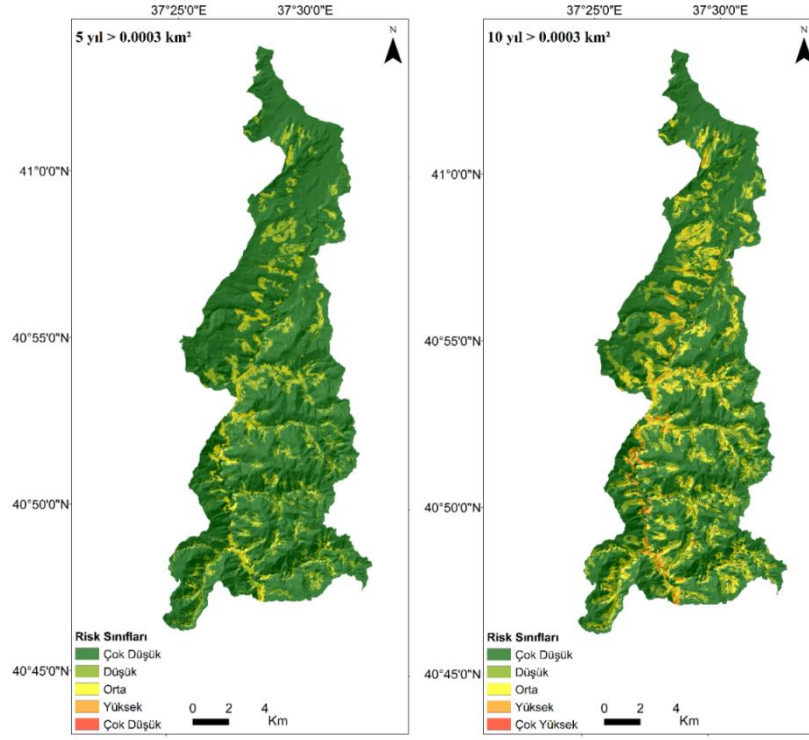
Şekil 4.39. 0.00007 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



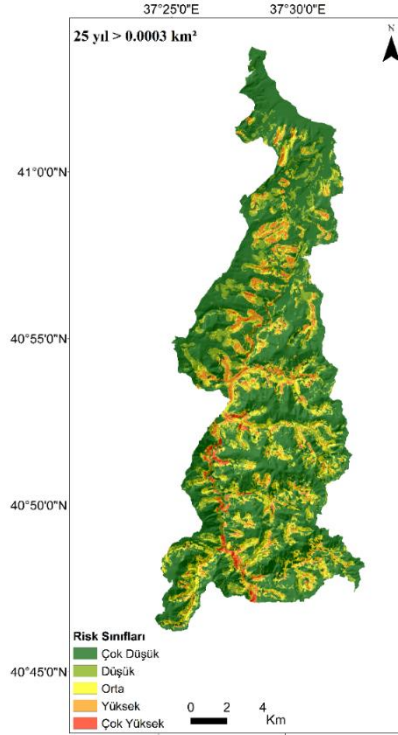
Şekil 4.40. 0.00007 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritası



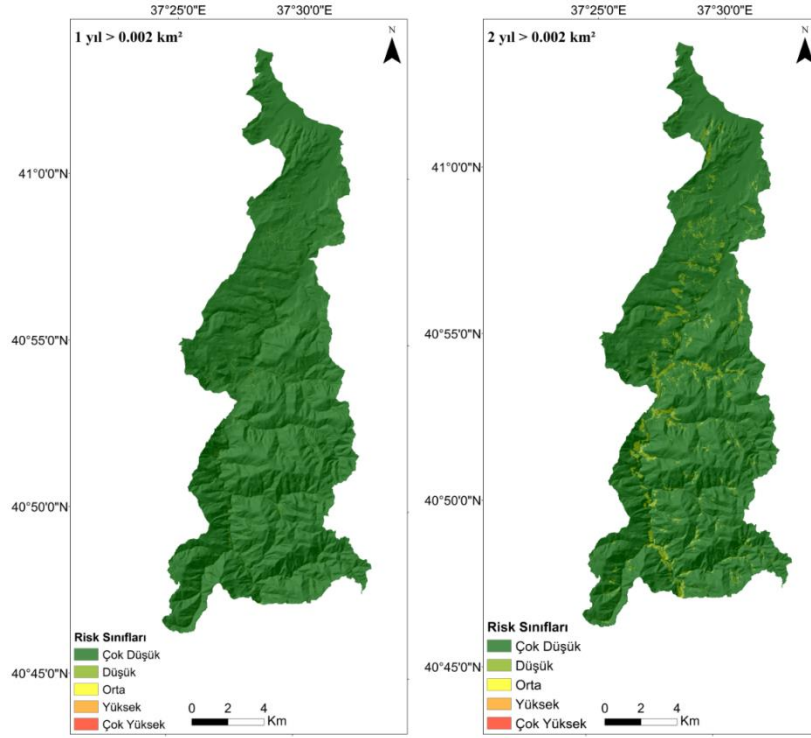
Şekil 4.41. 0.0003 km² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



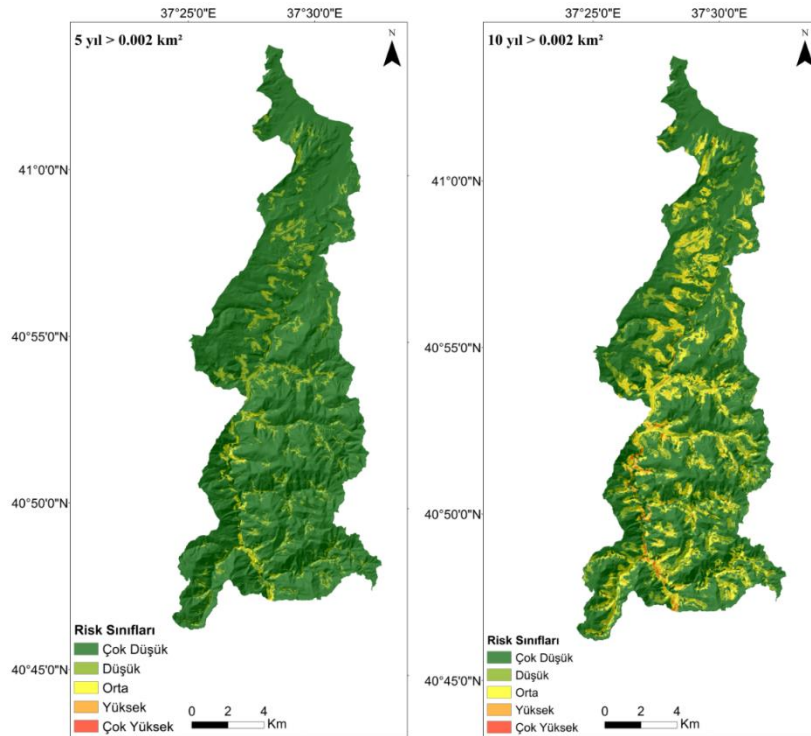
Şekil 4.42. 0.0003 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



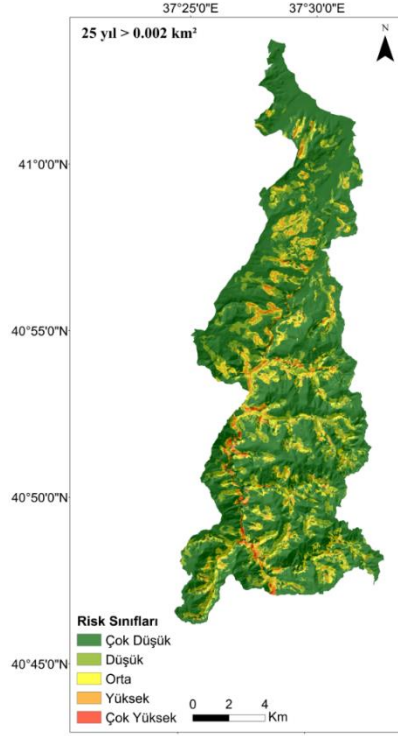
Şekil 4.43. 0.0003 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritaları



Şekil 4.44. 0.002 km² 'den büyük ve 1, 2 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



Şekil 4.45. 0.002 km² 'den büyük ve 5, 10 yıllık aşılma olasılık değerlerine göre heyelan risk haritaları



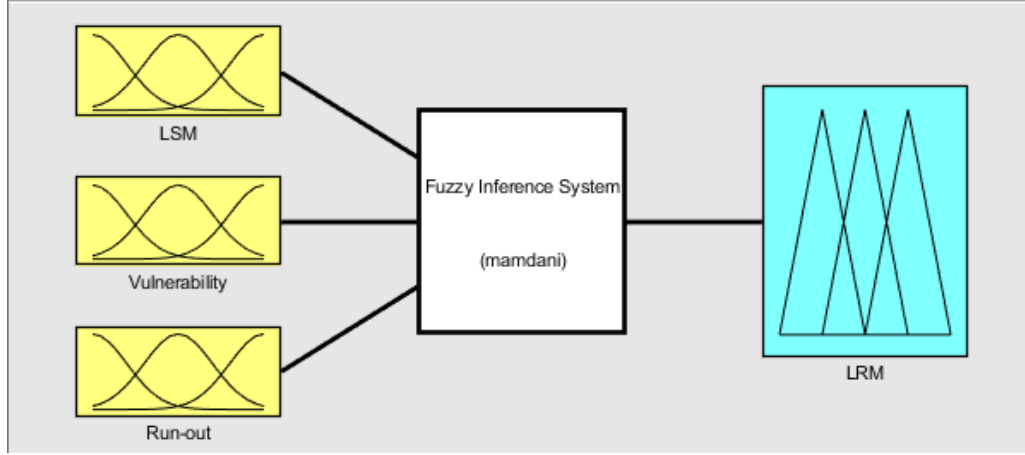
Şekil 4.46. 0.002 km² 'den büyük ve 25 yıllık aşılma olasılık değerine göre heyelan risk haritaları

4.10. Mamdani-Bulanık Mantık Algoritması Kullanılarak İyileştirme Yöntemlerinin Önceliklendirilmesi

Önceki bölümde uzman görüşüne bağlı olarak risk altındaki elemanların buldukları yayılma alanına göre hasargörebilme dereceleri belirlenmiş ve farklı büyüklük olasılıkları altında farklı yıllara ait havzanın risk seviyeleri ortaya konulmuştur. Bu bölümde ise Mamdani-Bulanık Mantık Algoritması kullanılarak üretilen risk haritasına göre stabilizasyon yöntemlerinin önceliklendirilmesinin yapılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında; Mamdani-Bulanık Algoritması, MATLAB programının bulanık mantık editörü olan Fuzzy Logic Toolbox kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan modelde heyelan duyarlılık, hasargörebilirlik ve heyelan yayılma alanı parametreleri girdi değerleri olarak belirlenirken heyelan risk haritası çıktı değeri olarak belirlenmiştir.

Uygulamada ilk olarak heyelan duyarlılık, hasargörebilirlik ve heyelan yayılma alanı olan girdi verileri MATLAB programında üyelik sınırları eşit bir şekilde üçgen üyelik fonksiyonlarıyla bulanıklaştırılarak dilsel değişkenlere dönüştürülmüştür. Bulanık modelde kullanılan girdi ve çıktı değerlerine ait üyelik fonksiyonları, literatürde çoğunlukla kullanılan uzmanların görüş ve tecrübelerine dayanan dilsel ifadeler ile

tanımlanmıştır. Her bir girdi parametresi kendi içinde üç adet kümeye “düşük, orta ve yüksek”, çıktı parametresi ise beş adet kümeye “çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek” bölünmüştür. Üyelik fonksiyonları Şekil 4.47'de gösterilmektedir.



Şekil 4.47. Mamdani bulanık mantık sisteminde tanımlanan üyelik fonksiyonları

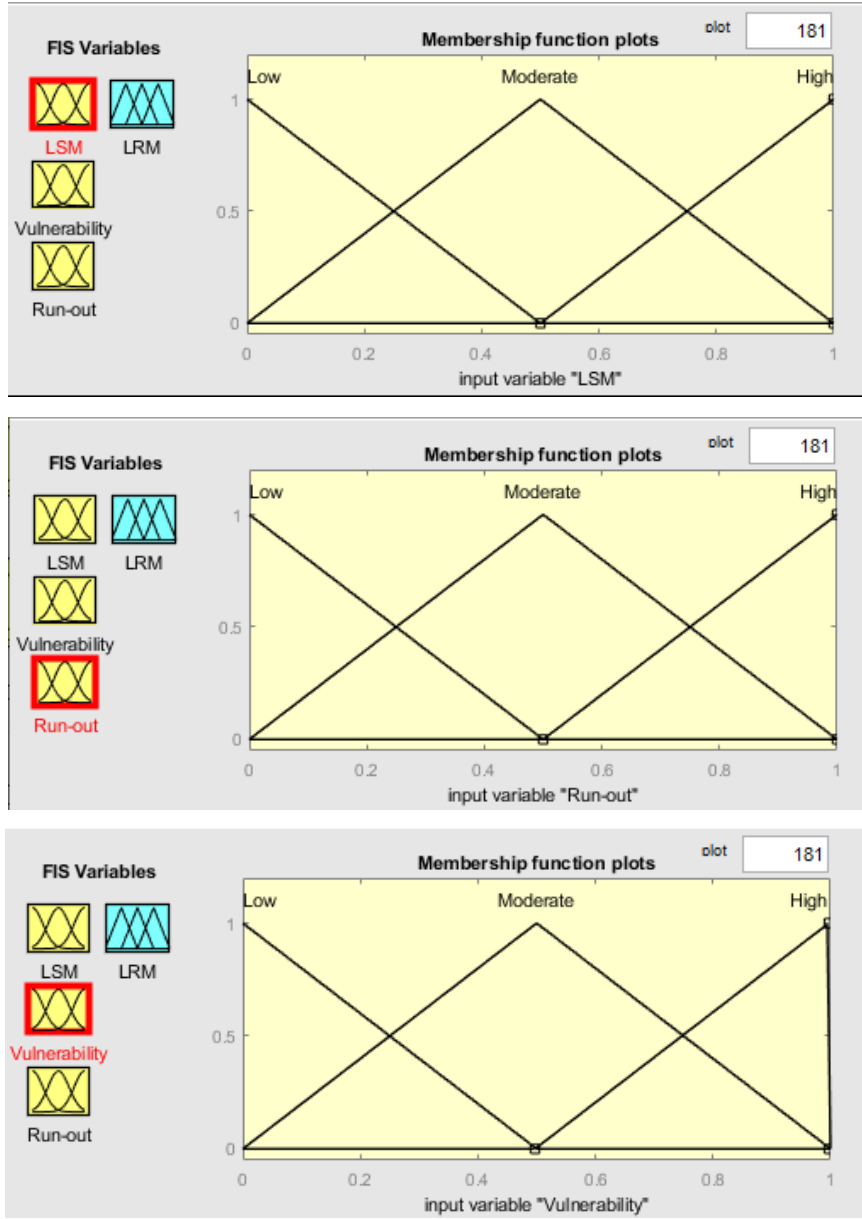
Modelde üç tane girdi bulunması ve her bir girdi kendi içinde üç tane kümeye (düşük, orta ve yüksek) bölünmesinden dolayı modelde kullanılacak kural sayısı $3^3 = 27$ olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2). Bu kurallar, bu tezin danışmanı olan Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU ile birlikte Mamdani Çıkarım sistemi kullanılarak üretilmiştir. Kurallar ilk olarak Excel formatında çizelge halinde yazılmış ve daha sonar MATLAB yazılımına girilmiştir.

Çizelge 4.2. Mamdani bulanık çıkarım sisteminin kural değerlendirme adımında kullanılan eğer-ise kuralları

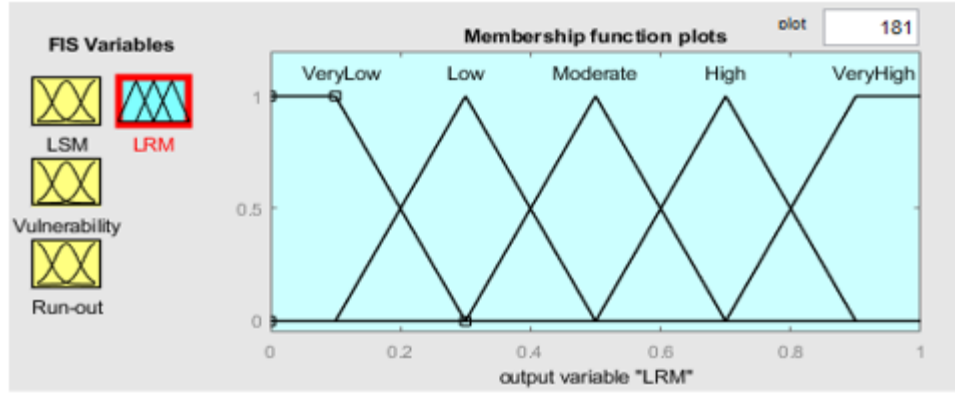
Kural Sayısı	Heyelan Duyarlılık	Hasar Görebilirlik	Heyelan Akış Mesafesi	Mamdani Bulanık Mantık Kuralları
1	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek
2	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
3	Yüksek	Yüksek	Düşük	Orta
4	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
5	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
6	Yüksek	Orta	Orta	Orta
7	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
8	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
9	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük
10	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek
11	Orta	Yüksek	Orta	Orta
12	Orta	Yüksek	Düşük	Orta
13	Orta	Orta	Yüksek	Orta
14	Orta	Düşük	Yüksek	Orta
15	Orta	Orta	Orta	Orta
16	Orta	Düşük	Düşük	Düşük
17	Orta	Düşük	Orta	Orta
18	Orta	Orta	Düşük	Düşük
19	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
20	Düşük	Yüksek	Orta	Orta
21	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
22	Düşük	Orta	Yüksek	Orta
23	Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük
24	Düşük	Orta	Orta	Düşük
25	Düşük	Düşük	Düşük	Çok Düşük
26	Düşük	Düşük	Orta	Çok Düşük
27	Düşük	Orta	Düşük	Çok Düşük

Daha sonra, bulanık kural tabanı kullanılarak harmanlanan kuralların, Mamdani bulanık mantık sistemine göre birleştirilmesi ile bulanık çıktı elde edilmiştir. Son adımda, bulanık değerlerin net değerlere dönüştürülmesi için ağırlık merkezi “centroid” tekniği kullanılarak durulaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan Mamdani bulanık mantık yöntemi kullanılarak heyelan duyarlılık, yayılma alanı ve hasargörebilirlik haritaları girdi olarak kullanılmış (Şekil 4.48) ve çıktı olarak heyelan risk değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.49). Grafiklerin dikey eksenleri üyelik derecesini, yatay eksenler ise girdiler için 0-1 arasında değişen olasılık düzeylerini temsil eder. Mamdani yönteminde heyelan risk haritası olan çıktı değeri üçgen üyelik fonksiyonunda; çok düşük derecede risk değeri için [0 0.1 0.3], düşük derece risk değeri için [0.1 0.3 0.5], orta derecede risk

değeri için [0.3 0.5 0.7], yüksek derecede risk değeri için [0.5 0.7 0.9] ve çok yüksek derecede risk değeri için [0.7 0.9 1] değerleri atanmıştır.



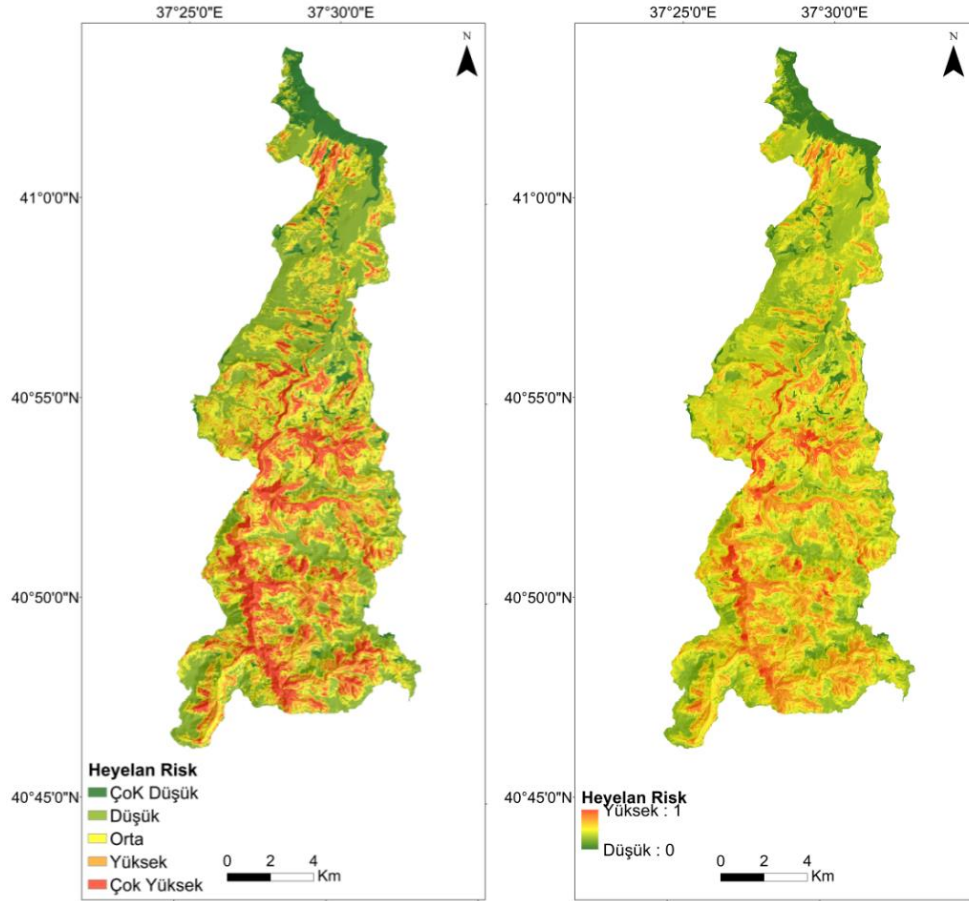
Şekil 4.48. Mamdani bulanık sistem girdilerinin üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi



LSM: Heyelan Duyarlilik
 Vulnerability: Hasargorebilirlik Derecesi
 Run-out: Heyelan Yayilma Alanı
 LRM: Heyelan Risk

Şekil 4.49. Mamdani bulanık sistem çıktısının üyelik fonksiyonlarının grafik gösterimi

Mamdani-Bulanık Mantık yöntemi ile elde edilen değerler ile daha sonra ArgGIS 10.4.1 programı kullanılarak heyelan risk haritası üretilmiştir. Üretilen risk haritası çok yüksek, yüksek, orta, düşük ve çok düşük ve 0-1 aralığında olmak üzere iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır (Şekil 4.50 a-b). Üretilen risk haritasına göre göre havzanın heyelan açısından risk durumu %13 çok yüksek, %21 yüksek, %28 orta, %32.5 düşük ve %5.5 çok düşük sınıfına düşmektedir. Elde edilen bu değerler dikkate alınarak heyelan stabilizasyon yöntemlerinin uygulanacağı bölümler önceliklendirilmiştir.



Şekil 4.50. Çalışma alanının mamdani bulanık mantık sistemi kullanılarak oluşturulan heyelan risk haritaları

4.11. Heyelan İyileştirme Yapıları

Şev veya yamaçların yenilmeleri geçmişten günümüze en çok karşımıza çıkan ve çok fazla can ve mal kaybına neden olan doğal tehlikeler arasındadır. Bu nedenle, yıllar boyunca heyelanın etkisinin azaltılmasına yönelik araştırmacılar tarafından sürekli etkili stabilizasyon teknikleri araştırılmıştır (Tang vd., 2007; Lacasse ve Nadim 2009; Cui vd., 2021). İyileştirme tekniklerinin temel amacı bir yamacın heyelan meydana gelmeden uzun süre güvenli bir şekilde kalmasını sağlamaktır. Yamaç duraylılığını sağlamak için birçok stabilizasyon yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır (Pınarlık vd., 2017). Bunlar arasında şevi yeniden şekillendirme, köprüleme, payandalama, düzleştirme, istinat duvarları, güçlendirme, güzergah değiştirme, zemin sertleştirme, drenaj sistemleri, ısı işlem ve bitkilendirme gibi çeşitli heyelan stabilizasyon yöntemleri bulunmaktadır (Kaya, 2017; Serdarevic ve Babic, 2019; Pepe vd., 2020; Turconi vd., 2020). İyileştirme yöntemleri uygun şekilde uygulandığında ve tasarlandığında, yamaçlar için uzun vadede güçlü ve uygun maliyetli bir yaklaşım sunar. İyileştirme tekniklerin tasarımı alana özgü

olmalıdır bu yüzden tehlikenin türü ve çevre sorunları, kabul edilebilir risk ve istenilen stabilite durumuna göre çevreyle uyumlu uygun maliyetli doğal mühendislik çalışmaları seçilmelidir.

Bu çalışmada bölgenin heyelan riskini azaltmak için en uygun stabilizasyon yöntemini belirlemek amacıyla heyelan risk haritası üretilmiştir. Risk bazlı stabilizasyon planlaması, heyelan olma ihtimalini ve sonuçlarını en aza indirmek için karar vermede bir araç olarak kullanılmıştır. İyileştirme çalışmalarının doğru şekilde planlanması ve takip edilmesi heyelan olma riskini önlerken heyelan zararlarını ve bakım masraflarını da azaltmaktadır. Bu risk bazlı metodoloji sayesinde, riskin düzeyi (kabul edilebilir sınırlar içinde olsun ya da olmasın) kolayca tahmin edilebilir ve riskin kabul edilemez düzeyde olması durumunda azaltıcı önlemler kolayca alınabilir. Tez kapsamında elde edilen heyelan risk haritası ve kapsamlı arazi çalışmaları neticesinde Bolaman çayı kanalı boyunca havza heyelana karşı oldukça riskli olduğu belirlenmiş olup stabilizasyon tekniklerinin daha çok bu bölgelere uygulanması uygun görülmüştür. İyileştirme çalışmaları daha fazla kaymayı durdurmak ve yamaçların genel stabilitesini artırmak için önerilmiştir.

Bölgedeki heyelanlar daha çok ani ve şiddetli yağışlardan sonra meydana gelmektedir. Aşırı yağışlar nedeniyle heyelan potansiyeli bulunan yamaç veya şevlerde heyelan tehlikesinin azaltılması çerçevesinde, yüzey suyu rejimini değiştirmeye yönelik hendekler, kanallar, borular ve oluklar gibi drenaj sistemleri kurularak fazla suyun zeminden kontrollü bir şekilde uzaklaştırılması sağlanarak kaymaya neden olan kuvvetler azaltılabilir. Uygulanan tüm bu drenaj sistemleri sayesinde aşırı yağışlar veya ani kar erimeleri gibi olumsuz meteorolojik olaylar sebebiyle zeminlerde meydana gelen geçici doygunluk ve buna bağlı olarak zeminin emme kaybının önlenmesi sağlanmış olacaktır.

Bölgenin aşırı yağış alması nedeniyle fazla yer altı suları yine yeraltı yönlendirme kanalları, dikey derin kuyular, jeotekstil malzemelerle doldurulmuş hendekler yeraltısuyu seviyesinin dengesini koruyarak kaymaları önleyecektir. Yeraltı suyu drenaj özelliklerinin tasarımında akış hızı, filtreleme, yerleştirme ve çıkış ayrıntıları dikkate alınmalıdır (Sotir vd., 2019). Ayrıca, zemine ulaşan yağış miktarını emerek buharlaşma-terleme yoluyla yeraltısuyu seviyesini dengede tutmak amacıyla bitki örtüsünün zayıf olduğu yamaçlar bitkilendirilebilir. Özellikle bitki örtüsü bakımından zayıf nemli yol yarmalarında terlemenin fazla olduğu çalı ve ağaçlar toprak nemini azaltmada daha etkili olacaktır. Bitkilendirmenin diğer bir amacı ise zemini güçlendirmektir.

Bolaman nehri boyunca topuk oyulmalarını önlemek veya iyileştirmek

veya diğer hafifletici önlemlerin uygulanmasına alan açmak amacıyla, heyelanların topuk kısmından suyu yönlendirmek için yönlendirme kanalları ve kaymaya karşı direnç sağlaması açısından heyelana kaya ile topuk desteği yapılabilir. Ayrıca, bu tür bir destekleme yamaç topuğunun oyulmasını da engelleyecektir.

Bölgede yol yarmalarında da heyelanların çok fazla meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden yol kenarlarında meydana gelebilecek potansiyel heyelanlara karşı gittikçe yaygınlaşan ve kullanılmaya başlanan istinat duvarlarının aksine daha esnek yapıda olan gabyon eşik, beşik duvarlar ve çeşitli tipteki güçlendirilmiş toprakarme sistemleri gibi sistemler önerilebilir.

Tüm bu stabilizasyon yapılarının yanında şevler ve yamaçlar en az 5 yılda bir bir uzman tarafından bakımları denetlenmelidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, heyelan açısından oldukça aktif olan Bolaman havzasının yedi alt havzasından biri olan, Bolaman Çayı Alt Havzası'nda meydana gelen heyelanlardan kaynaklanan zararların azaltılmasına yönelik metodoloji ve yöntemler geliştirilerek bölgenin risk analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, heyelan zararlarını azaltmak için uygulanabilir, çevreye uyumlu ve ekonomik heyelan stabilizasyon teknikleri önerilmiştir.

İnceleme alanına ait heyelan envanter haritası, arazi çalışmalarının yanında uzaktan algılama tekniklerinden faydalanılarak oluşturulmuş ve toplam 231 adet heyelan haritalanmıştır. Özellikle bölgede gerçekleşen aşırı yağışların ardından heyelanların çoğu ayrılmış zonlarda dairesel yenilmeler şeklinde meydana gelmiştir. Heyelanlar, mekânsal olarak havzanın Bolaman Çayı kanalı boyunca yer almaktadır. Çalışma alanında bulunan heyelanlar, %53 oran ile havzanın 0-250 metre rakım aralığında yoğunlaşmaktadır. Jeolojik açıdan, heyelanların %80,3'ü Çağlayan Formasyonu üzerinde, %11,9'u Fatsa Formasyonu üzerinde yer almaktadır. Geriye kalan %7,8'lik kısım ise diğer formasyonlar içerisinde yer almaktadır. Ayrıca heyelanların yaklaşık %73,8'i tarım alanlarına % 24,7'si ise ormanlık alanlara düşmektedir.

Heyelanların duyarlılık değerlendirmeleri, özellikle son zamanlarda bilimsel araştırmalarda yaygın bir şekilde kullanılan Lojistik Regresyon ve Rastgele Orman yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizlerinde, heyelana neden olan 12 adet bağımsız değişken; yükseklik, yamaç eğimi, yamaç yönelimi, yamaç eğriliği, plan eğriselliği, profil eğriselliği, topografik nemlilik indeksi (TNI), dere ve yola yakınlık, jeoloji, arazi kullanım durumu ve normalize edilmiş bitki fark indeksi (NDVI) ve 208 adet heyelan bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Bu analizlerin temel amacı, bölgenin heyelana karşı olan duyarlılık seviyelerinin belirlenmesi ve daha etkili, sürdürülebilir bir heyelan yönetimi için gerekli bilgilerin sağlanmasıdır.

Her iki modeli uygulayabilmek için, heyelanlı piksel sayılarının iki katı kadar heyelansız bölgelerden rastgele seçim yapılarak eğitim ve test veri setleri hazırlanmıştır. Lojistik regresyon analizi ile elde edilen sonuçlara göre, mevcut heyelanların %37,9'u çok düşük, %27,6'sı düşük, %17,4'ü orta, %17,1'i yüksek ve çok yüksek sınıf içerisinde yer almaktadır. Rastgele Orman yöntemiyle yapılan heyelan duyarlılık değerlendirmesinde,

mevcut heyelanların %46.3'ü çok düşük, %22'si düşük, %15.7'si orta, %16.5'i yüksek ve çok yüksek sınıf içerisinde bulunmaktadır. Elde edilen duyarlılık haritalarının performanslarını karşılaştırmak amacıyla ilk olarak alıcı işletim karakteristik eğrisi (ROC) altındaki alan (EAA) yaklaşımı uygulanmıştır. EAA değerleri Lojistik Regresyon modeli için 0.81, Rasgele Orman yöntemi için 0.97 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca heyelan modelinin performansını değerlendirmek için istatistiksel metriklerde kullanılmıştır. Lojistik regresyon için duyarlılık değeri %87, özgüllük değeri %47, kesinlik değeri %77.3 ve doğruluk değeri %74 olarak hesaplanmıştır. Rastgele orman için ise bu değerler sırasıyla %91.5, %92.3, %96.1 ve %91.7 olarak bulunmuştur. Daha sonra, iki farklı modelle üretilen duyarlılık haritaları geriye kalan 23 büyük heyelan ile genel doğruluk kriterine göre tekrar doğrulanmış ve Lojistik Regresyon analizi için %73 Rasgele orman için ise %89.4 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen doğrulama analizi sonuçları neticesinde iki modelinde performanslarının oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Heyelan tehlike haritalarının hazırlanması için zamansal ve alansal olabilirlik parametreleri sürekli ve kesikli olasılık yoğunluk fonksiyonları dikkate alınmıştır. Bu değerlendirmeler yapılırken, çalışma havzası içerisinde şiddetli yağışlar sonucu tetiklenen heyelan olayları ile bölgede bulunan yağış istasyonlarına ait meteorolojik veriler arasındaki korelasyon dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, heyelanların oluşmaya başladığı yağış seviyesi belirlenerek, heyelan olasılığı hesaplanmıştır. Böylece, heyelanların 2 günlük kümülatif yağış değerinin 86 mm'ye ulaştığında, meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Yağış frekans analizleri 2 günlük kümülatif yağış değerleri ile hesaplanmış ve en uygun dağılımın Genelleştirilmiş Ekstrem Değer olduğu tespit edilmiş, tekrarlama aralığı 2 yıl olarak hesaplanmıştır. Buradan Poisson dağılımı ile 1, 2, 5, 10 ve 25 yıllık aşılma olasılıkları belirlenmiştir. Heyelanların alansal olabilirlikleri ise, büyüklük – sıklık ilişkisi dikkate alınarak 0.00007, 0.0003 ve 0.002 km²'lik alandan daha büyük heyelanların oluşma olasılıkları Power-Law dağılımına ait Pearson 5 dağılımı kullanılarak sırası ile 0.96, 0.68 ve 0.28 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm olabilirlik parametrelerinin birlikte değerlendirilmesiyle 0.00007, 0.0003 ve 0.002 km²'den büyük heyelanların, 1, 2, 5, 10 ve 25 yıllık zaman aralıklarında aşılma olasılıklarını gösteren heyelan tehlike haritaları oluşturulmuştur.

Heyelan risk haritalarının oluşturulabilmesi için, öncelikle risk altındaki elemanlar belirlenmiştir. Bu amaçla alan-hacim ve hacim-yayıma alanı hesapları yapılarak

heyelanların yayılma alanları hesaplanmış ve etki alanları IDW interpolasyon yöntemi ile haritalanmıştır. Daha sonra bu etki alanları içerisinde ve heyelan duyarlılık haritasında çok yüksek ve yüksek sınıflar içinde yer alan binalar, yollar, tarım arazileri ve ormanlık alanlar risk altında bulunan elemanlar olarak değerlendirilmiştir. Risk altında bulunan elemanların yayılma alanına olan mesafelerine göre ise hasargörebilme dereceleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda uzman görüşü yöntemi esas alınarak elemanlara puanlar atanmış ve son olarak hasargörülebilirlik haritası oluşturulmuştur.

Analizlerin son aşamasını oluşturan risk haritaları iki farklı yaklaşımla elde edilmiştir. İlk olarak, heyelan tehlike haritaları ile hasargörebilirlik haritasının CBS ortamında çarpımı sonucunda farklı yıllara ve büyüklüğe ait 15 adet risk haritası oluşturulmuştur. Risk haritası sonuçlarına göre risk altında bulunan elemanların en yoğun görüldüğü Bolaman Çayı kanalı boyunca, hemen hemen tüm zaman aralıklarında risk teşkil ettiği tespit edilmiştir. Yapılan saha çalışmaları ve analizler sonucunda bölgenin heyelana karşı oldukça duyarlı olduğu ve birçok elemanın risk altında olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, bölgenin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bölgede stabilizasyon çalışmalarının önceliklendirilmesi için sık kullanılan Mamdani-Bulanık Mantık (M-BM) yöntemi ikinci yaklaşım olarak tercih edilerek nihai heyelan risk haritası elde edilmiştir. Sisteme heyelan duyarlılık, hasargörebilirlik ve heyelan yayılma alanı girdi verileri olarak tanımlanmış ve her biri için bulanık kümeler oluşturularak sayısal değerler bulanık değerlere dönüştürülmüştür. Bulanık değerlerin değerlendirilmesi amacıyla uzman görüşüne dayanan, “eğer-ise” kuralı toplam 27 kuraldan oluşan kural veri tabanı oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda elde edilen değerler hala bulanık değerler olduğundan durulaştırma yöntemi kullanılarak sayısallaştırıldı ve çıktı parametresi olarak heyelan risk haritası elde edildi. Mamdani-Bulanık Mantık yöntemi ile elde edilen risk haritasına göre havzanın yaklaşık %34’ü yüksek ve çok yüksek risk sınıfına girmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, çevresel konular, güvenlik durumu ve ekonomik unsurlar dikkate alınarak bölgedeki risk oluşturan alanları duraylı hale getirecek stabilizasyon teknikleri önerilmiştir. Bunlar: heyelanların oluşmasında önemli rol oynayan su problemine karşı drenaj önlemlerinin alınması ile suyun heyelanlı bölgeden uzaklaştırılması, daha esnek yapıllı destek sistemleri ile yamaç topuğunun desteklenmesi ve bitki örtüsü bakımından zayıf yamaçların bitkilendirilmesi faydalı olacaktır.

Bu alışma ile elde edilen sonuçların uygulayıcılar ve karar vericiler tarafından göz önünde bulundurularak yapılacak planlama çalışmalarıyla havzada meydana gelecek heyelan olaylarından kaçınmak ya da olası kayıpları azaltmak için önemli katkılar sağlayacağı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- Abellán, J., Mantas, C. J., & Castellano, J. G., A random forest approach using imprecise probabilities: Knowledge-Based Systems, 134 (2017) 72-84.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, 2001.
- AFAD, Ministry of interior-disaster and emergency management presidency, April 2020, <https://www.afad.gov.tr/>.
- Ada, M., & San, B. T., Comparison of machine-learning techniques for landslide susceptibility mapping using two-level random sampling (2LRS) in Alakir catchment area, Antalya, Turkey: Natural Hazards, 90(1) 2018 237-263.
- Adamson, P. T., Probability distributions of best fit to South African flood data: Water SA, 5(2) 1979 70-76.
- Aditian, A., Kubota, T., & Shinohara, Y., Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia: Geomorphology, 318 (2018) 101-111.
- Ağan, A., Altınbaş, A.F., Eroğlu, C.İ., Hamzaçebi, S., Aydın, Ü. & Çetiner, L., Trabzon-Rize (Doğu Karadeniz Bölgesi) Metalik Maden Aramaları: Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, (23) 2017 53-65.
- Akacak, A. K., & Taş, İ., Farklı Mekânsal Enterpolasyon Yöntemleriyle Alansal Yağış Hesaplanması, Kuzey Ege Havza Örneği: Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 8(2) 2021 528-539.
- Akgün, A., Ayvalık ve yakın çevresinin erozyon ve heyelan duyarlılığının coğrafi bilgi sistemleri tabanlı incelenmesi, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2007.
- Akgün, A. & Erkan, O., 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) (2016).
- Akman, M., Veri madenciliğine genel bakış ve random forests yönteminin incelenmesi: sağlık alanında bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- Alavi, N., Quality determination of Mozafati dates using Mamdani fuzzy inference system: Journal of the Saudi society of agricultural sciences, 12(2) (2013) 137-142.
- Alcan, V., Bulanık mantık kullanarak spastisitenin tanı ve sınıflandırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2014.

- Aleotti, P., & Chowdhury, R., Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives: *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58 (1999) 21-44.
- Alexander, D., Vulnerability to landslides: *Landslide hazard and risk*, (2005) 175-198.
- Altaş, İ.H., Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Bileşim yayıncılık A.Ş., İstanbul, (1999).
- Althuwaynee, O. F., & Pradhan, B., Semi-quantitative landslide risk assessment using GIS-based exposure analysis in Kuala Lumpur City: *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2) (2017) 706-732.
- Amirahmadi, A., Pourhashemi, S., Karami, M., & Akbari, E., Modeling of landslide volume estimation. *Open Geosciences*, 8(1) (2016) 360-370.
- Anderson, T. W., & Darling, D. A., A test of goodness of fit: *Journal of the American statistical association*, 49(268) (1954) 765-769.
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., & Lee, C. W., Assessment of landslide susceptibility using statistical-and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 11(9) (2019) 999.
- Arbanas, Ž., Benac, Č., & Grošić, M., Remedial works on landslide in complex geological conditions, In *Proceedings 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, Vol. 5 No. 9.10, 2009, p. 2009.
- Arbanas, Ž., Pajalić, S., Jagodnik, V., Peranić, J., Vivoda Prodan, M., Domlija, P., ... & Čeh, N., Development of physical model of landslide remedial constructions' behaviour, In *Proceedings of the 4th Regional Symposium on Landslides in the—Balkan Region, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina*, 2019, pp. 23-25.
- Argyriou, A. V., Polykretis, C., Teeuw, R. M., & Papadopoulos, N., Geoinformatic analysis of rainfall-triggered landslides in Crete (Greece) based on spatial detection and hazard mapping: *Sustainability*, 14(7) (2022) 3956.
- Aristizábal, E., & Sánchez, O., Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes: *Disasters*, 44(3) (2020) 596-618.
- Arnone, E., Francipane, A., Noto, L. V., Scarbaci, A., & La Loggia, G., Strategies investigation in using artificial neural network for landslide susceptibility mapping, application to a Sicilian catchment: *Journal of Hydroinformatics*, 16(2) (2014) 502-515.
- Arslan, M., & Zırhlioğlu, G., Öğretmen Performanslarının Bulanık Mantık Yöntemiyle Değerlendirilmesi: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 18(1) (2021) 569-594.

- Ateş, Ş., Keçer, M., Mutlu, G., Bulut, A., Osmañcelebioglu, R., Şule, S., & Karakaya, F., Ordu İlinin Yerbilim Verileri Ve Dogal Afet Özellikleri, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi Yayınları, Ankara, **2004**.
- Ateşoğlu, A., Havza çalışmalarında kullanılan CORINE 2006 arazi sınıflandırma verilerinin doğruluğunun araştırılması: Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University, 66(1) (**2016**) 173-183.
- Atkinson, P. M., & Massari, R., Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy: Geomorphology, 130(1-2) (**2011**) 55-64.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H., The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan: Geomorphology, 65(1-2) (**2005**) 15-31.
- Ayçin, E., & Özveri, O., Bulanık modelleme ile tedarik zinciri performansının değerlendirilmesi ve imalat sektöründe bir uygulama: Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakóltesi Dergisi, 17(1) (**2015**) 51-60.
- Ayyub, B. M., Risk analysis in engineering and economics. Chapman and Hall/CRC Press, second edition. ISBN: 1466518251, **2014**.
- Bacha, A. S., Shafique, M., & van der Werff, H., Landslide inventory and susceptibility modelling using geospatial tools, in Hunza-Nagar valley, northern Pakistan: Journal of mountain science, 15(6) (**2018**) 1354-1370.
- Bahadır, E., Bulanık Mantık Yaklaşımının Eğitim alışmalarında Kullanılmasının Alan Yazın Işığında Değerlendirilmesi: Uluslararası Sosyal ve Eğitim Bilimleri Dergisi, 4(7), (**2017**) 28-42.
- Baharvand, S., Rahnamarad, J., Soori, S., & Saadatkah, N., Landslide susceptibility zoning in a catchment of Zagros Mountains using fuzzy logic and GIS: Environmental Earth Sciences, 79(10) (**2020**) 1-10.
- Bai, S., Lü, G., Wang, J., Zhou, P., & Ding, L., GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China: Environmental Earth Sciences, 62(1), (**2011**) 139-149.
- Bamya Merttürk, A., Camaş ve Ahmetli (Fatsa- Ordu) plutonlarının petrolojisi ve jeokronolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, **2019**.
- Bao, H., Zeng, C., Peng, Y., Wu, S., The use of digital technologies for landslide disaster risk research and disaster risk management: progress and prospects: Environmental Earth Sciences, 81(18) (**2022**) 446.
- Baral, G., & Aslan, S. T., Bulanık maliyet tahminlemesi: Muhasebe ve Denetime Bakış, 17(53) (**2018**) 199-214.
- Bauduceau, N., Berry, P., Cecchi, C., Elmqvist, T., Fernandez, M., Hartig, T., ... & Tack, J., Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the horizon 2020 expert group

- on'nature-based solutions and re-naturing cities: Publications Office of the European Union, Bruxelles, (2015) pp.76 doi: 10.2777/765301.
- Bayar, R. & Karabacak, K., Ankara İli Arazi Örtüsü Değişimi (2000-2012): Coğrafi Bilimler Dergisi, CBD 15 (1) (2017) 59- 76.
- Bayazıt, M., & Önöz, B., Türkiye'deki en büyük taşkınların zarf eğrileri: İMO Teknik Dergi, (2004) 3125-3130.
- Beguiría, S., Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management: Natural Hazards, 37 (2006) 315-329.
- Bektaş, O., Yılmaz, C., & Taşlı, K., Doğu Pontid yay gerisi havzasında derin yayılma çukurlarının oluşumu (KD Türkiye), Neo-Tetis' in pasif kıta kenarı evrimi, KTÜ Jeoloji Mühendisliği Bölümü 30. Yıl Sempozyumu Bildiriler Kitabı, I, 1995, 263, 274.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant: Hydrological sciences journal, 24(1) (1979) 43-69.
- Bilgin, S., Frekans oranı yöntemi ile Ulubey ilçesinin (Ordu) heyelan duyarlılık analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 2019.
- Bilgen, İ., İnsan ve HIV-1 proteinleri arasındaki etkileşimlerin rastgele orman yöntemi ve birlikte öğrenme yaklaşımı ile tahmin edilmesi.Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- Breiman, L., Random forests: Machine learning, 45(1) (2001) 5-32.
- Breiman, L., & Cutler, A., State of the art of data mining using Random forest, In Proceedings of the Salford Data Mining Conference, San Diego, USA, 2012, pp. 24-25.
- Brideau, M. A., Vilder, S. D., Massey, C., Mitchell, A., McDougall, S., & Aaron, J., Empirical Relationships to Estimate the Probability of Runout Exceedance for Various Landslide Types, In Workshop on World Landslide Forum, Springer, Cham, 2020, pp. 321-327.
- Brunsdon, D., Landslide types, mechanisms, recognition, identification, In landslides in the South Wales coalfield, edited by: Morgan, CS, Proceedings Symposium, 1985, pp. 1-3.
- Budimir, M. E. A., Atkinson, P. M., & Lewis, H. G., Seismically induced landslide hazard and exposure modelling in Southern California based on the 1994 Northridge, California earthquake event: Landslides, 12, (2015) 895-910.
- Büschelberger, M., Wilk, J., Hergarten, S., & Preusser, F., Size–frequency distribution of shallow landslides in the Black Forest, Germany: Earth Surface Processes and Landforms, 47(1) (2022) 179-192.

- Calderoni, L., Ferrara, M., Franco, A., & Maio, D., Indoor localization in a hospital environment using random forest classifiers. *Expert Systems with Applications*, 42(1) (2015) 125-134.
- Capobianco, V., Uzielli, M., Kalsnes, B., Choi, J. C., Strout, J. M., von der Tann, L., ... & Lacasse, S., Recent innovations in the LaRiMiT risk mitigation tool: implementing a novel methodology for expert scoring and extending the database to include nature-based solutions: *Landslides*, 19(7) (2022) 1563-1583.
- Cardinali, M., Guzzetti, F., & Brabb, E. E., Preliminary maps showing landslide deposits and related features in New Mexico (No. 90-293), US Geological Survey, 1990.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., ... & Salvati, P., A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1/2) (2002) 57-72.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P., Gis Technology in Mapping Landslide Hazard: *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, (1995) 135–175. doi:10.1007/978-94-015-8404-3_8.
- Castellanos Abella, E. A., & Van Westen, C. J., Development of a system for landslide risk assessment for Cuba: hdl: 1874/44080# AGGREGATION CHAPTER 4, (2005) 1-10.
- Cevik, E., & Topal, T., Relocation of a problematic segment of a natural gas pipeline using GIS-based landslide susceptibility mapping, Hendek (Turkey): *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: A European Perspective*, (2004) 265-274.
- Cha, D., Hwang, J., & Choi, B., Landslides detection and volume estimation in Jinbu area of Korea: *Forest science and technology*, 14(2) (2018) 61-65.
- Chen, C. Y., Numerical analysis of slope stabilization concepts using piles, University of Southern California, 2001.
- Chen, H., & Lee, C. F., Geohazards of slope mass movement and its prevention in Hong Kong: *Engineering Geology*, 76(1-2) (2004) 3-25.
- Chen, W., Li, X., Wang, Y., Chen, G., & Liu, S., Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China: *Remote sensing of environment*, 152 (2014) 291-301.
- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D. T., ... & Ma, J., A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility: *Catena*, 151 (2017) 147-160.
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., & Xie, X., GIS-based landslide susceptibility evaluation using certainty factor and index of entropy ensembled

- with alternating decision tree models: Natural hazards GIS-based spatial modeling using data mining techniques, (2019) 225-251.
- Chen, W., and Li, Y., GIS-based evaluation of landslide susceptibility using hybrid computational intelligence models: *Catena* 195, (2020) 104777. doi:10.1016/j.catena.2020.104777.
- Chen, W., Chen, X., Peng, J., Panahi, M., & Lee, S., Landslide susceptibility modeling based on ANFIS with teaching-learning-based optimization and Satin bowerbird optimizer: *Geoscience Frontiers*, 12(1) (2021) 93-107.
- Chu, L., Wang, L. J., Jiang, J., Liu, X., Sawada, K., & Zhang, J., Comparison of landslide susceptibility maps using random forest and multivariate adaptive regression spline models in combination with catchment map units: *Geosciences Journal*, 23(2) (2019) 341-355.
- Ciurean, R. L., Schröter, D., & Glade, T., Conceptual frameworks of vulnerability assessments for natural disasters reduction: Approaches to disaster management-Examining the implications of hazards, emergencies and disasters, (2013) 1-32.
- Colkesen, I., Sahin, E. K., & Kavzoglu, T., Susceptibility mapping of shallow landslides using kernel-based Gaussian process, support vector machines and logistic regression: *Journal of African Earth Sciences*, 118 (2016) 53-64.
- Conoscenti, C., Di Maggio, C., & Rotigliano, E., GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy): *Geomorphology*, 94(3-4) (2008) 325-339.
- Copernicus Europe's eyes on Earth, <https://land.copernicus.eu/> (Erişim tarihi: 11 Eylül 2023).
- Corominas, J., The angle of reach as a mobility index for small and large landslides: *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2) (1996) 260-271.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J., Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra: *Natural Hazards*, 30(3) (2003) 421-435.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., ... & Smith, J. T., Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk: *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73 (2014) 209-263.
- Cornforth, D. H., Landslides in practice. Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils, (2005).
- Crovelli, R. A. (2000). Probability models for estimation of number and costs of landslides: *foot (ft)*, 25 (2000) 0-3048.
- Crozier, M. J., & Glade, T., Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach: *Landslide hazard and risk*, (2005) 1-40.

- Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., ... & Lei, Y., Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk: Geography and Sustainability, 2(3) (2021) 216-223.
- Cutler, A., Cutler, D. R., Stevens, J. R., Tree-based Methods, Chap. 5. High-Dimensional Data Analysis in Cancer Research: Springer, New York, (2013) 400.
- Çellek, S., Sinop-Gerze yöresinin heyelan duyarlılık analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2013.
- Çetinkaya, S., Yenice (Karabük) Bölgesinin Heyelan Tehlikesinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2019.
- Çiğdem, R., Üretim maliyetlerinin gri tahmin ve bulanık mantık yöntemleri ile hesaplanması: bir tarım işletmesi uygulaması, Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 2022.
- Çil, E., Erdemli (Mersin) yöresinin coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan olası tehlike değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2009.
- Çivi, A., Akgündüz, E., Kalaycı, K., İnan, Ç., Sarıca, E., & Toru, E., CORINE (Coordination of Information on the Environment) projesi, TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 200, 02-06, 2009.
- Dağ, S., Çayeli (Rize) ve çevresinin istatistiksel yöntemlerle heyelan duyarlılık analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2007.
- Dağdelenler, G., Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde örneklem ve doğrulama stratejilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J. X. Z. W., & Xu, Z. W., Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong: Environmental geology, 40 (2001) 381-391.
- Dai, F. C., & Lee, C. F., Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong: Geomorphology, 42(3-4) (2002) 213-228.
- Dang, V. H., Hoang, N. D., Nguyen, L. M. D., Bui, D. T., & Samui, P., A novel GIS-based random forest machine algorithm for the spatial prediction of shallow landslide susceptibility: Forests, 11(1) (2020) 118.
- Das, G., & Lepcha, K., Application of logistic regression (LR) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Relli Khola river basin of Darjeeling Himalaya, India: SN Applied Sciences, 1 (2019) 1-22.
- Davies, T. R., Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization: Rock mechanics, 15 (1982) 9-24.
- Davies, T., Reducing landslide disaster impacts. In Landslide hazards, risks, and disasters, Elsevier, 2022, pp. 623-639.

- Dehnavi, A., Aghdam, I. N., Pradhan, B., & Varzandeh, M. H. M., A new hybrid model using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran: *Catena*, 135 (2015) 122-148.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... & Althuwaynee, O. F., Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya: *Natural hazards*, 65 (2013) 135-165.
- Di Baldassarre, G., Castellarin, A., & Brath, A., Relationships between statistics of rainfall extremes and mean annual precipitation: an application for design-storm estimation in northern central Italy: *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4) (2006) 589-601.
- Dietterich, T. G., An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: Bagging, boosting and randomization: *Machine learning*, 32 (1998) 1-22.
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Acharya, S., & Dorji, K., Estimating rainfall thresholds for landslide occurrence in the Bhutan Himalayas: *Water*, 11(8) (2019) 1616.
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Jena, R., Drukpa, D., & Alamri, A. M., Temporal probability assessment and its use in landslide susceptibility mapping for eastern Bhutan: *Water*, 12(1) (2020) 267.
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Acharya, S., & Alamri, A. M., Spatial landslide risk assessment at Phuentsholing, Bhutan: *Geosciences*, 10(4) (2020) 131.
- Doğru, B., & Güngöroğlu, C., Farklı Meteorolojik İstasyonlara Ait Yağış Değerlerinin Haritalanmasında Etkenliğin Arttırılmasına Dair Bir Uygulama: *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 4(1) (2022) 15-22.
- Dolaş, K., Bulanık mantık yöntemiyle risk değerlendirmesi: Matbaa sektörü örneği, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara*, 2017.
- Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., Yunus, A. P., Song, X., Xu, Y., & Zhu, Z., An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan: *Natural Hazards*, 78 (2015) 1749-1776.
- Dou, J., Yunus, A. P., Bui, D. T., Merghadi, A., Sahana, M., Zhu, Z., ... & Pham, B. T., Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall-induced landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan: *Science of the total environment*, 662 (2019) 332-346.
- Dou, J., Yunus, A. P., Bui, D. T., Merghadi, A., Sahana, M., Zhu, Z., ... & Pham, B. T., Improved landslide assessment using support vector machine with bagging, boosting, and stacking ensemble machine learning framework in a mountainous watershed, Japan: *Landslides*, 17 (2020) 641-658.

- Dölek, İ., Bolaman Çayı Havzasının (Ordu) Uygulamalı Jeomorfoloji Etüdü, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, **2008**.
- Du, J., Glade, T., Woldai, T., Chai, B., & Zeng, B., Landslide susceptibility assessment based on an incomplete landslide inventory in the Jilong Valley, Tibet, Chinese Himalayas: *Engineering Geology*, 270 (**2020**) 105572.
- Dunn, M., & Hickey, R., The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS: *Cartography*, 27(1) (**1998**) 9-15.
- Eastman, J. R., IDRISI Andes guide to GIS and image processing, Clark University, Worcester, 328 (**2006**).
- Egeran, N. (1947). *Tectonique de la Turquie et relations etc.* Impr. G. Thomas, Nancy. ve LAHN, E. (1948), *Türkiye jeolojisi*, Ankara, (**1947**).
- Einstein, H. H., Landslide risk — systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide risk assessment*, Balkema, Rotterdam, **1997**, pp. 51–109.
- Elmas, Ç., *Yapay Zeka Uygulamaları: Seçkin Yayıncılık*, Ankara, **2007**, ISBN:9789750206146 9750206142.
- Erbaş, M., Coğrafi bilgi sistemlerinde bulanık mantık yöntemiyle üç boyutlu arazi analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, **2012**.
- Ercanoğlu, M., & Gökçeoğlu, C., Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey): *Engineering geology*, 75(3-4) (**2004**) 229-250.
- Ercanoğlu, M., Gokceoglu, C., Th, W., & Van Asch, J., Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques: *Natural Hazards*, 32(1) (**2004**) 1.
- Ercanoğlu, M., Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6) (**2005**) 979-992.
- Erener, A., Mutlu, A., & Düzgün, H. S., A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM): *Engineering geology*, 203 (**2016**) 45-55.
- Ergunay, O., A perspective of disaster management in Turkey: issues and prospects. Urban settlements and natural disasters, in *Proceedings of UIA Region II Workshop*, **1999**, pp. 1–9.
- Ersayın, K., Heyelan duyarlılığı analizine bir örnek: İyidere Havzası (Rize), Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, **2021**.
- Ertuğrul, İ., Akademik performans değerlendirmede bulanık mantık yaklaşımı: *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 20(1) (**2006**) 155-176.

- Evans, M. J., & Rosenthal, J. S., Probability and statistics: The science of uncertainty, Macmillan, **2004**.
- Evcimen, O., Tuncdemir, V., Tok, T., & Metin, Y., Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi'nin jeolojisi (Ordu-Giresun): MTA Doğal Kaynaklar Ve Ekonomi Bülteni, 29 (**2020**) 101-113.
- Fawcett, T., An introduction to ROC analysis: Pattern recognition letters, 27(8) (**2006**) 861-874.
- Fell, R., Landslide risk assessment and acceptable risk: Canadian Geotechnical Journal, 31(2) (**1994**) 261-272.
- Fell, R., and Hartford, D., Landslide risk management. In: Cru- den, D., Fell, R. (Eds.), Landslide Risk Assessment, Balkema, Rotterdam, **1997**, pp. 51–109.
- Fell, R., Ho, K. K., Lacasse, S., & Leroi, E., A framework for landslide risk assessment and management, In Landslide risk management, **2005**, pp. 13-36.
- Fell, R., Glastonbury, J., & Hunter, G., Rapid landslides: the importance of understanding mechanisms and rupture surface mechanics: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 40(1) (**2007**) 9-27.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning: Engineering Geology, 102 (3-4) (**2008**) 99-111.
- Finlay, P. J., The risk assessment of slopes. School of Civil Engineering, Doctoral dissertation, PhD thesis, University of New South Wales, Australia, **1996**.
- Florsheim, J. L., & Nichols, A., Landslide area probability density function statistics to assess historical landslide magnitude and frequency in coastal California: Catena, 109 (**2013**) 129-138.
- Frattoni, P., & Crosta, G. B., The role of material properties and landscape morphology on landslide size distributions: Earth and Planetary Science Letters, 361 (**2013**) 310-319.
- Fu, S., Chen, L., Woldai, T., Yin, K., Gui, L., Li, D., ... & Lian, Z., Landslide hazard probability and risk assessment at the community level: A case of western Hubei, China: Natural Hazards and Earth System Sciences, 20(2) (**2020**) 581-601.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P., Comparing landslide inventory maps: Geomorphology, 94(3-4) (**2008**) 268-289.
- Gao, Z., Ding, M., Huang, T., Liu, X., Hao, Z., Hu, X., Chuanjie, X., Landslide risk assessment of high-mountain settlements using Gaussian process classification combined with improved weight-based generalized objective function: International Journal of Disaster Risk Reduction, 67 (**2022**) 102662.

- Gayen, A., & Saha, S., Deforestation probable area predicted by logistic regression in Pathro river basin: a tributary of Ajay River: *Spatial Information Research*, 26(1) (2018) 1-9.
- Gedikoğlu, A., Pelin, S. ve Özsayar, T., The main lines of geotectonic development in the East Pontids in the Mesozoic areas: *Geochome-I*, (1979) 555-580.
- Gelisli, K., Kaya, T., & Babacan, A. E., Assessing the factor of safety using an artificial neural network: case studies on landslides in Giresun, Turkey: *Environmental Earth Sciences*, 73(12) (2015) 8639-8646.
- Genevois, R., Tecca, P. R., & Genevois, C., Mitigation measures of debris flow and landslide risk carried out in two mountain areas of North-Eastern Italy: *Journal of Mountain Science*, 19(6) (2022) 1808-1822.
- Giannecchini, R., Galanti, Y., & D'Amato Avanzi, G., Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy): *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3) (2012) 829-842.
- Glade, T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis: *Erde*, 134(2) (2003) 123-146.
- Glade, T., & Crozier, M. J., The nature of landslide hazard impact: *Landslide hazard and risk*, (2005) 41-74.
- Glade, T., & Crozier, M. J., *Landslide hazard and risk: concluding comment and perspectives*, *Landslide hazard and risk*, Wiley, Chichester, 767-774, 2005.
- Gomez, H., & Kavzoglu, T., Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela: *Engineering Geology*, 78(1-2) (2005) 11-27.
- Gong, Q. H., Zhang, J. X., & Wang, J., Application of GIS-Based back propagation artificial neural networks and logistic regression for shallow landslide susceptibility mapping in south china-take meijiang river basin as an example: *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1) (2018).
- Goyes-Peñafiel, P., & Hernandez-Rojas, A., Landslide susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: A case study in Popayan, Colombia: *Engineering Geology*, 280 (2021) 105958.
- Gökçeoğlu, C., & Ercanoğlu, M., Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Yerbilimleri*, 22(23) (2001) 189-206.
- Görgülü, V., Rastgele ormanlar yöntemi ile özellik seçimi kullanılarak van ilinde yaşayanların trafikte algı ve tutumlarının belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 2021.
- Görüm, T., & Fidan, S., Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey: *Landslides*, 18(5) (2021) 1691-1705.

- Gray, D. H., & Sotir, R. B., Biotechnical stabilization of highway cut slope: *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9) (1992) 1395-1409.
- Guillard-Gonçalves, C., & Zêzere, J. L., Combining social vulnerability and physical vulnerability to analyse landslide risk at the municipal scale: *Geosciences*, 8(8) (2018) 294.
- Guo, D., Hamada, M., He, C., Wang, Y., & Zou, Y., An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area: *Landslides*, 11 (2014) 281-291.
- Guo, Z., Chen, L., Yin, K., Shrestha, D. P., & Zhang, L., Quantitative risk assessment of slow-moving landslides from the viewpoint of decision-making: A case study of the Three Gorges Reservoir in China: *Engineering geology*, 273 (2020) 105667.
- Gupta, S., Singh, D., Singh, K. P., & Kumar, S., An efficient use of random forest technique for SAR data classification, In 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015, pp. 3286-3289. IEEE.
- Guthrie, R. H., & Evans, S. G., Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 29(11) (2004) 1321-1339.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P., Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy: *Geomorphology*, 31(1-4) (1999) 181-216.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A., Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy: *Environmental management*, 25(3) (2000).
- Guzzetti, F., Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy: *Engineering Geology*, 58(2) (2000) 89-107.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F., Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale: *Geomorphology*, 72(1-4) (2005) 272-299.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M., Estimating the quality of landslide susceptibility models: *Geomorphology*, 81(1-2) (2006) 166-184.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., & Valigi, D., Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy: *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4) (2009) 222-229.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T., Landslide inventory maps: New tools for an old problem: *Earth-Science Reviews*, 112(1-2) (2012) 42-66.

- Gülibrahimoğlu, İ., Arsin - Araklı - Sürmene - Çaykara güneyi ile Bayburt kuzeyi yörelerindeki Cu-Pb-Zn-Fe-Mn Cevherleşmelerine ait 1/25.000 ölçekli maden jeolojisi raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Rapor No:8039, Ankara, **1986**. (yayımlanmamış).
- Gültekin, F., & Temizel, E. H., Kentsel Faaliyetlerin Kıyı Akiferlerine Etkileri: Doğu Karadeniz Havzası Örneği: Türkiye Jeoloji Bülteni, 63(1) (**2020**) 69-82.
- Güneş, M., & İncekırık, A., Ege bölgesinde faaliyet gösteren KOSGEB kapsamındaki farklı ölçeklerdeki şirketlerin (KOBİ) bulanık kümeleme analizi ile gruplandırılması: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(4) (**2016**) 314-323.
- Güngör, M., Ki-kare testi üzerine: Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 7(1) (**2008**) 84-89.
- Güven, H., Doğu Karadeniz Bölgesi'nin 1/100.000 ölçekli kompilasyon çalışması, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, **1990**. (yayımlanmamış).
- Güven, H., Doğu Pontidler'in jeolojisi ve 1/250.000 ölçekli kompiyasyonu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, **1993**. (yayımlanmamış).
- Habumugisha, J. M., Chen, N., Rahman, M., Islam, M. M., Ahmad, H., Elbeltagi, A., & Dewan, A., Landslide susceptibility mapping with deep learning algorithms: Sustainability, 14(3) (**2022**) 1734.
- Hasan, M., Mehedi, A., Nasser, M., Pal, B., & Ahmad, S., Support vector machine and random forest modeling for intrusion detection system (IDS): Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 6(01) (**2014**) 45-52.
- Haque, U., Blum, P., Da Silva, P. F., Andersen, P., Pilz, J., Chalov, S. R. & Keellings, D., Fatal landslides in Europe: Landslides, 13(6) (**2016**)1545-1554.
- He, Q., Xu, Z., Li, S., Li, R., Zhang, S., Wang, N., ... & Chen, W., Novel entropy and rotation forest-based credal decision tree classifier for landslide susceptibility modeling: Entropy, 21(2) (**2019**) 106.
- Heim, A., Bergsturz und menschenleben (No. 20), Fretz & Wasmuth, **1932**.
- Hemasinghe, H., Rangali, R. S., Deshapriya, N. L., & Samarakoon, L., Landslide susceptibility mapping using logistic regression model (a case study in Badulla District, Sri Lanka): Procedia engineering, 212 (**2018**) 1046-1053.
- Hepbilgin, B., & Koç. T., Bölgesel sıcaklık ve yağış verilerine göre kazdağı ve yakın çevresinin ikliminde öngörülen değişiklikler (2000-2099): Marmara Coğrafya Dergisi, (37) (**2018**) 253-270.
- Hervás, J., Landslide inventory, In: Bobrowky PT (ed), Encyclopedia of natural hazards Springer Heidelberg, **2012**.

- Hidalgo, C. A., Vega, J. A., Probabilistic landslide risk assessment in water supply basins: La Liboriana River Basin (Salgar-Colombia): Natural hazards, 109(1) (2021) 273-301.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T., The landslide handbook: a guide to understanding landslides, Reston, VA, USA: US Geological Survey, 2008, p. 129.
- Ho, K., Leroi, E., & Roberds, B., Quantitative risk assessment: application, myths and future direction, In ISRM International Symposium, OnePetro, 2000.
- Hong, H., Miao, Y., Liu, J., & Zhu, A. X., Exploring the effects of the design and quantity of absence data on the performance of random forest-based landslide susceptibility mapping: Catena, 176 (2019) 45-64.
- Horning, N., Random Forests: An algorithm for image classification and generation of continuous fields data sets, In Proceedings of the International Conference on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, Osaka, Japan, Vol. 911, 2010, pp. 1-6.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L., The Varnes classification of landslide types, an update: Landslides, 11 (2014) 167-194.
- Hurst, M. D., Ellis, M. A., Royse, K. R., Lee, K. A., & Freeborough, K., Controls on the magnitude-frequency scaling of an inventory of secular landslides: Earth Surface Dynamics, 1(1) (2013) 67-78.
- Hussain, M. A., Chen, Z., Kalsoom, I., Asghar, A., & Shoaib, M., Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithm: a case study along Karakoram Highway (KKH), Pakistan: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 50(5) (2022) 849-866.
- Hutchinson, J. N., General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, In Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1988, pp. 3-35.
- Işık, F., Bahadır, M., & Çağlak, S., Artvin İlinde Yağışın Mekansal Dağılışı Üzerine Bir Deneme, Schreiber Formülü, Uluslararası Artvin Sempozyumu, 2018, pp.18-20.
- Iverson, R. M., George, D. L., Allstadt, K., Reid, M. E., Collins, B. D., Vallance, J. W., ... & Bower, J. B., Landslide mobility and hazards: implications of the 2014 Oso disaster: Earth and Planetary Science Letters, 412 (2015) 197-208.
- İlker, A., Terzi, Ö., & Şener, E., Yağışın Alansal Dağılımının Haritalandırılmasında Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Akdeniz Bölgesi Örneği: Teknik Dergi, 30(3) (2019) 9213-9219.
- İnel, M. N., & Armutlulu, İ. H., Belirsizlik ortamında fuzzy finansal oranlarla karar verme: Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 38(2) (2016) 129-145.

- Jaboyedoff, M., Carrea, D., Derron, M. H., Oppikofer, T., Penna, I. M., & Rudaz, B., A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes: *Engineering Geology*, 267 (2020) 105478.
- Jakob, M., Hungr, O., Hungr, O., McDougall, S., & Bovis, M., Entrainment of material by debris flows: Debris-flow hazards and related phenomena, (2005) 135-158.
- Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S. H., Khaleghi, S., Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment: *Journal of loss prevention in the process industries*, 26(1) (2013) 197-208.
- Ju, L. Y., Xiao, T., He, J., Wang, H. J., Zhang, L. M., Predicting landslide runout paths using terrain matching-targeted machine learning: *Engineering Geology*, 311 (2022) 106902.
- Juang, C. H., Lee, D. H., & Sheu, C., Mapping slope failure potential using fuzzy sets: *Journal of geotechnical engineering*, 118(3) (1992) 475-494.
- Kaba, E., Heyelanlarda stabilite yöntemleri ve geogrid donatılı duvar kullanılarak bir heyelanın stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- Kahyaoglu, M. R., İmançlı, G., Özden, G., & Kayalar, A. Ş., Numerical simulations of landslide-stabilizing piles: a remediation project in Söke, Turkey: *Environmental Earth Sciences*, 76 (2017) 1-14.
- Kalafat, O., Ortahisar (Trabzon) ilçesinin olasılıksal yöntem tabanlı heyelan duyarlılık değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2021.
- Kalecik, S. K., Ordu İlinde Farklı Jeolojik Anamateryaller Üzerinde Oluşan Toprakların Organik Madde-Kil Mineralleri Arasındaki İlişkilerin Yükseklik ve Sıcaklığa Göre Değişimi, Yüksek Lisans Tezi, Ordu Ünivesritesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, 2019.
- Kandemir, Ö., Kuzeydoğu pontidlerin tektonostratigrafik özellikleri ve jeodinamik evrimi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, 2016.
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P., A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas: *Engineering geology*, 85(3-4) (2006) 347-366.
- Karahan, H., & Özkan, E., Ege bölgesi standart süreli yıllık maksimum yağışları için en uygun dağılımlar: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3) (2013) 152-157.
- Karakaş, G., Kocaman, S., & Gökçeoğlu, C., Comprehensive performance assessment of landslide susceptibility mapping with MLP and random forest: a case study after

- Elazig earthquake (24 Jan 2020, Mw 6.8), Turkey: *Environmental Earth Sciences*, 81(5) (2022) 144.
- Karakaş, G., Kocaman, S., & Gökceoğlu, C., A Hybrid Multi-Hazard Susceptibility Assessment Model for a Basin in Elazig Province, Türkiye: *International Journal of Disaster Risk Science*, (2023) 1-16.
- Kavzaoğlu, T., Kutluğ Şahin, E., & Çölkesen, Ğ., Heyelan Duyarlilik Analizinde Ki-kare Testine Dayali Faktör Seçimi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, 14-17 Ekim 2014, İstanbul, 2012.
- Kavzoğlu, T., Sahin, E. K., & Colkesen, I., Selecting optimal conditioning factors in shallow translational landslide susceptibility mapping using genetic algorithm: *Engineering Geology*, 192 (2015) 101-112.
- Kaya, A., Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale residential area (Giresun, NE Turkey): *Bulletin of engineering geology and the environment*, 76 (2017) 875-889.
- Katambara, Z., Ndiritu, J., A fuzzy inference system for modelling streamflow: Case of Letaba River, South Africa: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(10-12) (2009) 688-700.
- Kazmi, D., Qasim, S., Harahap, I. S. H., Baharom, S., Mehmood, M., Siddiqui, F. I., & Imran, M., Slope remediation techniques and overview of landslide risk management: *Civil engineering journal*, 3(3) (2017) 180-189.
- Ketin, İ., Anadolu'nun tektonik birlikleri: *MTA dergisi*, 66(20) (1966).
- Keles, F., Nefeslioglu, H. A., Infinite slope stability model and steady-state hydrology-based shallow landslide susceptibility evaluations: The Guneysu catchment area (Rize, Turkey): *Catena*, 200, (2021) 105161.
- Kim, J. C., Lee, S., Jung, H. S., & Lee, S., Landslide susceptibility mapping using random forest and boosted tree models in Pyeong-Chang, Korea: *Geocarto international*, 33(9) (2018) 1000-1015.
- Kocaman, S., Tavus, B., Nefeslioglu, H. A., Karakas, G., & Gokceoglu, C., Evaluation of Floods and Landslides Triggered by a Meteorological Catastrophe (Ordu, Turkey, August 2018) Using Optical and Radar Data: *Geofluids*, (2020) 1–18. doi:10.1155/2020/8830661.
- Koç, E., ve Küçükönder, M., Erkenez Havzası CBS Matris Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi: Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 36(1) (2021) 141-154.
- Komac, M., & Ribičič, M., Landslide susceptibility map of Slovenia at scale 1: 250,000: *Geologija*, 49(2) (2006) 295-309.
- Kurt, İ., Özkan, M. K., Karşlı, Ş., Çolak, T. & Topçu, T., Doğu Karadeniz Bölgesinin Jeodinamik ve Metalojenik Evrimi, MTA Der. Rap. No. 10875, Ankara, 2006.

- Lacasse, S., & Nadim, F., Landslide risk assessment and mitigation strategy: Landslides–disaster risk reduction, (2009) 31-61.
- Lari, S., Frattini, P., & Crosta, G. B., A probabilistic approach for landslide hazard analysis: Engineering geology, 182 (2014) 3-14.
- Larsen, I. J., Montgomery, D. R., & Korup, O., Landslide erosion controlled by hillslope material: Nature Geoscience, 3(4) (2010) 247-251.
- Lee, C. F., Ye, H., Yeung, M. R., Shan, X., & Chen, G., AIGIS-based methodology for natural terrain landslide susceptibility mapping in Hong Kong: Episodes Journal of International Geoscience, 24(3) (2001) 150-159.
- Lee, S., Choi, J., & Min, K., Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model: Environmental Geology, 43 (2002) 120-131.
- Lee, S., & Pradhan, B., Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models: Landslides, 4(1) (2007) 33-41.
- Legros, F., The mobility of long-runout landslides: Engineering Geology, 63 (2002) 301-331.
- Lei, Y., Huang, J., Cui, Y., Jiang, S. H., Wu, S., Ching, J., Time capsule for landslide risk assessment. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, (2023) 1-22.
- Leone, F., Asté, J. P., & Leroi, E., Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception: Landslides-Glissements de Terrain, Balkema, Rotterdam, (1996) 263-270.
- Leroi, E., Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments, In Landslides, 1996, pp. 35-51.
- Li, Z., Nadim, F., Huang, H., Uzielli, M., & Lacasse, S., Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards: Landslides, 7, (2010) 125-134.
- Liaw, A., & Wiener, M., Classification and Regression by randomForest: R News, 2 (3) (2002) 18-22.
- Liu, X., & Miao, C., Large-scale assessment of landslide hazard, vulnerability and risk in China: Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9(1) (2018) 1037-1052.
- Liu, Y., Chen, H., Zhang, L., & Feng, Z., Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach: Energy Reports, 7 (2021) 5003-5012.
- Logar, J., Cuomo, S., & Arbanas, Ž., Introduction: Landslide Mitigation, Remediation and Stabilization: In Advancing Culture of Living with Landslides, Volume 3 Advances in Landslide Technology, (2017) 441-444. Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-319-53487-9_51

- Louppe, G., Wehenkel, L., Sutera, A., & Geurts, P., Understanding variable importances in forests of randomized trees: *Advances in neural information processing systems*, 26 (2013).
- Lu, P., Catani, F., Tofani, V., & Casagli, N., Quantitative hazard and risk assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry: *Landslides*, 11 (2014) 685-696.
- Lucchese, L. V., de Oliveira, G. G., & Pedrollo, O. C., Attribute selection using correlations and principal components for artificial neural networks employment for landslide susceptibility assessment: *Environmental monitoring and assessment*, 192(2) (2020) 1-22.
- Mahapatra, S. S., Nanda, S. K., & Panigrahy, B. K., A Cascaded Fuzzy Inference System for Indian river water quality prediction: *Advances in Engineering Software*, 42(10) (2011) 787-796.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P., Landslide inventories and their statistical properties: *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6) (2004) 687-711.
- Małka, A., Landslide susceptibility mapping of Gdynia using geographic information system-based statistical models: *Natural Hazards*, 107(1) (2021) 639-674.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller: *International journal of man-machine studies*, 7(1) (1975) 1-13.
- Mamdani, E. H., Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis: *IEEE transactions on computers*, 100(12) (1977) 1182-1191.
- Martha, T. R., Roy, P., Jain, N., Khanna, K., Mrinalni, K., Kumar, K. V., & Rao, P. V. N., Geospatial landslide inventory of India—an insight into occurrence and exposure on a national scale: *Landslides*, 18(6) (2021) 2125-2141.
- McDougall, S., 2014 Canadian Geotechnical Colloquium: Landslide runout analysis—current practice and challenges: *Canadian Geotechnical Journal*, 54(5) (2017) 605-620.
- Meinhardt, M., Fink, M., & Tünschel, H., Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics: *Geomorphology*, 234 (2015) 80-97.
- Meier, C., Jaboyedoff, M., Derron, M. H., & Gerber, C., A method to assess the probability of thickness and volume estimates of small and shallow initial landslide ruptures based on surface area: *Landslides*, 17(4) (2020) 975-982.
- Meral, A., & Eroğlu, E., Evaluation of flood risk analyses with AHP, Kriging, and weighted sum models: example of Çapakçur, Yeşilköy, and Yamaç microcatchments: *Environmental Monitoring and Assessment*, 193 (2021) 1-15.

- Mitchell, A., McDougall, S., Whittall, J., Brideau, M. A., & McClarty, D., New empirical-statistical tools for the analysis of rock avalanche runout, In Proceedings of the 7th Canadian Geohazards Conference, Canmore, AB, Canada, **2018**, pp. 3-6.
- Moharrami, M., Naboureh, A., Gudiyangada Nachappa, T., Ghorbanzadeh, O., Guan, X., & Blaschke, T., National-scale landslide susceptibility mapping in Austria using fuzzy best-worst multi-criteria decision-making: ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(6) (**2020**) 393.
- Mondal, S., & Mandal, S., RS & GIS-based landslide susceptibility mapping of the Balason River basin, Darjeeling Himalaya, using logistic regression (LR) model: Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 12(1) (**2018**) 29-44.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R., Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications: Hydrological processes, 5(1) (**1991**) 3-30.
- Moosavi, V., Talebi, A., & Shirmohammadi, B., Producing a landslide inventory map using pixel-based and object-oriented approaches optimized by Taguchi method: Geomorphology, 204 (**2014**) 646-656.
- Morgan, R. P., & Rickson, R. J., Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach, Taylor & Francis, **2003**.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Sarfaraz, F., Landslide risk assessment based on susceptibility and vulnerability: Environment, Development and Sustainability, (**2023**) 1-19.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., & Khire, M. V., Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions: Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58 (**2000**) 275-287.
- Nahayo, L., Nsengiyumva, J. B., Mupenzi, C., Mind'je, R., & Nyesheja, E. M., Climate change vulnerability in Rwanda, east Africa: International Journal of Geography and Geology, 8(1) (**2019**) 1-9.
- Nandi, A., & Shakoor, A., A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses: Engineering Geology, 110(1-2) (**2010**) 11-20.
- Nasr, A. S., Rezaei, M., & Barmaki, M. D., Analysis of groundwater quality using Mamdani fuzzy inference system (MFIS) in Yazd Province, Iran: International Journal of Computer Applications, 59(7) (**2012**).
- Naumann, E., Die grundlinien Anatoliens und Centralasiens: Geographische Zeitschrift, 2(1. H) (**1896**) 7-25.

- Neaupane, K. M., & Piantanakulchai, M., Analytic network process model for landslide hazard zonation: *Engineering geology*, 85(3-4) (2006) 281-294.
- Nefeslioğlu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H., An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps: *Engineering Geology*, 97(3-4) (2008) 171-191.
- Nefeslioğlu, H. A., Duman, T. Y., & Durmaz, S., Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey): *Geomorphology*, 94(3-4) (2008) 401-418.
- Nefeslioğlu, H. A., & Gokceoglu, C., Probabilistic risk assessment in medium scale for rainfall-induced earthflows: Catakli catchment area (Cayeli, Rize, Turkey): *Mathematical Problems in Engineering*, (2011).
- Nefeslioğlu, H. A., San, B. T., Gokceoglu, C., & Duman, T. Y., An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping: *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 14(1) (2012) 40-60.
- Nilsen, T. H., Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California (Vol. 944), Department of the Interior, Geological Survey, 1979.
- Nor Diana, M. I., Muhamad, N., Taha, M. R., Osman, A., & Alam, M. M., Social vulnerability assessment for landslide hazards in Malaysia: A systematic review study: *Land*, 10(3) (2021) 315.
- Ondoğan, A., Bulanık Mantık Tabanlı Uyarlamalı Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi , Eskişehir, 2022.
- Ontigao, J. A. R., & Sayao, A. S. F. J., Handbook of slope stabilization, 2004.
- Orhan, O., Bilgilioglu, S. S., Kaya, Z., Ozcan, A. K., & Bilgilioglu, H., Assessing and mapping landslide susceptibility using different machine learning methods: *Geocarto International*, 37(10) (2022) 2795-2820.
- Ösna, T., GIS Tabanlı Bir Mamdani Bulanık Çıkarsama Aracının Geliştirimi ve Heyelan Duyarlılık Haritası Üretimine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- Özdemir, M., Bolaman Çayı Havzasının Coğrafyası, 2006.
- Özdemir, A., Alaybeyoglu, A., & Balbal, K. F., Bulanık mantığın eğitim alanındaki uygulamaları: *Bilim Eğitim Sanat ve Teknoloji Dergisi*, 3(1) (2019) 45-50.
- Özsayar, T., Pelin, S., & Gedikoğlu, A., Doğu Pontidler'de Kretase: *KTÜ Yer Bilimleri Dergisi*, 1 (1981) 65-114.
- Özür, N., ve Ataol, M., Türkiye'de CORINE verilerinin kullanılmasına dair değerlendirme: *Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(2) (2018) 110-130.

- Pal, S. C., & Chowdhuri, I., GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using frequency ratio model of Lachung River basin, North Sikkim, India: *SN Applied Sciences*, 1(5) (2019) 1-25.
- Pan, Y. W., Zheng, Y. M., Li, K. W., & Liao, J. J., Framework for the preliminary risk classification of slopes prone to large failure: *Engineering Geology*, 287 (2021) 106124.
- Panchal, S., & Shrivastava, A. K., Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India: *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3) (2022) 101626.
- Panigrahi, R. K., Different Sets of Remediation for Mitigation of Landslides in Hilly Terrains of India, In: Satyanarayana Reddy CNV et al. (eds.), *Stability of Slopes and Underground Excavations, Lecture Notes in Civil Engineering 185*, Springer, Singapore, 2022, pp 133-144.
- Park, S., & Kim, J., Landslide susceptibility mapping based on random forest and boosted regression tree models, and a comparison of their performance: *Applied Sciences*, 9(5) (2019) 942.
- Pepe, G., Baudinelli, E., Zanini, M., Calcaterra, D., Cevasco, A., Scarpellini, P., & Firpo, M., Application of Bioengineering Techniques as Geo-Hydrological Risk Mitigation Measures in a Highly Valuable Cultural Landscape: Experiences from the Cinque Terre National Park (Italy): *Sustainability*, 12(20) (2020) 8653.
- Pereira, S., Santos, P. P., Zêzere, J. L., Tavares, A. O., Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C., A landslide risk index for municipal land use planning in Portugal: *Science of the Total Environment*, 735 (2020) 139463.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., & Glade, T., Assessing the quality of landslide susceptibility maps—case study Lower Austria: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1) (2014) 95-118.
- Phong, T. V., Phan, T. T., Prakash, I., Singh, S. K., Shirzadi, A., Chapi, K., ... & Pham, B. T., Landslide susceptibility modeling using different artificial intelligence methods: A case study at Muong Lay district, Vietnam: *Geocarto International*, 36(15) (2021) 1685-1708.
- Pınarlık, M., Kardoğan, P. S. Ö., & Demircan, R. K., Şev stabilitesine zemin özelliklerinin etkisinin limit denge yöntemi ile irdelenmesi: *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3) (2017) 675-684.
- Popescu, M., International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, C. on LR (Chairman: MP, 69-74, 2001.
- Popescu, M. E., Landslide causal factors and landslide remedial options, In 3rd international conference on landslides, slope stability and safety of infrastructures, 2002, pp. 61-81. CI-Premier PTE LTD Singapore.

- Pourghasemi, H.R., Pradhan B., & Gokceoglu, C., Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed Iran: *Natural Hazards* 63(2) (2012) 965–996. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>
- Pourghasemi, H. R., & Kerle, N., Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran: *Environmental earth sciences*, 75(3) (2016) 1-17.
- Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O., Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision?: *Catena*, 162 (2018) 177-192.
- Pradhan, B., Lee, S., & Buchroithner, M. F., Use of geospatial data and fuzzy algebraic operators to landslide-hazard mapping: *Applied Geomatics*, 1(1) (2009) 3-15.
- Priestnall, G., Jaafar, J., & Duncan, A., Extracting urban features from LiDAR digital surface models: *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(2) (2000) 65-78.
- Prodan^o, M. V., Krkač^o, M., Arbanas^o, S. M., & Arbanas^ol, Ž., Remediation measures on a deep-seated slow-moving landslide, 2019.
- Qiu, H., Cui, Y., Hu, S., Yang, D., Pei, Y., & Yang, W., Temporal and spatial distributions of landslides in the Qinba Mountains, Shaanxi Province, China: *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1) (2019) 599-621.
- Qiu HJ, Hu S, Wang X, Yang D, Pei Y, Ma S., Size and spatial distribution of loess slides on the Chinese Loess Plateau: *Phys Geogr* 41 (2020b) 126–144.
- Radbruch-Hall, D. H., Colton, R. B., Davies, W. E., Lucchitta, I., Skipp, B. A., & Varnes, D. J., *Landslide overview map of the conterminous United States (No. 1183)*, US Geological Survey, 1982.
- Rahman, G., Bacha, A. S., Ul Moazzam, M. F., Rahman, A. U., Mahmood, S., Almohamad, H., ... & Abdo, H. G., Assessment of landslide susceptibility, exposure, vulnerability, and risk in shahpur valley, eastern hindu kush: *Frontiers in Earth Science*, (2022) 1348.
- Ram, P., & Gupta, V., Landslide hazard, vulnerability, and risk assessment (HVRA), Mussoorie township, lesser himalaya, India: *Environment, Development and Sustainability*, 24(1) (2022) 473-501.
- Ramesh, G., Slope and landslide stabilization: a review: *Indian J Struct Eng (IJSE)*, 1(2) (2021) 13-16.
- Razifard, M., Shoaie, G., & Zare, M., Application of fuzzy logic in the preparation of hazard maps of landslides triggered by the twin Ahar-Varzeghan earthquakes (2012): *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1) (2019) 223-245.

- Reichenbach, P., Guzzetti, F., & Cardinali, M., Map of sites historically affected by landslides and floods, The AVI Project, 2nd edn. CNRGNDICI Publication Number 2116, map at 1:1 200 000 scale, **1998**.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F., A review of statistically-based landslide susceptibility models: *Earth-science reviews*, 180 (2018) 60-91.
- Reis, S., Yalçın, A., Atasoy, M., Nişancı, R., Bayrak, T., Sancar, C., & Ekercin, S., CBS ve uzaktan algılama teknikleri ile heyelan duyarlılık haritalarının üretimi: Rize ili örneği, Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği V. Teknik Sempozyumu (TUFUAB 2009), Ankara, **2009**.
- Remondo, J., Bonachea, J., & Cendrero, A., Probabilistic landslide hazard and risk mapping on the basis of occurrence and damages in the recent past, *Landslides: evaluation and stabilization*, Balkema, Taylor & Francis Group, London, **2004**, 125-130.
- Riaz, M. T., Basharat, M., Brunetti, M. T., Riaz, M. T., Semi-quantitative landslide risk assessment of district Muzaffarabad, northwestern Himalayas, Pakistan: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, (2023) 1-20.
- Roccati, A., Faccini, F., Luino, F., Ciampalini, A., & Turconi, L., Heavy rainfall triggering shallow landslides: A susceptibility assessment by a GIS-approach in a Ligurian Apennine Catchment (Italy): *Water*, 11(3) (2019) 605.
- Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L., GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment: *Land*, 10(2) (2021) 162.
- Rong, G., Li, K., Han, L., Alu, S., Zhang, J., & Zhang, Y., Hazard mapping of the rainfall-landslides disaster Chain based on GeoDetector and Bayesian Network Models in Shuicheng County, China: *Water*, 12(9) (2020) 2572.
- Ross, T. J., *Fuzzy logic with engineering applications*, John Wiley & Sons, **2009**.
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P., Moretti, S., & Casagli, N., Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization: *Landslides*, 15 (2018) 1045-1052.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *NASA Spec. Publ.*, 351(1) **1974** 309.
- Royster, D. L., *Landslide remedial measures: Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 16(2) (1979) 301-352.
- Sabancı, D., Rastgele orman yaklaşımı kullanılarak çok değişkenli uyumlu regresyon seritlerinde model seçimi, Doktora Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, **2019**.
- SafeLand., Revision 2, 7th framework programme, Grant Agreement, No.: 226479, SGI/ICG revision: 1-final, **2010**.

- Saha, A. K., Gupta, R. P. and Arora, M. K., GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas: *International Journal of Remote Sensing*, 23 (2) (2002) pp.357-369.
- Saleem, N., Huq, M. E., Twumasi, N. Y. D., Javed, A., & Sajjad, A., Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: a review: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12) (2019) 545.
- Sarkar, S., Kanungo, D. P., & Sharma, S., Landslide hazard assessment in the upper Alaknanda valley of Indian Himalayas: *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(4) (2015) 308-325.
- Segoni, S., & Caleca, F., Definition of environmental indicators for a fast estimation of landslide risk at national scale: *Land*, 10(6) (2021) 621.
- Serdarevic, A., & Babic, F., Landslide Causes and Corrective Measures—Case Study of the Sarajevo Canton: *Journal of Civil Engineering Research*, 9(2) (2019) 51-57.
- Sevgen, E., Kocaman, S., Nefeslioglu, H. A., & Gokceoglu, C., A novel performance assessment approach using photogrammetric techniques for landslide susceptibility mapping with logistic regression, ANN and random forest: *Sensors*, 19(18) (2019) 3940.
- Scaringi, G., Fan, X., Xu, Q., Liu, C., Ouyang, C., Domènech, G., ... & Dai, L., Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent Xinmo landslide (Sichuan, China): *Landslides*, 15 (2018) 1359-1375.
- Scheidegger, A. E., On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides: *Rock Mech Rock Eng* 5(4) (1973) 231–236. <https://doi.org/10.1007/BF01301796>
- Schreiber, P., Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Z: Meteorol*, 21(10) (1904) 441-452.
- Schuster, R. L., & Highland, L. M., The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66 (2007) 1-27.
- Shano, L., Raghuvanshi, T. K., Meten, M., Fuzzy set theory and pixel-based landslide risk assessment: the case of Shafe and Baso catchments, Gamo highland, Ethiopia: *Earth Science Informatics*, 15(2) (2022) 993-1006.
- Shirvani, Z., A holistic analysis for landslide susceptibility mapping applying geographic object-based random forest: A comparison between protected and non-protected forests: *Remote Sensing*, 12(3) (2020) 434.
- Sim, K. B., Lee, M. L., Wong, S. Y., A review of landslide acceptable risk and tolerable risk: *Geoenvironmental Disasters*, 9(1) (2022) 3.

- Singh, A., Pal, S., Kanungo, D. P., & Pareek, N., An overview of recent developments in landslide vulnerability assessment-presentation of a new conceptual framework, In Workshop on World Landslide Forum, Springer, Cham, **2017**, pp. 795-802.
- Singh, A., Kanungo, D. P., & Pal, S., A modified approach for semi-quantitative estimation of physical vulnerability of buildings exposed to different landslide intensity scenarios: Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 13(1) (**2019**) 66-81.
- Singh, A., Pal, S., Kanungo, D. P., An integrated approach for landslide susceptibility–vulnerability–risk assessment of building infrastructures in hilly regions of India: Environment, Development and Sustainability, 23(4) (**2021**) 5058-5095.
- Sotir, R. B., & Christopher, B. R., Soil Bioengineering: Synergistic Composite Design Systems for Highly Steepened Sites, In Geosynthetics Conference, **2019**, pp. 567-76.
- Stilla, U., Soergel, U., & Thoennessen, U., Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas: ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 58 (1-2) (**2003**) 113-123.
- Suess, E., Das Antlitz der Erde I-III/2, Prag & Leipzig (Tempisky & Freytag), **1885**, 1885-1909.
- Sumiati, S. HT, & Kapuji, A., Mamdani Fuzzy Inference System Application Setting For Traffic Lights: International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), 3(10) (**2014**) 56-62.
- Stark, C. P., & Hovius, N., The characterization of landslide size distributions: Geophysical research letters, 28(6) (**2001**) 1091-1094.
- Sun, D., Xu, J., Wen, H., & Wang, D., Assessment of landslide susceptibility mapping based on Bayesian hyperparameter optimization: A comparison between logistic regression and random forest: Engineering Geology, 281 (**2021**) 105972.
- Sünbül, A. B., ErKaymaz, H., & Rukiye, U. Z. U. N., Zemin sıvılaşma potansiyelinin bulanık mantık ile modellenmesi: Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(2) (**2015**) 101-104.
- Süzen, M. L., & Doyuran, V., Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey: Engineering geology, 71(3-4) (**2004**) 303-321.
- Swets, J. A., Measuring the accuracy of diagnostic systems: Science, 240(4857) (**1988**) 1285-1293.
- Şahin, E. K., Özellik seçimi algoritmaları kullanılarak heyelanda etkili faktörlerin belirlenmesi ve heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, **2017**.

- Şenol, C., The situation of the spatial change in the lower part of the Melet River Basin is affected by potential flooding: *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 40 (2019) 439-453.
- Şimşek, H., Corine 4. seviye arazi örtüsü/kullanım sınıflarının belirlenmesi ve yüzey akış risk haritasının oluşturulması (Bartın çayı havzası örneği), Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2017.
- Taalab, K., Cheng, T., & Zhang, Y., Mapping landslide susceptibility and types using Random Forest: *Big Earth Data*, 2(2) (2018) 159-178.
- Takagi, T., & Sugeno, M., Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control: *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1) (1985) 116-132.
- Tang, M. C., Ho, K. K. S., Chan, T. C. F., & Chan, N. F., The Landslip Preventive Measures Programme of the Hong Kong SAR Government-reflections on achievements, advancement and lessons learnt in past 30 years, *Development, Advancement and Achievement of Geotechnical Engineering in Southeast Asia—40th Anniversary Commemorative Volume of the Southeast Asian Geotechnical Society*, (2007) 337-359.
- Tanyaş, H., van Westen, C. J., Allstadt, K. E., & Jibson, R. W., Factors controlling landslide frequency–area distributions: *Earth surface processes and landforms*, 44(4) (2019) 900-917.
- Taşkanat, T., Evrimsel algoritmalar kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2020.
- Taştemir, M., Karadeniz Bölgesinde Kendir Keten Üretimi ve Kullanım Alanları: *Türk Kültür Dergisi*, 8 (2003) 14-15, İstanbul.
- Taylan, E. D., & Damçayırı, D., Estimation of rainfall values of Isparta region with IDW and Kriging interpolation methods: *Technical J*, 27 (2016) 7551-7559.
- Tebbens, S. F., Landslide scaling: A review: *Earth and Space Science*, 7, (2020) e2019EA000662. <https://doi.org/10.1029/2019EA000662>.
- Tekin, S., Göksu nehri havzasının coğrafi bilgi sistemleri tabanlı jeomorfometrik analizi ve niceliksel heyelan olası tehlike değerlendirmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2019.
- Terlemeç, İ., & Yılmaz, A., Unye-Ordu-Koyulhisar-Resadiye arasında kalan yörenin stratigrafisi, 1980.
- Terzaghi, K., Mechanism of landslides, 1950.
- Tetik Biçer, Ç. (2017). Heyelan risk haritalaması üzerine yarı sayısal bir değerlendirme, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.

- Tezel, K., Beşikdüzü (Trabzon) yöresi heyelan tehlike analizleri, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, **2021**.
- Thiery, Y., Malet, J. P., Sterlacchini, S., Puissant, A., & Maquaire, O., Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment: *Geomorphology*, 92(1-2) (**2007**) 38-59.
- Tien Bui, D., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I., Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree: *Landslides*, 13(2) (**2016**) 361-378.
- Topel, A., Analitik hiyerarşi prosesinin bulanık mantık ortamındaki uygulamaları - bulanık analitik hiyerarşi prosesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, **2006**.
- Tsangaratos, P., & Iliä, I., Comparison of a logistic regression and Naïve Bayes classifier in landslide susceptibility assessments: The influence of models complexity and training dataset size: *Catena*, 145 (**2016**) 164-179.Arbanas.
- Tseng, C. M., Lin, C. W., Stark, C. P., Liu, J. K., Fei, L. Y., & Hsieh, Y. C., Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation: *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(13) (**2013**) 1587-1601.
- Turconi, L., Faccini, F., Marchese, A., Paliaga, G., Casazza, M., Vojinovic, Z., & Luino, F., Implementation of nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction in small mediterranean catchments: The case of Portofino Natural Regional Park, Italy: *Sustainability*, 12(3) (**2020**) 1240.
- Turner, K.A., & Schuster, R.L., Landslides investigation and mitigation, Transportation Research Board, National Research Council, Special Report, **1996**, pp.247, 673.
- Tyagi, A., Tiwari, R. K., & James, N., A Review on Spatial, Temporal and Magnitude prediction of Landslide Hazard: *Journal of Asian Earth Sciences*: X (**2022**) 100099.
- Uğur, D., Mamdani tip bulanık mantık tabanlı sera iklim denetim sistemi tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, **2021**.
- UNDRR, Disaster Risk, 2021, <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk> (Erişim tarihi: 22 Eylül 2023)
- Uvaraj, S., & Neelakantan, R., Fuzzy logic approach for landslide hazard zonation mapping using GIS: A case study of Nilgiris: *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2) (**2018**) 685-698.
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., and Demoulin, A., Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region: *Earth and Planetary Science Letters*, 256 (3-4) (**2007**) 588–603.

- Van Westen, C. J., Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments: *Landslides: evaluation and stabilization*, 1 (2005) 39-56.
- Van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R., Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2) (2005) 167–184. doi:10.1007/s10064-005-0023-0.
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R., Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?: *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65 (2006) 167-184.
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L., Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview: *Engineering geology*, 102(3-4) (2008) 112-131.
- Van Westen, C. J., Alkema, D., Damen, M. C. J., Kerle, N., & Kingma, N. C., Multi-hazard risk assessment: distance education course guide book, United Nations University—ITC School on Disaster Geoinformation Management, Tokyo, Japan, 2009.
- Varnes, D. J., Landslide hazard zonation: a review of principles and practice (No. 3): *Natural Hazards*, Vol. 3, UNESCO, (1984) 63, Paris.
- Vasu, N. N. & Lee, S. R., A hybrid feature selection algorithm integrating an extreme learning machine for landslide susceptibility modeling of Mt. Woomyeon, South Korea: *Geomorphology*, 263 (2016) 50-70.
- Wang, Y., Wen, H., Sun, D., & Li, Y., Quantitative assessment of landslide risk based on susceptibility mapping using random forest and geodetector: *Remote Sensing*, 13(13) (2021) 2625.
- Whittall, J. R., Runout exceedance prediction for open pit slope failures, Doctoral dissertation, University of British Columbia, 2015.
- Whittall, J., Eberhardt, E., & McDougall, S., Runout analysis and mobility observations for large open pit slope failures: *Canadian Geotechnical Journal*, 54(3) (2017) 373-391.
- Wieczorek, G. F., Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 21(3) (1984) 337-342.
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2000.
- Winter, M. G., Harrison, M., Macgregor, F., & Shackman, L., Landslide hazard and risk assessment on the Scottish road network: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(6) (2013) 522-539.
- Wu, C. Y., & Chen, S. C., Integrating spatial, temporal, and size probabilities for the annual landslide hazard maps in the Shihmen watershed, Taiwan: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(9) (2013) 2353-2367.

- Wu, Y., Li, W., Wang, Q., Liu, Q., Yang, D., Xing, M., ... & Yan, S., Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China: *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (2016) 1-16.
- Wubalem, A., Landslide inventory, susceptibility, hazard and risk mapping. In *Landslides*, Intechopen, 2021.
- Xu, C., Xu, X., Shen, L., Yao, Q., Tan, X., Kang, W., ... & Li, K., Optimized volume models of earthquake-triggered landslides: *Scientific Reports*, 6(1) (2016) 29797.
- Yalçın, A. and Bulut, F., Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey): *Natural Hazards*, 41 (1) (2007) pp.201-226.
- Yalçın, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C. and Yomralioglu, T., A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey: *Catena*, 85 (3) (2011) pp.274-287.
- Yang, W., Zhao, Y., Wang, D., Wu, H., Lin, A., & He, L., Using principal components analysis and IDW interpolation to determine spatial and temporal changes of surface water quality of Xin'anjiang river in Huangshan, China: *International journal of environmental research and public health*, 17(8) (2020) 2942.
- Ye, C. M., Wei, R. L., Ge, Y. G., Li, Y., Junior, J. M., & Li, J., GIS-based spatial prediction of landslide using road factors and random forest for Sichuan-Tibet Highway: *Journal of Mountain Science*, 19(2) (2022) 461-476.
- Yılmaz, C., Topal, T. & Suzen, M. L., GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak Turkey): *Environmental Earth Sciences*, 65(7) (2012) 2161-2178.
- Yılmaz, O. S., Frekans oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler Köyü örneği: *Geomatik*, 8(1) (2023) 42-54.
- Youssef, A., Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, using analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models: *Environmental Earth Sciences*, 73 (12) (2015) pp.8499-8518.
- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B., Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models: *Geosciences Journal*, 19, (2015a) 113-134.
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Al-Katheeri, M. M., Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia: *Landslides*, 13(5) (2016) 839-856.

- Yu, L., Zhou, C., Wang, Y., Cao, Y., & Peres, D. J., Coupling Data-and Knowledge-Driven Methods for Landslide Susceptibility Mapping in Human-Modified Environments: A Case Study from Wanzhou County, Three Gorges Reservoir Area, China: *Remote Sensing*, 14(3) (2022) 774.
- Yüksel, N., Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Heyelan Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında İstatistiksel Yöntemlerin ve Yapay Sinir Ağlarının Kullanılması: Kumluca-Ulus (Bartın) Bölgesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2007.
- Zadeh, L., Fuzzy sets: *Inform Control*, 8 (1965) 338-353.
- Zeng, P., Sun, X., Xu, Q., Li, T., Zhang, T., 3D probabilistic landslide run-out hazard evaluation for quantitative risk assessment purposes: *Engineering Geology*, 293 (2021) 106303.
- Zhao, Y., Wang, R., Jiang, Y., Liu, H., & Wei, Z., GIS-based logistic regression for rainfall-induced landslide susceptibility mapping under different grid sizes in Yueqing, Southeastern China: *Engineering Geology*, 259 (2019) 105147.
- Zhao, Z., Liu, Z. Y., & Xu, C., Slope Unit-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Certainty Factor, Support Vector Machine, Random Forest, CF-SVM and CF-RF Models: *Frontiers in Earth Science*, 9 (2021) 589630.
- Zhao, P., Masoumi, Z., Kalantari, M., Aflaki, M., & Mansourian, A., A GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping and Variable Importance Analysis Using Artificial Intelligent Training-Based Methods: *Remote Sensing*, 14(1) (2022) 211.
- Zhang, T., Han, L., Han, J., Li, X., Zhang, H., & Wang, H., Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model: *Entropy*, 21(2) (2019) 218.
- Zimmerman, H.J., *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Kluwer Ac. Publishing, Dordrecht, (1990).
- Zêzere, J. L., Trigo, R. M., & Trigo, I. F., Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3) (2005) 331-344.
- Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Reis, E., Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal): *Geomorphology*, 94(3-4) (2008) 467–495. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.040.
- Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., ... & Zhu, T., An expert knowledge- based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic: *Geomorphology*, 214 (2014) 128-138.
- Zhu, A. X., Miao, Y., Wang, R., Zhu, T., Deng, Y., Liu, J., ... & Hong, H., A comparative study of an expert knowledge-based model and two data-driven models for landslide susceptibility mapping: *Catena*, 166 (2018) 317-327.

Zou, Z., Xiong, C., Tang, H., Criss, R. E., Su, A., & Liu, X., Prediction of landslide runout based on influencing factor analysis: *Environmental Earth Sciences*, 76 (2017) 1-17.