

**T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ İLE HEYELAN DUYARLILIK
HARİTALARININ ÜRETİLMESİ: HOPA (ARTVİN) ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge MUTLU

**Danışman
Prof. Dr. Halil AKINCI**

ARTVİN-2023

**T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ İLE HEYELAN DUYARLILIK
HARİTALARININ ÜRETİLMESİ: HOPA (ARTVİN) ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge MUTLU

**Danışman
Prof. Dr. Halil AKINCI**

ARTVİN-2023

TEZ BEYANNAMESİ

Artvin oruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Makine ğrenme Teknikleri İle Heyelan Duyarlılık Haritalarının retilmesi: Hopa (Artvin) rneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Halil AKINCI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Lisansüstü Eğitim-ğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

- ☐ Tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.
- ☐ Tezim sadece Artvin oruh niversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.
- ☐ Tezimin ... ay süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu srenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

.../.../2023

Özge MUTLU

T.C.
ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ İLE HEYELAN DUYARLILIK
HARİTALARININ ÜRETİLMESİ: HOPA (ARTVİN) ÖRNEĞİ

Özge MUTLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14/08/2023

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 07/09/2023

Başkan : Prof. Dr. Halil AKINCI

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI

ONAY:

Bu Yüksek Lisans tezi Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../2023 tarihinde oybirliği ile uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

..... /..... / 2023

Doç. Dr. Mustafa Çağatay KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Makine Öğrenme Teknikleri ile Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi: Hopa (Artvin) Örneği” başlıklı bu çalışma; Artvin Çoruh Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez sürecimin her aşamasında bana yol gösteren, bilgisini ve tecrübelerini aktaran, çalışmanın sonuca ulaştırılmasında yardımlarını ve sabrını benden hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Halil AKINCI’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım sürecinde her zaman yanımda olan, beni bugünlere getiren ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde manevi destekleri ile bana moral ve güç veren, beni yüreklendiren, yanımda olduklarını bana hissettiren tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bilimsel ve teknik anlamda araştırmacılara faydalı olmasını dilerim.

Özge MUTLU

Artvin - 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ BEYANNAMESİ.....	I
JÜRİ KABUL TUTANAĞI.....	II
ÖNSÖZ.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
TABLolar DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
KISALTMALAR DİZİNİ	X
1 GİRİŞ	1
1.1 Heyelan Tanımı	3
1.2 Heyelanların Sınıflandırılması ve Heyelan Türleri	3
1.2.1 Düşme	5
1.2.2 Devrilme.....	6
1.2.3 Kayma	6
1.2.4 Yayılma	7
1.2.5 Akma	8
1.2.6 Karışık	8
1.3 Heyelan Tetikleyici Faktörler	8
1.4 Heyelan Duyarlılık Haritaları.....	10
1.5 Heyelan Duyarlılık Haritalarında Kullanılan Faktörler	11
1.5.1 Yükseklik	12
1.5.2 Yamaç Eğimi.....	13
1.5.3 Yamaç Eğim Yönü (Bakı).....	14
1.5.4 Plan ve Profil Eğriliği (Eğrisellik)	15
1.5.5 Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI).....	15
1.5.6 Arazi Örtüsü	16
1.5.7 Jeoloji / Litoloji	17
1.5.8 Akarsuya (Drenaj Ağlarına) Yakınlık	17
1.5.9 Yola Yakınlık	18
1.5.10 Ana Faylara Yakınlık	18

2 LİTERATÜR ÖZETİ	19
3 ÇALIŞMANIN AMACI	24
4 MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1 Çalışma Alanı.....	26
4.2 Rastgele Orman (Random Forest) Algoritması.....	27
4.3 Aşırı Gradyan Artırma (Extreme Gradient Boosting) Algoritması	30
4.4 Heyelan Envanteri	31
4.5 Çalışmada Kullanılan Verilerin Hazırlanması	32
4.6 Eğitim ve Doğrulama (Test) Veri Setinin Hazırlanması.....	37
5 BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
5.1 Heyelan Duyarlılık Haritaları.....	39
5.2. Model Performanslarının Karşılaştırılması	44
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	60

ÖZET

MAKİNE ÖĞRENME TEKNİKLERİ İLE HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİ: HOPA (ARTVİN) ÖRNEĞİ

Türkiye’de heyelanların en fazla görüldüğü bölge Doğu Karadeniz Bölgesidir. Doğu Karadeniz Bölgesindeki Trabzon, Rize, Giresun ve Artvin illerinde meydana gelen heyelanlar Türkiye’de meydana gelen heyelanların yaklaşık %20’sini oluşturmaktadır. Heyelanlar, Artvin gibi engebeli topoğrafyaya sahip yerleşimlerde birincil doğal afet türü olarak ön plana çıkmaktadır. Artvin’in kıyı kesimlerinde, özellikle aşırı yağışların tetiklediği heyelanlar can kayıplarına, altyapı ve üst yapı hasarlarına, doğal çevrede tahribata ve ciddi ekonomik zararlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, rastgele orman (Random Forest - RF) ve aşırı gradyan artırma (Extreme Gradient Boosting - XGBoost) algoritmaları kullanılarak Artvin’in Hopa ilçesinin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, heyelanların meydana gelmesinde etkili olduğu belirlenen 10 faktör (litoloji, eğim, arazi örtüsü, yükseklik, bakı, eğrilik, topografik nemlilik indeksi, fay hatlarına, yola ve drenaj ağlarına yakınlık) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan makine öğrenmesi modellerinin performansı, alıcı işlem karakteristik (Receiver Operating Characteristic - ROC) eğrisi ve eğri altında kalan alan (area under the ROC Curve - AUC) yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda XGBoost algoritmasının, RF algoritmasına göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma bölgesinde heyelanların meydana gelmesinde en etkili faktörlerin, sırasıyla, yükseklik, fay hatlarına yakınlık, eğim, litoloji ve arazi örtüsü olduğu belirlenmiştir. Eğrilik ise en az etkili ya da en önemsiz faktör olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, XGBoost algoritması ile üretilen heyelan duyarlılık haritasının, bölgede heyelan zararlarını azaltmak için karar vericilere yol gösterebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Heyelan Duyarlılık Haritası, Makine Öğrenmesi, RF, XGBoost, Hopa, Artvin

SUMMARY

PRODUCTION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS BY MACHINE LEARNING TECHNIQUES: HOPA (ARTVIN) EXAMPLE

The region where landslides are most common in Turkey is the Eastern Black Sea Region. The landslides occurring in the provinces of Trabzon, Rize, Giresun and Artvin in the Eastern Black Sea Region constitute approximately 20% of the landslides occurring in Turkey. Landslides stand out as the primary natural disaster type in settlements with rugged topography such as Artvin. In the coastal areas of Artvin, landslides triggered by heavy rainfall cause loss of life, infrastructure and superstructure damage, destruction of the natural environment and serious economic damage. In this study, it is aimed to produce landslide susceptibility maps of Hopa district of Artvin by using Random Forest (RF) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithms. In the study, 10 factors (lithology, slope, land cover, elevation, aspect, curvature, topographic wetness index, proximity to fault lines, road and drainage networks) were used, which were determined to be effective in the occurrence of landslides. The performance of the machine learning models used in the study was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the area under the ROC Curve (AUC) approach. As a result of the evaluation, it was determined that the XGBoost algorithm performed better than the RF algorithm. In addition, it has been determined that the most effective factors in the occurrence of landslides in the study area are elevation, proximity to fault lines, slope, lithology and land cover, respectively. Curvature was determined as the least effective or least important factor. As a result, it was concluded that the landslide susceptibility map produced by the XGBoost algorithm can guide the decision makers to reduce the landslide damages in the region.

Keywords: Landslide, Landslide Susceptibility Map, Machine Learning, RF, XGBoost, Hopa, Artvin

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Hareketin tipi ve malzemenin türüne göre heyelanların sınıflandırılması.....	4
Tablo 2. Heyelanların meydana gelmesinde etkili olan faktörlerin frekans oranları .	41



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Doğal afetlerin sınıflandırılması	1
Şekil 2. Heyelan türlerinin şematik gösterimi.....	5
Şekil 3. Doğada düşme yenilmeleri Arhavi-Hopa Devlet Yolu.....	6
Şekil 4. Devrilme türü stabilite yenilmesi.....	6
Şekil 5. Meksika’da meydana gelen çoklu dairesel kayma heyelanı	7
Şekil 6. Yanal yayılma heyelanı	7
Şekil 7. Kuzulu (Koyulhisar) heyelanı - 17 Mart 2005.....	8
Şekil 8. Artvin ili Hopa ilçesine ait heyelan görüntüsü	9
Şekil 9. Karadeniz Bölgesi meteorolojik afet dağılımı (%) (2010-2021)	10
Şekil 10. Heyelan duyarlılık analizinde faydalanan parametreler	12
Şekil 11. Çalışma alanını gösteren harita	26
Şekil 12. Rastgele orman algoritması temel çalışma prensibi.....	29
Şekil 13. Karar ağacı algoritmalarının zaman içindeki gelişimi	30
Şekil 14. Çalışma alanının a) eğim, b) yükseklik haritaları	33
Şekil 15. Çalışma alanının; a) bakı, b) eğrilik haritaları	34
Şekil 16. Çalışma alanının; a) TWI, b) drenaj ağlarına yakınlık haritaları	35
Şekil 17. Çalışma alanının; a) yollara uzaklık, b) faylara uzaklık haritaları.....	36
Şekil 18. Çalışma alanının; a) litoloji, b) arazi örtüsü haritaları	37
Şekil 19. Heyelan duyarlılık haritaları; a) RF modeli, b) XGBoost modeli	39
Şekil 20. Heyelan koşullandırma faktörlerin önem dereceleri; a) RF, b) XGBoost ..	40
Şekil 21. ROC eğrileri; a) başarı oranı eğrisi, b) tahmin oranı eğrisi	45

KISALTMALAR DİZİNİ

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AHP	Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi
AHS	Analitik Hiyerarşi Süreci
ANN	Artificial Neural Networks
BAF	Batı Anadolu Fay Hattı
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
ÇEM	Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü
ÇŞB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
EM-DAT	Emergency Disaster Database
FR/FO	Frekans Oranı
GBM	Gradient Boosting Machines
İRAP	İl Afet Risk Azaltma Planı
KAF	Kuzey Anadolu Fay Hattı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LR	Lojistik Regresyon
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
RF/RO	Rastgele Orman
SVM	Support Vector Machines
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TWI	Topographic Wetness Index
UNISDR	United Nations International Strategy For Disaster Reduction
YSA	Yapay Sinir Ağları
WoE	Weight of Evidence
XGBoost	Extreme Gradient Boosting

1 GİRİŞ

Afetler, Dünya genelinde ciddi ekonomik zararlara ve can kayıplarına neden olmaktadır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayınlanan açıklamalı afet yönetimi terimleri sözlüğünde afet; “toplumun tamamı veya belli kesimleri için fiziksel, ekonomik ve sosyal kayıplar doğuran, normal hayatı ve insan faaliyetlerini durduran veya kesintiye uğratan, etkilenen toplumun baş etme kapasitesinin yeterli olmadığı doğa, teknoloji veya insan kaynaklı olay” şeklinde tanımlanmıştır (AFAD, 2022).

Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (CRED)’nin uluslararası alandaki afet veri tabanı (EM-DAT), afetleri genel anlamda doğal ve teknolojik kaynaklı afetler olarak iki ana başlıkta sınıflandırmaktadır (CRED, 2023). Şekil 1’de görüldüğü üzere doğal afetler de jeofiziksel, hidrolojik, meteorolojik, klimatolojik, biyolojik ve Dünya dışı (uzay) kaynaklı olmak üzere altı ana başlıkta gruplandırılmıştır. Teknolojik afetler ise endüstriyel kazalar, ulaşım kazaları ve çeşitli kazalar adları altında sınıflandırmıştır (CRED, 2023).



Şekil 1. Doğal afetlerin sınıflandırılması (UNISDR&CRED, 2015; MGM, 2021)

Doğal afet; yukarıda da bahsedildiği gibi taşkın/sel, heyelan, çığ, deprem, kuraklık, salgın hastalık, göktaşı düşmesi vb. gibi doğa kaynaklı meydana gelen, oluşumuna engel olunamayan doğa olaylarının meydana getirdiği sonuçlara verilen genel isimdir

(AFAD, 2022). Yaşamımızı sürdürdüğümüz dünya üzerinde her yıl binlerce farklı doğal afet yaşanmakta, bunlara bağlı olarak da canlılar ve çevre üzerinde etkisi büyük olabilen olumsuz, tehlikeli sonuçlar meydana gelmektedir. Canlı varlıklar afetlerden etkilenmekte, yaralanmalar ve can kayıpları yaşanmaktadır. Doğal afetler, çevre üzerinde yarattığı yapısal hasarlar ve yıkımlar ile sosyal-ekonomik zararlar ortaya çıkarıp mal kayıplarına da neden olmaktadır. Meydana gelen afetlerin büyüklüğü, ortaya çıkardıkları sonuçların büyüklüğü ile değerlendirilmektedir. Bu açıdan afetlerin büyüklüklerine etki eden çeşitli unsurlar bulunmaktadır. Bu faktörlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Meydana gelen olayın fiziki büyüklüğü
- Olayın yaşandığı yerin yerleşim alanlarına uzaklığı
- Arazi, orman, çevre kullanımı
- Nüfus
- Gelişmişlik derecesi
- Bilgi, eğitim düzeyi

Bu faktörler, doğal kökenli olabildiği gibi insan etkisi üzerine yani beşeri kökenli de olmaktadır (Ergünay, 2002; Erkal ve Değerliyurt, 2009).

Ülkemiz, sahip olduğu coğrafik, morfolojik ve iklim özellikleri ile taşkın, orman yangını, deprem ve heyelan gibi çeşitli doğal afetlerin sık sık yaşandığı bir afet ülkesidir. Özellikle taşkınlar, depremler ve heyelanlar ülkemizde en sık görülen doğal afetlerdendir. Öyle ki çok yakın bir zaman olan 6 Şubat 2023 tarihinde, İletişim Başkanlığınca yayınlanan “Asrın Felaketi: 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri” kitabında da bahsedildiği gibi “asrın felaketi” olarak nitelendirilen on bir ilimizin etkilendiği Kahramanmaraş depremleri yaşanmış ve bu afet Cumhuriyet tarihimizde en çok can kaybına ve yıkıma neden olan deprem afeti olarak kayıtlara geçmiştir (URL-1). Heyelanlar da depremlerden sonra insan yaşamını olumsuz etkileyen en önemli doğal afetlerden biridir. Batı Karadeniz’de 2021 yılında Kastamonu, Sinop ve Bartın’da sel ve heyelanlar yaşanmış, insanlar hayatını kaybetmiş ve maddi anlamda da büyük zararlar oluşmuştur. Yine Doğu Karadeniz’de Trabzon, Rize ve Artvin illerinde de aşırı yağışlar nedeniyle sık sık heyelanlar yaşanmaktadır. Dolayısıyla meydana gelebilecek afetlerde can kaybının

yaşanmaması, zararların da minimuma düşürülebilmesi için zarar azaltma noktasında alınacak ön tedbirler büyük önem arz etmektedir.

1.1 Heyelan Tanımı

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayınlanan açıklamalı afet yönetimi terimleri sözlüğünde heyelan; “kaya, toprak veya arazi parçalarının, yer çekimi veya depremler, aşırı yağışlar gibi dış etkenlerin etkisi ile fark edilebilir düzeyde eğim aşağı doğru kayması veya hareket etmesi durumu, toprak kayması” olarak tanımlanmaktadır (AFAD, 2022). Yani şiddetli ani yağışlar, kar erimeleri ile birlikte toprak suya doymun hale gelir ve ağırlaşır. Bunun sonucunda da ağırlaşan toprak tabakası ana bölgeden ayrılıp eğim aşağı kayma olayı gerçekleşir.

Heyelan, birçok araştırmacı tarafından da çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Varnes (1958), heyelan terimini “doğal kaya, toprak, yapay dolgular veya bunların kombinasyonlarından oluşan şevi oluşturan malzemelerin aşağı ve dışa doğru hareketi” olarak tanımlamaktadır. Demirağ (1991) ise “yamaç yenilmeleri” olarak da adlandırdığı heyelanı “bir tepenin yamacı veya bir yamacın yüzey kısmı boyunca bazı etkileyici ve başlatıcı nedenlerle denge durumunun yitirilmesi ile oluşan zemin çökmesi” şeklinde tanımlamıştır. Heyelanlar, genel olarak, yamaçlarda bulunan kaya, toprak veya moloz kütlelerinin yamaç aşağı hareketi olarak tanımlanmaktadır (Cruden, 1991; Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001).

1.2 Heyelanların Sınıflandırılması ve Heyelan Türleri

Heyelanı yamaç hareketi olarak adlandıran Varnes (1978), heyelan sınıflandırılmasının değişik şekillerde yapılabildiğini ve her bir sınıflandırmada tanıma, kontrol, ıslah ya da diğer amaçlar esas alınabildiğini belirtmiştir. Tanıma ve sınıflama için belirlenen kriterler gruplandırılmış ve aşağıdaki şekilde açıklanmıştır (KGM, 2015).

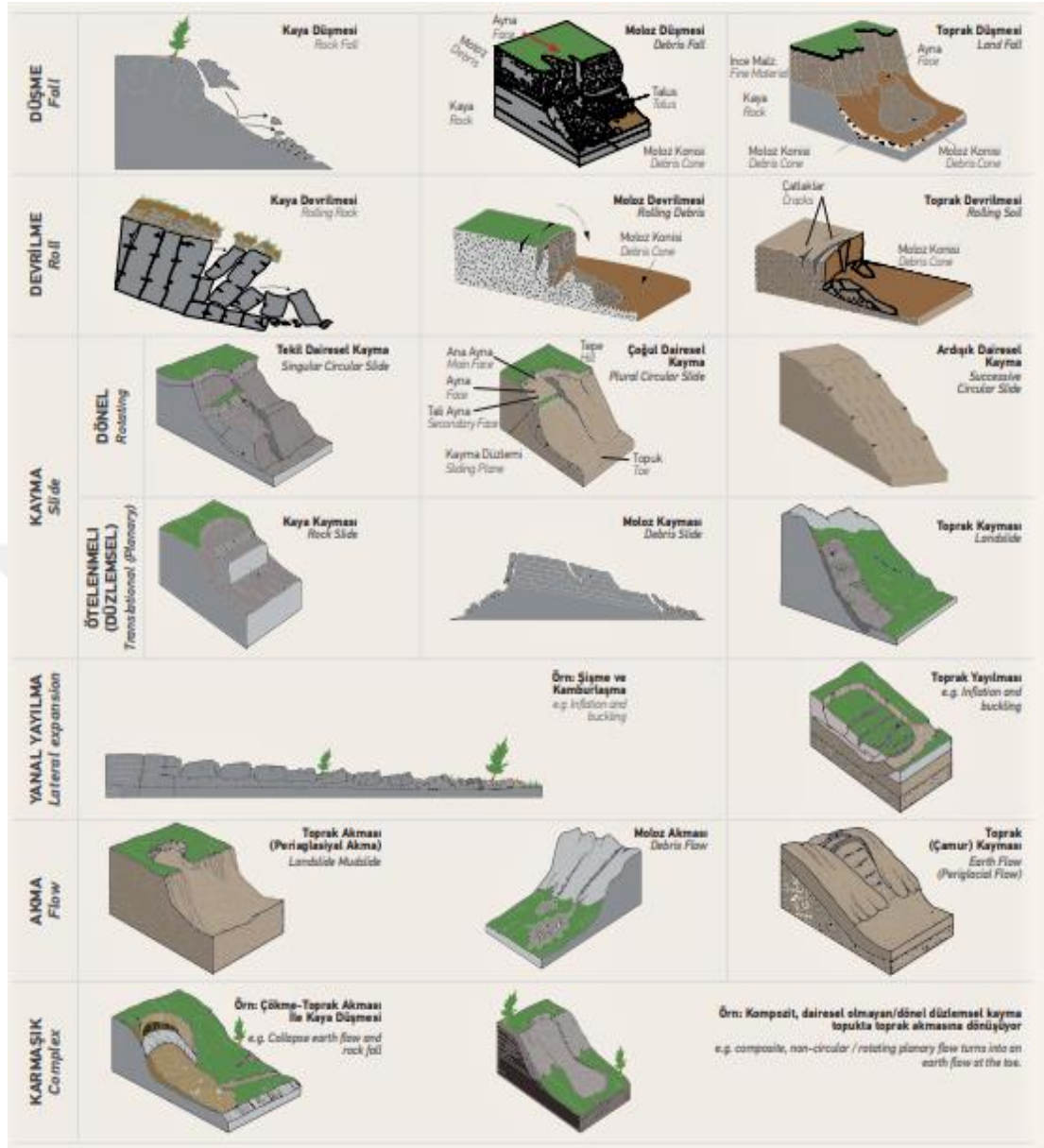
- Hareket tipi
- Malzeme türü
- Hareket hızı
- Yenilen malzemenin ve alanın geometrisi

- Yaş
- Nedenler
- Yer değiştiren kütlelerin kopma derecesi
- Jeolojik yapı ile kayma geometrisinin ilişkisi
- Gelişme (oluşma) derecesi
- Tip örneğinin coğrafik konumu
- Etkinlik durumu

Varnes (1978)'e ait sınıflandırma yamaç hareketleri için literatürde yaygın olarak kullanılan sınıflandırmadır. Varnes heyelanları hareketin tipi ve malzemenin türüne göre sınıflandırmıştır. Buna göre yamaçlarda oluşan heyelanlar; düşme, devrilme, kayma, yayılma, akma ve karışık olmak üzere altı ana gruba ayrılmaktadır (Tablo 1). Şekil 2'de, hareket tipi ve malzeme cinsine göre heyelan türlerinin şematik gösterimi görülmektedir.

Tablo 1. Hareketin tipi ve malzemenin türüne göre heyelanların sınıflandırılması (Varnes, 1978; KGM, 2015)

HAREKETİN TİPİ		MALZEMENİN TÜRÜ	
		KAYA	ZEMİN (TOPRAK)
			İri Taneli İnce Taneli
Düşme		Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi Toprak Düşmesi
Devrilme		Kaya Devrilmesi	Moloz Devrilmesi Toprak Devrilmesi
Kayma	Dönel	Kaya Kayması	Moloz Kayması Toprak Kayması
	Düzlemsel		
Yayılma		Kaya Yayılması	Moloz Yayılması Toprak Yayılması
Akma		Kaya Akması	Moloz Akması Toprak Akması
		Derin krip	Krip
Karışık		İki veya daha fazla hareket türünün birlikte gözlendiği heyelan	



Şekil 2. Heyelan türlerinin şematik gösterimi (AFAD, 2018)

1.2.1 Düşme

Düşme; yamaçlardaki çatlaklara su ve buz girmesi, yamaçların rüzgar ve dalga etkilerine maruz kalması ve sıcaklık değişimleri gibi nedenlerle yamaçtaki kütlelerin ana malzemedan kopup ağırlığı ile aşağı yönlü hareket etmesidir (URL-2). Jeolojik yapının türüne göre kaya düşmesi, moloz düşmesi ve toprak (zemin) düşmesi olarak ayrılmaktadır. Özellikle kaya düşmeleri, kayalık ulaşım ağlarında ölümle sonuçlanabilen çok tehlikeli bir durumdur. Bu olaylar, ani ve hızlı bir şekilde yaşanabilmektedir.



Şekil 3. Doğada düşme yenilmeleri Arhavi-Hopa Devlet Yolu (KGM, 2015)

1.2.2 Devrilme

Devrilme, yamaç içine doğru eğimli olan süreksizliklerde blokların domino etkisi ile kazı boşluğuna devrilmesi şeklinde gelişen duraysızlık türüdür ve düşme şekline benzese de daha çok dönme, bükülme davranışdır (Ulusay, 2007). Düşme gibi devrilme de jeolojik formasyonun özelliğine göre ayrılmaktadır.



Şekil 4. Devrilme türü stabilite yenilmesi (Ulamış, 2022)

1.2.3 Kayma

Makaslama yenilmeleri sonucunda, bir veya daha fazla bloğun tanımlanabilen bir kayma yüzeyi boyunca şev aşağı hareket etmesi olayına kayma denir (URL-2). Yüzey boyunca kayma direncinin azalması sonucu meydana gelir. Kaymalar, dönel

(dairesel) kaymalar ve yanar (ötelenmeli) kaymalar şeklinde ayrılmaktadır. Mühendislik şevlerinde en sık rastlanılan duraysızlık türü dönel kaymalardır ve daha çok zeminlerde (toprak, kil, kum vb.), nehir yataklarında, ileri derecede eklemli kaya kütlelerinde, ileri derecede ayrıışmış kayalarda ve dolgularda meydana gelirler (Ulusay, 2007).



Şekil 5. Meksika’da meydana gelen çoklu dairesele kayma heyelanı (KGM, 2015)

1.2.4 Yayılma

Çekme ve makaslama tipi deformasyonların birlikte izlendiği heyelan tipidir. Uzun mesafelerde etkin hareketleri ve geniş alanları etkilemeleri nedeni ile yıkıcı olabilirler (URL-3).



Şekil 6. Yanal yayılma heyelanı (Ersoy, 2020)

1.2.5 Akma

Yavaş şekilde gerçekleşen toprak hareketidir. Belirgin özelliği son derece yavaş olması ve sonuçta plastik davranış göstermesidir. Kumda, kilde, yamaç molozunda ve ana kayada görülebilir (URL-2). Pekişmemiş toprak malzemesinin doymuş veya kuru kum şeklinde yamaç aşağı doğru hareket etmesi olarak adlandırılan duraysızlıktır (Okan, 2003).



Şekil 7. Kuzulu (Koyulhisar) heyelanı - 17 Mart 2005 (KGM, 2015)

1.2.6 Karışık

Birden fazla heyelan türünün birlikte görüldüğü yamaç hareketidir (Okan, 2003). Karmaşık kaymalara kaya devrilmesi ve dönel kayma, kaya düşmesi ve ötelenmeli kaya gibi örnekler verilebilir.

1.3 Heyelan Tetikleyici Faktörler

Genel olarak heyelan oluşumuna neden olan faktörlerin başında şiddeti büyük aşırı yağışlar ve depremler gelmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Heyelanlar Ülkemizde özellikle Doğu Karadeniz bölgesinde sıklıkla yaşanmaktadır. Heyelanların oluşumunu tetikleyen doğa kaynaklı ya da insan kaynaklı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler genel anlamda aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Aşırı yağışlar sonucunda toprağın suya doymuş hale gelmesi,
- Yeraltı suyundaki değişiklikler,

- Özellikle ilkbaharda ani şekilde kar erimelerinin gerçekleşmesi,
- Yüksek eğim varlığından dolayı derelerin debilerinde yağış ile birlikte ani yükseliş yaşanması,
- Akarsu, deniz veya göl tarafından şev (yamaç) topuklarının aşınması,
- Depremlerin yarattığı sismik dalgalar,
- Bitki örtüsünün bozulması, ormanların tahrip edilmesi,
- Arazilerin hatalı kullanımı,
- Yamaç kazıları,
- Denetimsiz yapılan kazı çalışmaları,
- Şev üstüne dolgu yığılması,
- Çay bahçelerinin yanlış amaçlar için kazılması,
- Maden ocağı çalışmaları için gerçekleştirilen patlamalar.

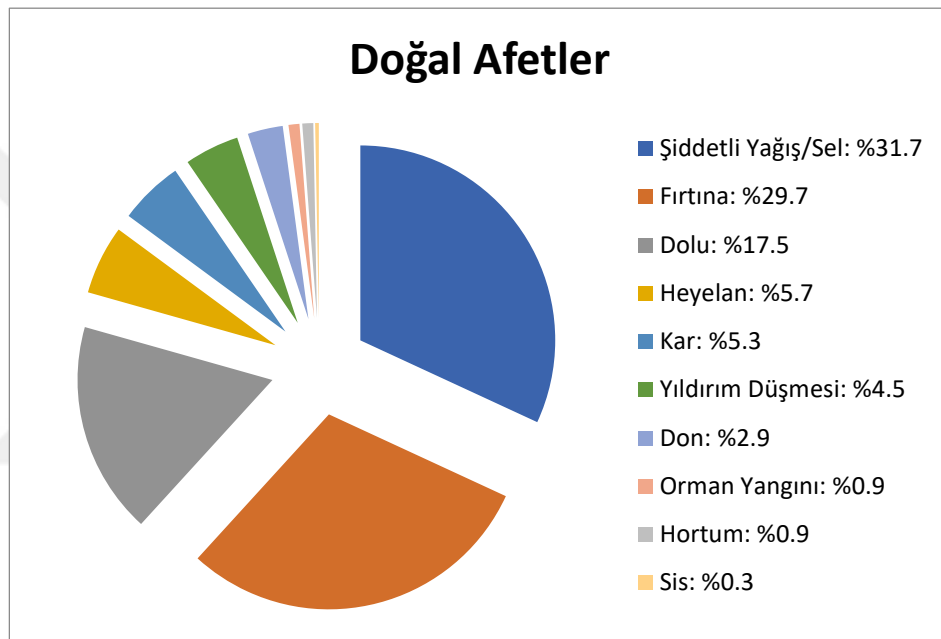
Şekil 2’de Artvin ili Hopa ilçesinde önceki yıllarda gerçekleşmiş bir heyelana ait görüntü yer almaktadır. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü tarafından paylaşılan bu görüntüde, aşırı yağışlar sonrasında çaylık alanda meydana gelen bir heyelan görülmektedir.



Şekil 8. Artvin ili Hopa ilçesine ait heyelan görüntüsü (ÇEM, 2016)

1.4 Heyelan Duyarlılık Haritaları

Heyelanlar, ülkemizde depremlerden sonra ikinci sırada gelen afetlerdendir. Son yıllara da bakıldığında heyelanların çok sık yaşanmaya başladığı görülmektedir. Özellikle Karadeniz Bölgesi yıl boyu yağışlı iklimi ve eğimli/engebeli arazileri ile heyelanların en sık yaşandığı bölgedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yayınlanan “Türkiye Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi (2010-2021)” raporuna göre Karadeniz Bölgesinde 2010 ile 2021 yılları arasında en fazla yaşanan doğal afetin şiddetli yağışlar/seller olduğu görülmektedir (Şekil 8) (MGM, 2022).



Şekil 9. Karadeniz Bölgesi meteorolojik afet dağılımı (%) (2010-2021) (MGM, 2022)

Şiddetli yağışlar sel oluşturmakta, seller de bir süre sonra heyelanlara sebep olmaktadır (ÇEM, 2016). Heyelanlar, Karadeniz Bölgesinde, dere kenarlarına, güvensiz yamaçlara yapılan plansız yanlış yapılaşmalar, derelerin önlerinin bilinçsizce kapatılması, arazilerin yanlış kullanılması (bitki örtüsünün bozulması) gibi faktörlerin de etkisiyle yaz aylarında dahi ani şiddetli yağışlar ile çok sık yaşanır hale gelmiştir. Yaşanan heyelanlar; binaların yıkılmasına, vatandaşların hayatını kaybetmesine ve maddi anlamda da çok büyük zararlara neden olmaktadır. Bunların yanı sıra heyelanların doğaya da (ormanlara, ekili dikili tarım arazilerine) zararı büyük olmaktadır. Bu açıdan heyelanlar en önemli doğal afetlerden biridir.

Ülkemizde bu konuda yaşanabilecek kayıpların önüne geçilebilmesi, heyelanların nedenlerinin de anlaşılabilmesi amacıyla ilk kez 1998 yılında Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından; geçmişte yaşanmış heyelanların; türlerine, coğrafi konumlarına, alansal dağılımlarına, gerçekleşme zamanlarına ait sayısal heyelan veri tabanlarının oluşturulduğu “Türkiye Heyelan Envanteri” projesi başlatılmıştır. Projenin ulusal ölçüde tamamlanması 2009 yılında gerçekleşmiştir. Böylelikle Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında belirli ölçeklerde heyelan haritaları üretilmiştir (MTA, 2023).

Heyelanın doğurduğu zararların önüne geçebilmek veya zararları minimuma indirebilmek ve heyelan riski taşıyan bölgelerin heyelanlara karşı eğilimlerini belirleyebilmek için bölgesel düzeyde doğruluğu yüksek güncel heyelan duyarlılık haritaları hazırlanmaktadır. Heyelan duyarlılık haritalarının amacı, heyelana duyarlı alanların belirlenmesini sağlayarak olası heyelanların zararlarını azaltmaktır (Yalçın, 2007). Bu haritalar sayesinde heyelan riskinin olduğu bölgeler tespit edilebilmektedir. Heyelan duyarlılık haritaları ile meydana gelebilecek heyelanların insan hayatına ve çevreye olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

1.5 Heyelan Duyarlılık Haritalarında Kullanılan Faktörler

Heyelan duyarlılık analizleri yapılırken birçok parametreye ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 8). Bu parametreler, genel olarak, ilgili bölgede heyelanların meydana gelmesinde etkili olan faktörlerdir. Bu faktörler; çalışılan bölgenin jeolojik, topografik, çevresel ve iklimsel özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Heyelan duyarlılık analizleri kapsamında, çalışma alanı hakkında bilgiler veren bu faktörler bir arada değerlendirilmektedir. Uygulamada her bir faktörün haritası üretilmekte ve bu haritaların çakıştırılması ile de bölgenin heyelan duyarlılık haritası çıkarılmaktadır. Faktörlerin her birinin heyelana etki gücü çalışılan bölgenin özelliklerine göre farklılık göstermektedir.

HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİNDE KULLANILAN PARAMETRELER						
HAZIRLAYICI FAKTÖRLER			TETİKLEYİCİ FAKTÖRLER			
JEOLOJİK	TOPOĞRAFİK	ÇEVRESEL	Yağış			
Litoloji / Ayrışma	Yükseklik	Bitki Örtüsü	Deprem			
Anafaya Yakınlık	Yamaç Eğimi	Yola Yakınlık	İnsan			
Yapısal Unsurların Yamaçla İlişkisi	Yamaç Eğim Yönü (Bakı)	Arazi Kullanımı				
Yeraltı Suyu	Yamaç Şekli					
Zemin Kalınlığı	Drenaj Ağı					
Süreksizlik Yoğunluğu	Akarsuya Yakınlık					
Ayrışma Derinliği	Göreceli Yükseklik					
Zemin Yapısı						
Zemin Makaslama Dayanımı						
Güvenlik Sayısı						

Şekil 10. Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan parametreler (Dağ, 2007)

1.5.1 Yükseklik

Topografik yükseklik, deniz seviyesini baz alan yüksekliktir. Yükseklik seviyelerine bağlı olarak yapılan analizler sonucunda hangi yükseklik değerlerinin heyelana ne derece duyarlı oldukları bilgisine ulaşılabilmektedir. Göreceli olarak, yüksek kote sahip bölgelerin düşük yükseklik değerlerine sahip bölgelere göre heyelanlara daha duyarlı oldukları değerlendirilmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Literatürdeki heyelan analizlerinde yükseklik parametresinden çokça yararlanıldığı görülmektedir. Dağ ve Bulut (2012), Rize'nin Çayeli ilçesinde gerçekleştirdikleri

heyelan duyarlılık haritalama çalışmasında, 0-200 m aralığındaki yüksekliklere sahip alanların (çay tarımının bölgede düşük yükseklik değerlerinde yapılmasından dolayı) heyelanlara karşı daha duyarlı olduğunu saptanmıştır. Yine Özşahin (2015) tarafından Tekirdağ'da yapılan çalışmada yükseklik parametresi kullanılmış ve heyelan duyarlılığı en yüksek 100-> yükseklik sınıfında görülmüştür. Çalışma sahasında yükseklik değerleri arttıkça heyelan duyarlılığının da arttığı belirtilmiştir. Öz ve Günek (2021) tarafından Trabzon'da gerçekleştirilen çalışmada ise 500-750 m yükseklik değerlerine sahip bölgelerin yoğun yağış alması, yerleşim yerlerinin ve tarımsal faaliyetlerin bu yükseklik sınıfında yoğunlaşması nedeniyle bu alanlarda heyelanların yaygınlık gösterdiğini saptanmıştır.

1.5.2 Yamaç Eğimi

Yamaç eğimi, heyelana etki eden en önemli faktör olarak kabul edilmektedir. Eğimin olmadığı alanlarda heyelan oluşması mümkün değildir. Eğimin artması ile birlikte kaya blokları ağırlaşır ve yamaçtaki materyalin dengesi bozularak yamaçta kayma, akma meydana gelir (Öztürk, 2002). Bu durumun, genellikle orta eğim değerine (20°- 45°) sahip alanlarda yoğunlaştığı görülmüş ve bu yüzden orta eğim derecesine sahip alanların heyelanlara daha duyarlı oldukları değerlendirilmiştir. 45° nin üstündeki yüksek eğimli bölgelerde ise zeminin sağlam kaya yapısı varlığından dolayı stabiliteleri daha duraylıdır ve bu yüzden yüksek eğimli alanların heyelanlara karşı daha az duyarlı olduğu değerlendirilmiştir (Santacana ve ark., 2003; Dağ, 2007). Çok düşük eğimli alanlarda zeminde akma oluşmadığı için bu alanların da heyelana karşı daha az duyarlı oldukları saptanmıştır.

Eğim faktörü duyarlılık analizlerinde etkileyici faktör olduğundan ötürü yine birçok çalışmada da kullanılmıştır. Dağ ve Bulut (2012), Rize (Çayeli)'de gerçekleştirdikleri çalışmalarında, 10°-30° eğim değerlerine sahip yamaçların heyelana daha duyarlı olduklarını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, bu alanların aynı zamanda bölgede yerleşim yeri ve tarımsal alan olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Demir (2018) tarafından Suşehri (Sivas)'nde yapılan çalışmada ise çalışma alanının KAF hattına yakın olması nedeni ile depremlerin yarattığı titreşimlerin düşük eğim değerlerine sahip yamaçlarda heyelanları tetiklediğini belirtilmiş ve 5-10° eğim değerlerine sahip yamaçlarda heyelan yoğunluğunun yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Eğim

faktörünü kullanarak hazırlanmış bir diğer çalışma da Gholami ve ark., (2019) tarafından yürütülmüştür. Araştırmacılar İran şehrinde yürüttükleri çalışmalarında, 18°-24° eğim değerlerinde heyelan sıklığının arttığını saptamışlardır. Öz ve Günek (2021) tarafından Trabzon'un Solaklı havzasında yapılan çalışmada, derin vadiler boyunca eğim değerlerinin yüksek olduğu ve 25°-40° eğim değerlerine sahip yerlerin heyelana karşı yüksek hassasiyet gösterdiği saptanmıştır. Araştırmacılar, beşeri faaliyetlerin yamaçlardaki stabiliteyi bozduğunu ve eğim değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir.

1.5.3 Yamaç Eğim Yönü (Bakı)

Yamaç eğim yönü ya da bakı, eğimli yamacın baktığı coğrafik yön ya da yüzeyde yer alan herhangi bir nokta üzerindeki teğet düzlemin gösterdiği yön olarak tanımlanır (Dağ, 2007). Bakı, heyelan analizlerinde sık kullanılan önemli parametrelerdendir. Heyelanların belirli bazı yönelimlerdeki yamaçlarda yağışın etkisi ile daha sık meydana geldiği ifade edilmektedir (Aydoğan, 2019; Aydoğan ve Dağ, 2023). Bölgenin sahip olduğu morfolojik yapı, yağışı alma yönü, güneş ışığını daha fazla miktarda alması (sıcaklık) gibi meteorolojik etkiler heyelanların bazı yönelimlerdeki yamaçlarda sıklaşmasında belirleyici etkenlerdir (Dağ ve Bulut, 2012). Fazla yağış alan yamaçta topraktaki nem miktarı artmakta ve toprak, yağmura daha az maruz kalan yamaca göre, hızlı bir şekilde suya doymun hale gelmektedir. Bu durum sonucunda da yamaçtaki toprak malzeme ağırlaşmakta ve bu da malzemenin kaymasına sebebiyet vermektedir.

Bakı faktörünü çalışmalarında kullanan Öz ve Günek (2021), Trabzon ilinde yürüttükleri çalışma kapsamında, bölgenin güney ve güneybatı yamaçlarının daha seyrek bitki örtüsüne ve bu bağlamda daha yoğun yerleşme ve tarımsal faaliyetlere maruz kalmasından dolayı heyelan oluşumuna karşı yüksek korelasyon gösterdiğini belirtmişlerdir. Bakı parametresinin kullanıldığı bir diğer çalışma ise Yılmaz (2023) tarafından hazırlanmıştır. Araştırmacı, Manisa ilinin Demirci ilçesinde yaptığı çalışmada bakı parametresini kullanmış ve analizler sonucunda heyelanların çoğunlukla batı, kuzeybatı ve kuzey yönlerine sahip yamaçlarda gerçekleştiğini belirtmiştir.

1.5.4 Plan ve Profil Eğriliği (Eğrisellik)

Eğrilik bölgenin morfolojik yapısını belirtmektedir. (Lee ve Min, 2001; Lee ve ark., 2004; Erener ve Düzgün, 2010; Akıncı ve ark., 2011). Eğrilik haritaları da eğim değişimini vermektedir (Erener ve Düzgün, 2010; Akıncı ve ark., 2011). Bir yamaca ait plan ve profil olmak üzere iki adet eğrisellik değeri elde edilmektedir. Bu değerlerin heyelan türü üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Profil eğriliği yamacın aşağı yöndeki eğim değişimini, plan eğriliği ise yükseklik doğrultusundaki eğim değişimini yani profil eğriliğine dik olan eğrilik bilgisini vermektedir (Kılıçoğlu, 2020; Aydınoglu ve Altürk, 2021).

Eğrilik değerleri pozitif, negatif ve sıfır olabilmektedir. Pozitif eğrilik değerleri yamacın dışbükey yani konkav olduğu, negatif eğrilik değerleri yamacın içbükey yani konveks olduğu, sıfır değerleri ise yamacın düz olduğunu ifade etmektedir (Wilson ve Gallant, 2000; Aydınoglu ve Altürk, 2021).

1.5.5 Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)

Heyelan analizlerinde sıkça kullanılan faktörlerden biri de “topoğrafik nemlilik indeksi (topographic wetness index - TWI)” dir. Topoğrafik nemlilik haritaları bir yüzeyin bağıl nemlilik değerlerine göre o alanın ne ölçüde ıslak/nemli olduğu bilgisini vermektedir (Başara ve Şişman, 2022). İlgili arazi zemininin su tutma yani suya doygunluk derecesinin belirlenmesi için yararlanılan topoğrafik nemlilik indeksi, alan bazında boyutlama yapılarak hesaplanmaktadır.

TWI değeri hesaplama formülü şu şekildedir (Taşoğlu, 2020):

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Burada;

A_s = Çalışılan arazinin alanını,

β = Eğim değerini ifade etmektedir.

1.5.6 Arazi Örtüsü

Arazi örtüsü, “arazinin biyolojik veya fiziksel öğelerle kaplanmış hali” olarak tanımlanmaktadır (ÇŞB, 2018). Yamaç duraylılığını etkileyen faktörler arasında arazi örtüsü de yer almaktadır. Fakat bu etki iyi ve kötü yönde olabilmektedir. Bu yüzden arazi örtüsü de heyelan analizlerinde dikkate alınan önemli parametrelerdendir.

Heyelanlar genel olarak bitki örtüsü yoğunluğunun seyrek olduğu tarım, yerleşim alanlarında daha sık meydana gelmektedir. Yoğun bitki örtüsüne sahip alanlar büyük ve gür bitki varlıkları ile yamaç duraylılığı üzerine pozitif yönlü katkı sağlamaktadır. Bu alanlar heyelanların önünde bir set gibi konuma sahip olup malzeme taşınımını da engelleyebilmektedir. Yapraklar da yağışın tamamının toprağa emilmesini süzülme ile engellemekte ve toprağın su çekme kapasitesini azaltmaktadır. Tüm bu açılardan dolayı bitki örtüsünün tahrip edilmemesi önemli bir konudur. Fakat her koşulda ormanlık alanların, ağaçların heyelanlara engel olduğu bilgisi de doğru değildir. Çünkü bitki gövde ve kökleri zemin tarafından yüzey sularının emilmesini zemindeki geçirgenliği artırarak kolaylaştırmaktadır (Dağ ve Bulut, 2012). Ayrıca ağaçlar ağırlıkları ile yamaç üzerinde fazladan yük oluşturmakta ve rüzgarlar ile birlikte sürükleyici etkiyi artırarak heyelanlar üzerinde olumsuz etkiye neden olabilmektedir. (Eker ve Aydın, 2014). Lee ve Min (2001) tarafından yapılan çalışmada ise bu konuda genel görüşten farklı bir yaklaşım ortaya konularak ormanlık alanlarda daha sık heyelan yaşandığı belirtilmiştir. Araştırmacılar, bunun nedenini de heyelanların çoğunlukla yüksek eğime sahip dağlık yerlerde yaşandığını, ormanlık alanların da bu tür alanlardan olduğu için heyelanlara düz alanlardan daha fazla maruz kaldığına bağlamışlardır.

Arazi örtüsü parametresini çalışmalarında kullanan araştırmacılardan biri olan Dağ ve Bulut (2012), Rize ilinin Çayeli ilçesinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, heyelanlara en duyarlı arazi örtüsü sınıflarının tarımsal alanlar ve yerleşim alanları olduğunu belirlemişlerdir. Aydoğan ve Dağ (2023) ise Erzurum ilinde Yukarı Karasu Havzası'nın kuzeydoğu bölümünün heyelan duyarlılık analizini gerçekleştirdikleri çalışmalarında, mevcut heyelanların yaklaşık %98'inin mera ve çayırılık alanlar ile tarım alanlarında meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

1.5.7 Jeoloji / Litoloji

Literatürdeki heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarına bakıldığında litolojinin duyarlılık analizlerinde kullanılan temel parametrelerden biri olduğu görülmektedir (Yalçın, 2007; Akgun ve ark., 2008; Kılıçoğlu, 2020; Akinci ve Yavuz Ozalp, 2021).

Birbirinden ayrı özellikteki litolojik birimlerin kayma dayanımları ile su aktarma nitelikleri de birbirinden farklı olmaktadır. Bu yüzden jeomorfolojik zaman diliminde litolojik birimlerin her biri ayrı yamaç duyarlılıkları göstermektedir (Akinci ve ark., 2010). Suyu daha fazla geçirgen özelliğe sahip kayaçlar duyarlılığı azaltmaktadır. Örneğin killi kayaçlar suyu emme özelliği göstermektedir ve yağışlarla suya doymun hale gelip kayganlaşmaktadırlar. Bu nedenle heyelan artışı killi formasyon alanlarında daha fazla görülmektedir (Öztürk, 2002). Sahanın kayaç türü, kayaçların gözenekli yapısı, geçirgenlik derecesi, katmanların uzanışı gibi tüm litolojik özellikler yağış sularının süzülmesinde önemli bir etmen olduğu için litoloji heyelanların oluşmasında doğrudan etkiye sahip olmaktadır (Duman ve İrcan, 2022).

Yalçın (2007) tarafından Rize ilinin Ardeşen ilçesinde gerçekleştirilen heyelan duyarlılık haritalama çalışmasında heyelanların yaklaşık %95’lik kısmının litolojik açıdan “yüksek derecede ve tamamen ayrılmış kayaçlar” içerisinde meydana geldiği belirlenmiştir. Öz ve Günek (2021) tarafından Solaklı Havzası (Trabzon)’nın heyelan duyarlılığının değerlendirildiği çalışmada litoloji parametresi kullanılmış ve araştırmacılar paleozoik yaşlı birimler ile paleosen ve eosen yaşlı birimlerin ayrışmasıyla 5-10 m’ye ulaşan kil tabakasının şiddetli yağış ve eğimin etkisiyle akışa geçerek heyelanlara neden olduğunu açıklamışlardır.

1.5.8 Akarsuya (Drenaj Ağlarına) Yakınlık

Heyelan duyarlılık analizlerinde dikkate alınan diğer bir durum, sahanın akarsuya ya da drenaj ağlarına yakınlık derecesidir. Akarsuya yakınlık, yamaç stabilitesi yönünden önemli bir etmendir. Akarsu, yatağındaki malzemenin suya doymun hale gelmesine neden olmaktadır. Toprak nemliliği artmaktadır. Bu da yamaçlardaki stabiliteyi bozmaktadır. Bu nedenlerden dolayı akarsuya yakın yerler heyelan riski yüksek yerlerdir. Fakat akarsuyun yamaçlar üzerindeki yarattığı olumsuz etkilerin tam olarak ortaya çıkarılabilmesi için iyi bir arazi gözlemi gerekmektedir. Ayrıca

akarsu debilerinde yağışa bağlı olarak yaşanan mevsimsel değişimlerin ve yer altı sularının akarsular ile ilişkilerinin incelenmesi de gerekmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001).

1.5.9 Yola Yakınlık

Yola yakınlık derecesi de akarsuya yakınlık gibi yamaçlardaki dengeyi etkileyen bir faktördür. Engebeli arazilerde yolların yapımı, topoğrafya ve yamaç üzerinde yükü azaltmakta ve yamaç stabilitesini bozmaktadır. Bu durum yamacın arkasındaki alanı germekte ve yarıklar oluşturmaktadır. Yağış durumunda da bu çatlaklardan içeriye su akışı gerçekleşmekte ve sonucunda da yamaç duraysızlığı olumsuz etkilenmektedir (Yalçın, 2007). Bu nedenle yola yakınlık heyelan duyarlılık haritalama literatüründeki birçok çalışmada en temel faktörlerden biri olarak dikkate alınmıştır.

Kavzaoglu ve ark. (2012) tarafından Trabzon’da yapılan heyelan duyarlılık haritalama çalışmasında, yol ağının sık olduğu alanlarda heyelan riskinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öz ve Günek (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Solaklı havzası (Trabzon)’da dağınık yapıda bulunan konutlara ulaşım için yapılan yolların yamaçları kestiği ve yamaç topuklarında meydana gelen aşınmanın havzada heyelanları tetiklediği belirtilmiştir.

1.5.10 Ana Faylara Yakınlık

Türkiye, üzerinden geçen üç büyük fay hattı (KAF, BAF ve DAF hatları) nedeniyle bir deprem ülkesidir. Fay hatlarında meydana gelen kırılmalar sonucu oluşan depremler, heyelanları tetiklemektedir. Depremlerin meydana getirdiği sismik titreşimler yamaçlardaki stabiliteyi bozmakta ve bu durum heyelana neden olabilmektedir. Hatta sadece olduğu odakta değil uzağındaki yüzlerce km’lik alanlarda dahi heyelanlar yaratıp olumsuz yönde duraysızlık meydana getirebilmektedir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Bu parametre dikkate alınarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, fay hatlarına yakınlık ile heyelanlar arasında bir doğru orantı olduğu ve fay hatlarına yakınlaştıkça heyelanların sayısının arttığı görülmektedir.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, kapsamlı bir literatür araştırması sonucunda, bu çalışmaya altlık oluşturan akademik çalışmalardan, bu çalışmalarda kullanılan yöntemlerden ve çalışmalar sonucunda elde edilen bulgulardan bahsedilmiştir.

Yalçın (2007) tarafından yapılan çalışmada, Rize ili Ardeşen ilçesi sınırları içerisindeki yaklaşık 50 km²'lik bir alanın heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) yöntemi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin kullanıldığı çalışmada üretilen heyelan duyarlılık haritası 56 aktif heyelan alanı ile kontrol edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kontrol heyelanlarının %84 gibi bir oranla, yüksek ve çok yüksek heyelan duyarlılığına sahip alanlara rastladığı saptanmıştır.

Akıncı ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, frekans oranı (frequency ratio - FR) yöntemi kullanılarak Samsun il merkezinin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Litoloji, eğim, bakı, yükseklik, plan eğriliği, profil eğriliği, yola yakınlık ve akarsuya yakınlık parametrelerinin kullanıldığı çalışmada, üretilen heyelan duyarlılık haritası beş sınıfa ayrılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Samsun il merkezindeki heyelanların öncelikli olarak zemin koşullarından kaynaklandığı belirlenmiştir.

Aksoy (2011) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, Arhavi (Artvin) ve çevresinin heyelan duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bölgede meydana gelen heyelanlara ait envanter haritası, arazi çalışmaları yapılarak hazırlanmıştır. Çalışmada sekiz parametre (makaslama dayanımı, eğim, bakı, arazi örtüsü, litoloji-ayırışma, drenaj yoğunluğu, akarsuya yakınlık, yola yakınlık) kullanılmış ve parametrelerin ağırlıkları AHP yöntemindeki ikili karşılaştırma matrisi üretilerek hesaplanmıştır. Duyarlılık analizleri sonucunda, bölgede heyelanların meydana gelmesinde en etkili faktörün ayırışma olduğu belirlenmiştir.

Dağ ve Bulut (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Rize ili Çayeli ilçesinde 2002 yılının Temmuz ayında meydana gelen yağış neticesinde oluşan heyelanlar incelenmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı frekans oranı (FR) metodu kullanılarak bölgenin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Çalışmada 6 parametre (litoloji-ayırışma, yamaç eğimi, yamaç eğim yönü, arazi örtüsü, yükseklik,

akarsuya yakınlık) kullanmıştır. Üretilen duyarlılık haritasının doğruluğunun tespiti için harita, mevcut heyelanlar ile karşılaştırılmış, analiz sonucunda mevcut heyelanların %81'inin yüksek ve çok yüksek duyarlılığa sahip alanlarla çakıştığı belirlenmiştir.

Dağdelenler (2013) tarafından hazırlanan doktora tezi çalışmasında ise heyelan haritalama uygulamalarında yararlanılan örneklem ve doğrulama stratejileri incelenmiştir. Tezde çalışma alanı olarak Gelibolu Yarımadası'nın doğusu seçilmiştir. Çalışma kapsamında kök hücre ve yer değiştirme + birikme alanı örnekleme olmak üzere iki adet örneklem modeli kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kök hücre örneklem modeli kullanılarak hazırlanan haritaların daha yüksek doğruluk verdiği sonucuna varılmıştır.

Chen ve ark., (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, istatistiksel bir model (bilgi değeri – information value) kullanılarak Çin'in Baoji kentinin Chencang Bölgesinin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Heyelan duyarlılık analizinde 10 faktörün kullanıldığı çalışmanın sonuçları, alıcı işlem karakteristik (Receiver Operating Characteristic - ROC) eğrisi altında kalan alan (area under the ROC Curve - AUC) yaklaşımıyla doğrulanmıştır. ROC eğrisine göre modelin kestirim doğruluğunun %82,95 olduğu tespit edilmiştir.

Trigila ve ark., (2015) tarafından Kuzeydoğu Sicilya'da gerçekleştirilen çalışmada, sığ heyelanlar için güvenilir bir duyarlılık modeli belirlemek için lojistik regresyon (LR) ve rastgele orman (RF) tabanlı beş model karşılaştırılmıştır. Model performanslarının karşılaştırılması sonucunda, 4 × 4 m konumsal çözünürlüğe sahip rastgele orman modelinin en yüksek AUC değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Hong ve ark., (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Çin'in Lianhua ilçesi için rastgele orman (RF) algoritması kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritasının, iki değişkenli (evidential belief function (EBF) ve FR) ve çok değişkenli (lojistik regresyon) istatistiksel modeller kullanılarak üretilen duyarlılık haritalarıyla karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışma alanının heyelan envanter haritası, hava fotoğraflarının yorumlanması, uydu görüntüleri ve kapsamlı saha araştırmaları sonucunda hazırlanmıştır. Çalışma alanında toplam 163 heyelan olayı tanımlanmış olup, bunun %70'i (114 heyelan) modellerin eğitimi için ve %30'u (49 heyelan)

doğrulama için kullanılmıştır. Doğrulama sonucunda, EBF ve FR modellerinin Lianhua ilçesi için en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir.

Chen ve ark., (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, heyelan duyarlılık haritalaması için için lojistik model ağacı (logistic model tree - LMT), rastgele orman (RF) ve sınıflandırma ve regresyon ağacı (classification and regression tree - CART) modellerinin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada ilk olarak, hava fotoğraflarının yorumlanması ve kapsamlı saha araştırmaları ile 171 heyelan lokasyonunu içeren bir heyelan envanter haritası oluşturulmuştur. Heyelan duyarlılık haritalaması için eğim açısı, eğim yönü, plan eğriliği, profil eğriliği, yükseklik, NDVI, arazi kullanımı, faylara olan mesafe, yollara olan mesafe, nehirlerle olan mesafe, litoloji ve yağış dahil olmak üzere toplam on iki parametre dikkate alınmıştır. AUC-ROC tabanlı doğrulama sonucunda her üç modelin de oldukça iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, RF modelinin, LMT ve CART modelleriyle karşılaştırıldığında en yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şahin (2018) tarafından yapılan çalışmada, heyelan duyarlılık haritalamada optimum faktör modelinin tespiti ve farklı yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılık haritası üretimindeki etkinliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, optimum faktör modelinin tespitinde adımsal regresyon (AR) metodu, heyelan duyarlılık haritalamada ise lojistik regresyon (LR) ve rastgele orman (RF) makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, AR ve RO yöntemi ile belirlenen optimum faktör modelinin geleneksel LR yönteminden yaklaşık %8 oranında daha üstün olduğu tespit edilmiştir.

Dereli (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, frekans oranı yöntemiyle Giresun ilinin heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Çalışmada; arazi kullanımı, bakı, eğim, litoloji ve yükseklik parametreleri dikkate alınmıştır. Doğruluk değerlendirmesi için üretilen heyelan duyarlılık haritası çalışma alanına ait heyelan envanter haritası ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda mevcut heyelanların %66,32'sinin yüksek ve çok yüksek derecede duyarlı alanlara çakıştığı tespit edilmiştir.

Park ve Kim (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Güney Kore'deki Woomyeon Dağı'nın heyelan duyarlılığının, rastgele orman (RF) modeline ve güçlendirilmiş regresyon ağacı (Boosted Regression Tree - BRT) modeline dayanarak analiz edilmesi ve modellerin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, 140 heyelan noktasını içeren bir envanter haritası kullanılmıştır. Bu heyelanların rastgele seçilen 98'i (%70) modellerin eğitimi için geri kalan 42'si (%30) ise modellerin doğrulaması için kullanılmıştır. AUC-ROC yaklaşımının kullanıldığı doğrulama analizi, RF modelinin BRT modelinden daha iyi olduğunu göstermiştir.

Taşoğlu (2020) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, yapay sinir ağları (YSA) yöntemi kullanılarak Zonguldak ili Devrek ilçesinin heyelan duyarlılığı değerlendirilmiştir. Çalışmada yirmi bir adet parametre dikkate alınmış ve bu parametrelerle beş ayrı parametre grubu oluşturulmuştur. Parametre gruplarının her biri Bayesian Regularization Backpropagation (BR) ve Scaled Conjugate Gradient Backpropagation (SCG) eğitim algoritmaları ile eğitilmiştir. Çalışma alanı için on adet heyelan duyarlılık modeli üretilmiş ve heyelan duyarlılık haritaları elde edilmiştir. Doğruluk değerlendirmeleri sonucunda BR algoritmasının SCG algoritmasına göre daha yüksek performansla kestirim yaptığı tespit edilmiştir.

Youssef ve Pourghasemi (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, heyelan duyarlılık modellemesi için yedi ileri makine öğrenme tekniğinin (Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS), Artificial Neural Network (ANN), Quadratic Discriminant Analysis (QDA), Linear Discriminant Analysis (LDA) ve Naive Bayes) yeteneklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak için AUC-ROC yaklaşımı uygulandığı çalışmada, rastgele orman (RF) modelinin diğer modellere kıyasla en iyi performansı ürettiği sonucuna varılmıştır.

Başara ve Şişman (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise frekans oranı (FR), kanıt ağırlığı (Weight of Evidence - WoE) ve lojistik regresyon (logistic regression - LR) yöntemleri kullanılarak Samsun ilinin heyelan haritaları üretilmiş ve modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada; arazi kullanımı, bakı, eğim, eğrisellik,

litoloji, normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI), tektonik unsura yakınlık, topoğrafik nemlilik indeksi, yıllık toplam yağış ve yükseklik parametreleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda WoE yönteminin diğer iki yöntemden daha yüksek oranda doğruluk sağladığı tespit edilmiştir.

Dalkes ve Korkmaz (2023) tarafından hazırlanan çalışmada ise AHP ve FR yöntemleri kullanılarak Trabzon ili Akçaabat ve Düzköy ilçelerinin heyelan duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 13 parametre (arazi kullanımı, bakı, eğim, eğim şekli, litoloji, normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI), topoğrafik nemlilik indeksi (TNI), akarsulara, karayollarına, fay hatlarına uzaklık, toprak, yağış ve yükseklik) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, üretilen heyelan duyarlılık haritaları karşılaştırıldığında, çalışma alanında gözlenen heyelanların yerlerini belirlemede FR yönteminin AHP yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğu tespit edilmiştir.

Aydoğan ve Dağ (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FR yöntemi ve Bayes Olasılık (BO) modeli kullanılarak Erzurum ilinin Yukarı Karasu Havzası'nın kuzeydoğu bölümünün heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Üretilen heyelan duyarlılık haritaları mevcut heyelanlarla karşılaştırılarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Performans analizi sonucunda, FR yönteminin BO modeline göre daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Yavuz Ozalp ve ark., (2023) tarafından gerçekleştirilen güncel çalışmada ise ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmaları kullanılarak Rize ilinin Ardeşen ve Fındıklı ilçelerinin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmaları olarak Random Forest (RF), Gradient Boosting Machine (GBM), CatBoost ve Extreme Gradient Boosting (XGBoost) kullanılmıştır. Modellerin tahmin performanslarını değerlendirmek için alıcı işletim karakteristik eğrisi altında kalan alan (AUC-ROC) yöntemi kullanılmıştır. AUC değerleri, CatBoost modelinin (AUC = 0,988) en yüksek tahmin performansına sahip olduğunu, bunu XGBoost (AUC = 0,987), RF (AUC = 0,985) ve GBM (ACU = 0,975) algoritmalarının izlediğini göstermiştir. Modellerin AUC değerleri birbirine yakın olsa da CatBoost modelinin diğer modellere göre biraz daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

3 ÇALIŞMANIN AMACI

Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Artvin ilinin Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçeleri, ani ve şiddetli yağışların yaşandığı, yağışlar nedeniyle meydana gelen sel ve taşkınların sıklıkla heyelanlara sebebiyet verdiği bir bölgedir. Bölgenin sık sık heyelanlara maruz kalmasında; oldukça engebeli bir topoğrafyaya sahip olması, iklim bakımından yıl boyu yağış alması ve jeolojik birimlerin özelliği nedeniyle kayaçların ayrışmaya uğraması etkili olmaktadır (Akgun ve Bulut, 2007; Akgun ve ark., 2008; Akinci ve ark., 2020; Dağ ve ark., 2020).

Meteoroloji Genel Müdürlüğünün 2022 yılında hazırladığı rapora göre ülkemizde en fazla yağışı Doğu Karadeniz Bölgesindeki Rize ve Artvin illerinin sahil kesimleri almaktadır (MGM, 2022). Literatürdeki birçok kaynakta, Doğu Karadeniz Bölgesinde heyelanları tetikleyen ana faktörün yağış olduğunu belirtilmektedir (Akgun ve ark., 2008; Karsli ve ark., 2009; Dağ ve Bulut, 2012, Akinci, 2022). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)'nın afet istatistiklerine göre 1950 yılından günümüze kadar Türkiye'de toplam 23.041 heyelan olayı meydana gelmiştir. Bu tarihlerde Doğu Karadeniz Bölgesi illerinden Trabzon'da 1.517 heyelan, Rize'de 1.319 heyelan, Giresun'da 913 heyelan, Artvin'de ise 765 heyelan meydana gelmiştir (AFAD, 2018). Bu dört ilde meydana gelen heyelanlar Türkiye'de meydana gelen heyelanların yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünün 2021 yılında hazırlamış olduğu İl Risk Azaltma Planı (İRAP)'nda Artvin ili için ana afet türünün heyelanlar olduğu belirtilmiş ve planda heyelan zararlarını azaltmak için çok sayıda eylem önerilmiştir (AFAD, 2021).

Artvin'in en fazla yağış alan Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerinde can kayıplarına neden olan, özellikle taşkın gibi meteorolojik karakterli doğal afetler ile aşırı yağışların tetiklediği heyelanlar sıkça görülmektedir. Örneğin 24 Ağustos 2015 tarihinde şiddetli yağış nedeniyle Artvin'in Arhavi, Hopa, Kemalpaşa ve Borçka ilçelerinde taşkınlar ve heyelanlar meydana gelmiş, 19 kişi yaralanmış, 6'sı heyelandan olmak üzere 11 kişi de yaşamını yitirmiştir. Aynı bölgede 11 - 14 Kasım 2015 tarihinde gerçekleşen aşırı yağışlar sonucunda ise 3 kişi hayatını kaybetmiş, 11 kişi yaralanmış, meydana gelen taşkınlar ve heyelanlar binalarda ve altyapılarda büyük hasarlara neden olmuştur (Akinci, 2022).

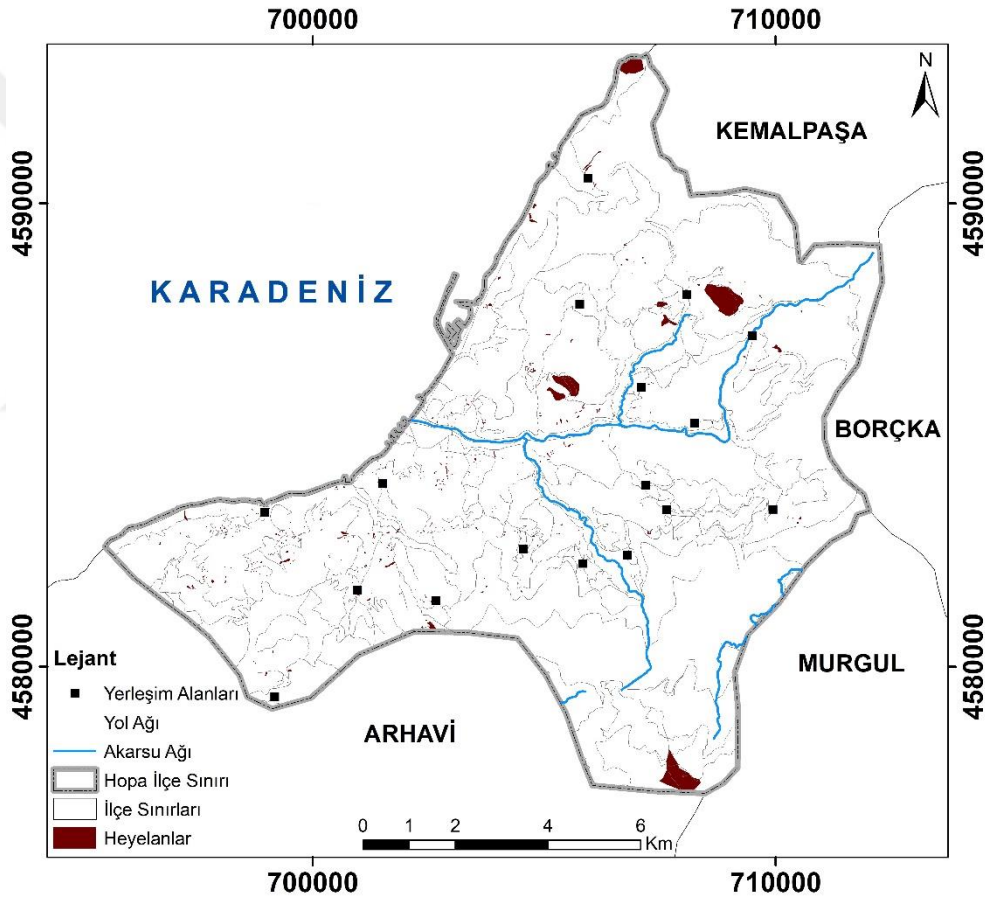
Aşırı yağışlar ve insan faktörleri (yanlış arazi kullanımı, yol ve inşaat amaçlı kontrolsüz kazı çalışmaları gibi) nedeniyle Artvin'in Hopa ilçesinde gelecekte de heyelanların yaşanması muhtemeldir. İlçede heyelanlar nedeniyle oluşması muhtemel zararların önüne geçmek ve gerekli mühendislik tedbirleri alabilmek için heyelan duyarlılık değerlendirmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Hopa ilçesinin de içinde bulunduğu alan, heyelan duyarlılığı açısından, hem Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü hem de araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir (Akinci ve ark., 2020; Akinci, 2022). Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından hazırlanan heyelan duyarlılık haritası; i) frekans oranı yöntemi ve lojistik regresyon gibi geleneksel istatistiksel yöntemlerle hazırlanmıştır, ii) haritaların üretilmesinde kullanılan faktörler yeterli sayıda değildir (örneğin kişisel görüşmelerde litoloji faktörünün kullanılmadığı bilgisine ulaşılmıştır), iii) harita ölçeğinde hazırlandığı için çözünürlüğü yeterli değildir. Akinci ve ark. (2020) tarafından yapılan ilk çalışmada ise Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan alanın heyelan duyarlılık haritası sadece rastgele orman (random forest - RF) algoritması kullanılarak üretilmiştir. Akinci (2022) tarafından gerçekleştirilen en güncel çalışmada ise Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan alanın yağış kaynaklı heyelan duyarlılık haritaları yapay sinir ağları (artificial neural networks - ANN), gradyan artırma makineleri (gradient boosting machines - GBM), RF ve destek vektör makineleri (support vector machines - SVM) algoritmaları kullanılarak üretilmiştir. Heyelan duyarlılık haritalama literatüründe, ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmalarının diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği belirtilmektedir (Merghadi ve ark., 2020). Ağaç tabanlı topluluk öğrenme algoritmalarında biri de aşırı gradyan artırma (extreme gradient boosting - XGBoost) algoritmasıdır. Hopa ilçesinin XGBoost algoritması kullanılarak heyelan duyarlılığının değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında, heyelan duyarlılık haritalama literatüründe yaygın olarak kullanıldığı tespit edilen RF ve XGBoost makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak Hopa ilçesinin doğruluğu yüksek heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasının bir diğer amacı da; kullanılan algoritmaların performanslarını karşılaştırmaktır.

4 MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Çalışma Alanı

Tez çalışması, Doğu Karadeniz Bölgesinde yer alan Artvin ilinin Hopa ilçesinde gerçekleştirilmiştir. 120,21 km² yüz ölçüme sahip olan çalışma alanı, coğrafi olarak, 41° 19' 5.85" – 41° 27' 43.92" kuzey enlemleri ile 41° 20' 15.07" – 41° 32' 24.31" doğu boylamları arasında kalmaktadır (Şekil 11). Çalışma alanında yükseklik 0 – 1860 m arasında değişmektedir. Ortalama eğimin 26.64° olduğu bölgede eğim ise 0° ile 76.084° arasında değişmektedir.



Şekil 11. Çalışma alanını gösteren harita

Doğu Karadeniz Bölgesi, Türkiye’de yıllık ortalama yağışın en fazla olduğu bölgedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün 2010-2020 yılları arası ölçüm verilerine göre Artvin’in Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan kıyı kesimlerinde aylık ortalama yağışların toplamı 2166.07 mm’dir. Artvin’in kıyıda yer alan ilçelerinde aylık minimum yağış ortalaması 94.25 mm ile Mayıs ayında, maksimum

yağış ortalaması ise 345.2 mm ile Eylül ayında görülmektedir. Yine Meteoroloji Genel Müdürlüğünün Ocak 2000 – Mart 2021 verilerine göre Artvin’in kıyı kesimlerinde aylık ortalama maksimum sıcaklık 32.4 °C ile Ağustos ayında, aylık ortalama minimum sıcaklık ise -1.3 °C ile Ocak ayında görülmektedir (Akinci, 2022).

CORINE 2018 arazi örtüsü veri setine göre çalışma alanının; %65,62’si orman, %30,12’si tarımsal alanlar, %2.9’u yapay bölgeler (kesikli ve süreksiz şehir yapısı, endüstriyel ve ticari alanlar, limanlar gibi), %1,2’si bitki değişim alanları (çalılık otsu bitkilerin yer yer ağaçlarla beraber dağıldığı alanlar) ve %0,16’sı ise su kütleleri ile kaplıdır.

4.2 Rastgele Orman (Random Forest) Algoritması

Makine öğrenmesi; “bilgisayarların algılayıcı verisi ya da veri tabanları gibi veri türlerine dayalı öğrenimi olanaklı kılan algoritmaların tasarım ve geliştirme süreçlerini konu edinen bilim dalıdır” şeklinde tanımlanmıştır (URL-4). IBM’e göre makine öğrenimi, yapay zekanın (artificial intelligence - AI) ve bilgisayar biliminin, insanların öğrenme şeklini taklit etmek için veri ve algoritmaların kullanımına odaklanan ve doğruluğunu giderek artıran bir dalıdır (IBM, 2023). Rastgele orman (random forest - RF) da özellikle sınıflandırma ve regresyon problemleri için yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarından biridir.

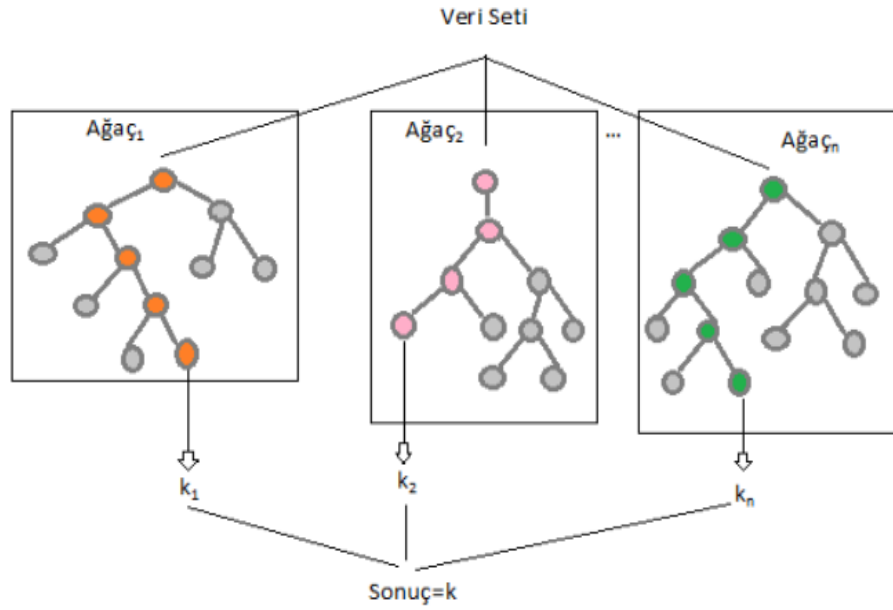
RF, 2001 yılında “Leo Breiman” tarafından geliştirilmiş bir algoritmadır. Algoritma, rastgele seçilmiş birçok sayıda karar ağaçlarının kombinasyonlarının eğitildiği bir öğrenme algoritmasıdır (Breiman, 2001). Algoritmanın çalışma prensibi, kestirim yürütme işleminin gerçekleştirildiği bir örnekte, bir araya gelerek orman oluşturan karar ağaçlarının her birinin ayrı ayrı yaptığı tahminlerin birleştirilmesi ile sonuç kararın verilmesi esasına dayanmaktadır (Çölkesen ve Şahin, 2020). Burada seçilen ve her biri ayrı bir sınıflandırma gerçekleştiren karar ağaçları bir araya gelerek karar ormanlarını meydana getirirler. Kullanıcı tarafından belirlenen karar ağacı sayısı ne kadar fazla olur ise sonuçtan elde edilebilecek doğruluk da o kadar yüksek olmaktadır (Breiman, 2001). Rastgele Orman algoritması, yapılan sınıflandırmalarda

yüksek performans sergilediği için makine öğrenmesi teknikleri arasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

RF algoritmalarının genel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinin çözümünde kullanılabilir, kullanılabilmektedir,
- Sonuçlar çok kısa sürede elde edilebilmektedir,
- Yüksek doğruluk sunmaktadır,
- İstenilen ölçüde ağaç üretilmektedir,
- Ağaç sayısı arttırıldıkça sonuçtan elde edilecek doğruluk da artmaktadır,
- Aşırı uyum/öğrenme (overfitting) sorununu önleyebilmektedir-azaltmaktadır,
- Büyük, eksik ya da düzensiz dağılım gösteren veri setleri için de verimli sonuçlar üretmektedir,
- Üretilen RF, veri setlerinde tekrar kullanılabilir, kullanılabilmektedir,
- Hatalı verileri arındırmaktadır.

RF sınıflandırıcısının uygulama aşamasında kullanıcı tarafından belirlenecek olan iki parametresi mevcuttur. Bunlar; orman için oluşturulacak ağaç sayısı (n) ve en doğru bölümlenimin oluşturulması için her düğümde gerekli değişken sayısı ($mtry$)' dir (Pal, 2005). İlk aşamada, elde bulunan veri setinden rastgele biçimde seçilerek oluşturulmuş alt kümeler olan ormanlar belirlenmektedir ve daha sonrasında da rastgele orman sınıflandırıcısı üzerinden sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 12'de RF'nin temel çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 12. Rastgele orman algoritması temel çalışma prensibi (Şahin, 2018’den değişiklik yapılarak alınmıştır)

Algoritmanın kurgulanması şu şekildedir: (Reif ve ark., 2006; Coşgun ve ark., 2009; Fidancı, 2017):

- Veri setinden örneklemeler seçilir. Ağaç üretme işlemi için bu seçilen verilerin 2/3’ü kullanılır (“inBag” verisi),
- Geriye kalan 1/3’lük eğitim verileri de hata tahmini işlemi için kullanılır (“Out of-Bag” verisi),
- Tüm veri setindeki M kadar özellik arasından rastgele olarak her düğümde m tane değişken seçimi yapılır,
- m kadar özellik içinde en iyi dal (ayrılma) belirlenir,
- Ağaçtaki büyüme işlemi tamamlanana kadar üçüncü ve dördüncü işlem adımları tekrarlanır,
- Her ağaç ne kadar bölünürse bölünsün hiçbir koşulda budanmaz (no pruning),
- Dallanma kriterleri için “Gini indeksi” değeri hesaplanır. Bu değer ne kadar düşük olursa sınıfların homojenliği de o ölçüde artmaktadır,
- Dalın başarılı olması için bir alt düğümün Gini indeksi, bir üst düğümün indeksinden daha az olmalıdır. İndeks sıfır değerini aldığı anda dallanma sona erer.

T: Tüm veri seti,

n: Seçilen veri,

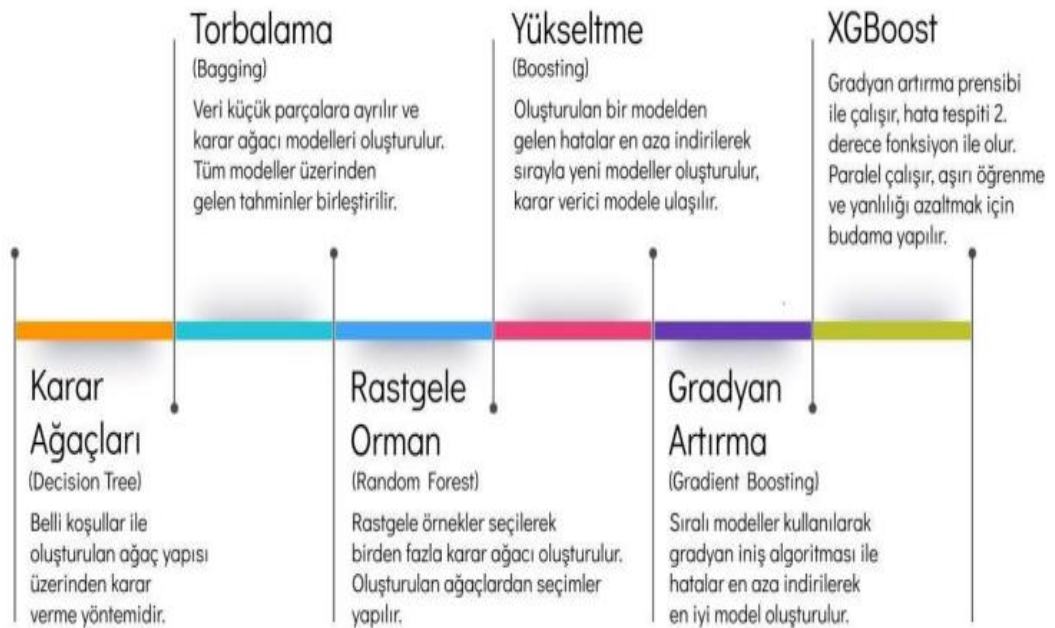
p_j : Her verinin kendisinden küçük ve büyük eleman sayılarına bölüm karesi olmak üzere Gini formülü şu şekildedir:

$$Gini(T) : 1 - \sum_{j=1}^n (p_j)^2 \quad (2)$$

- Gini indeksleri değerlerine göre sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilir.

4.3 Aşırı Gradyan Artırma (Extreme Gradient Boosting) Algoritması

Chen ve Guestrin (2016) tarafından geliştirilen Aşırı Gradyan Artırma (XGBoost) algoritması, gradient boosting (gradyan arttırma) ve karar ağacı algoritmalarına dayanan bir makine öğrenmesi tekniğidir. Algoritma, yaygın olarak kullanılan ölçeklenebilir, etkili bir ağaç güçlendirme (tree bosting) tekniğidir. Mevcut benzer popüler sistemlerden on kat daha hızlı şekilde sonuç üretir ve milyarlarca örneğe ölçeklenebilir (Chen ve Guestrin, 2016). Chen ve Guestrin (2016), XGBoost algoritmasının başarısındaki en önemli etkenin tüm durumlarda ölçeklenebilir olması olarak belirtmişlerdir.



Şekil 13. Karar ağacı algoritmalarının zaman içindeki gelişimi (Kelle ve Yüce,2022)

XGBoost algoritması, regresyon ve sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Karar ağacı tabanlıdır ve bu algoritmalar arasında en iyisi olarak görülmektedir. Tahmin birleşimlerinden oluşan bir yöntemdir ve yüksek tahmin gücü elde etmektedir. Algoritma, birden çok sayıda zayıf tahmin modellerini bir araya getirerek tek bir güçlü model oluşturmaktadır. XGBoost, verideki tüm değerleri incelemek yerine veriyi parçalara ayırır ve ayırdığı kısımlara göre çalışır. Burada parça sayısı ne kadar fazla olursa o kadar küçük aralıklarda çalışacak demektir ve bunun sonucunda algoritma daha yüksek tahmin yürütecektir (Muratlar, 2020).

XGBoost, temelinde C++ dilinde yazılmıştır. Algoritmanın desteklediği platformlar şunlardır (Dixit, 2017; Yangın, 2019):

- Python arayüzü ve scikit-learning’de bir model
- R arayüzü ve “caret” paketindeki bir model,
- Julia,
- Scala gibi Java ve JVM dilleri,
- Hadoop.

4.4 Heyelan Envanteri

Makine öğrenme tabanlı heyelan duyarlılık modellerinin eğitimi ve doğrulaması için doğru ve eksiksiz bir heyelan envanteri kullanmak gerekmektedir (Trigila ve ark., 2015). Heyelan tehlikelerini bölgesel ölçekte değerlendirmek için temel bilgileri sağlayan heyelan envanter haritaları, heyelan oluşumu ile buna etki eden faktörler arasındaki ilişkiyi incelemek için ihtiyaç duyulan en önemli veridir (Chen ve ark., 2014). Bu çalışmada, Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından üretilen heyelan envanter haritası kullanılmıştır.

Envanter haritasına göre çalışma alanında toplam 474 heyelan poligonu bulunmaktadır (Şekil 11). Heyelanlar çalışma alanının yaklaşık %1.2’sini kapsamaktadır. Bu heyelanlardan 430’u normal akma, 1’i kayma, 10’u ötelemeli (düzlemsel) kayma, 6’sı akma (krip), 27’si ise karmaşık heyelan sınıfındadır. Envanter haritasındaki heyelanların en küçüğü 16,48 m², en büyüğü ise 347.435,14 m²’lik bir alanı kaplamaktadır. Heyelan poligonlarının ortalama alanı ise 3032,69

m²'dir. Bölgedeki heyelanların genişlikleri 4 m ile 571 m arasında, uzunlukları ise 6 m ile 989 m arasında değişmektedir.

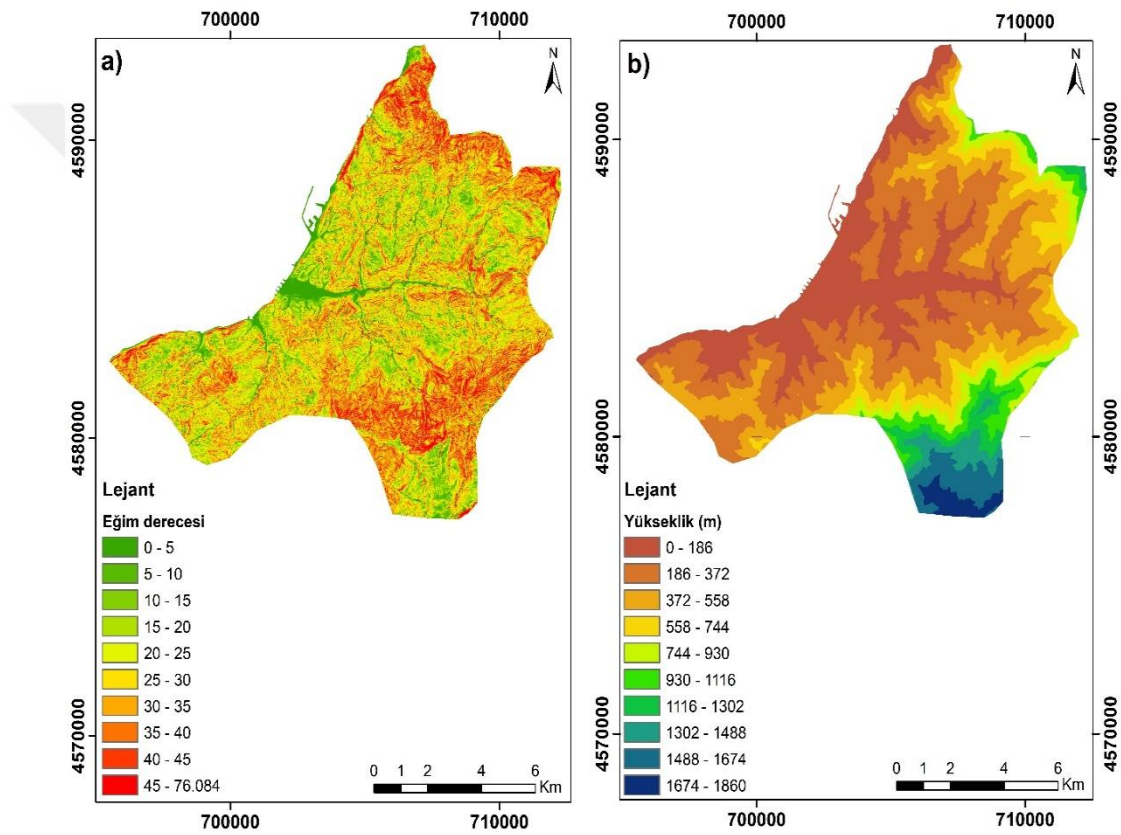
4.5 Çalışmada Kullanılan Verilerin Hazırlanması

Heyelan duyarlılık veya tehlike analizinin ilk aşaması, veri toplama ve heyelanla ilişkili faktörlere ait tematik haritaların üretildiği konumsal veri tabanının oluşturulmasıdır (Lee ve Choi, 2004). Bu çalışmada farklı kurum veya kuruluşlardan 5 temel konumsal veri seti toplanmıştır. Bunlar; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünden temin edilen 1/25.000 ölçekli sayısal jeoloji haritası, Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünden temin edilen heyelan envanter haritası, Harita Genel Müdürlüğünden temin edilen 1/25.000 ölçekli topografik haritalar, Avrupa Birliği Copernicus Arazi İzleme Servisinden (URL-5) temin edilen 1/100.000 ölçekli CORINE 2018 arazi örtüsü verisi ve Artvin Orman Bölge Müdürlüğünden temin edilen 1/25.000 ölçekli sayısal yol ağı verisidir. Heyelanla ilişkili faktörlerin tematik haritaları ArcGIS 10.5 ve SAGA GIS 7.8.2 yazılımlarında hazırlanırken modelleme işlemleri R 3.6.3 yazılımında gerçekleştirilmiştir.

Heyelanlar çeşitli jeolojik, topografik ve çevresel koşullar altında oluşmaktadır. Bu çalışmada; yükseklik, bakı, eğrilik, drenaj ağlarına uzaklık, yollara uzaklık, faylara uzaklık, arazi örtüsü, litoloji, eğim derecesi ve topografik nemlilik indeksi (TWI)'ni içeren 10 parametre kullanılmıştır. Çalışmada, 1:25.000 ölçekli topografik haritalardaki eşyükseklik eğrileri kullanılarak Hopa ilçesinin Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üretilmiştir. Üretilen SYM, 5 m x 5 m konumsal çözünürlükle raster formata (ESRI GRID) dönüştürüldükten sonra çalışma alanının eğim, yükseklik, bakı, eğrilik ve TWI haritaları üretilmiştir.

Eğim açısı, heyelan oluşumundaki en önemli faktörlerden biridir ve heyelan duyarlılık haritalandırma çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhou ve ark., 2018; Hong ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020). Çalışma alanında 0° ile 76.084° arasında değişen eğim derecesi, 5° aralıklarla 10 alt sınıfa ayrılmıştır (Şekil 14a). Düz denebilecek alanlar (eğimin 0° ile 5° arasında olduğu alanlar) çalışma alanının sadece %4,52'sini kapsamaktadır ve alanın yaklaşık %73'ünde eğim 20° nin üzerindedir.

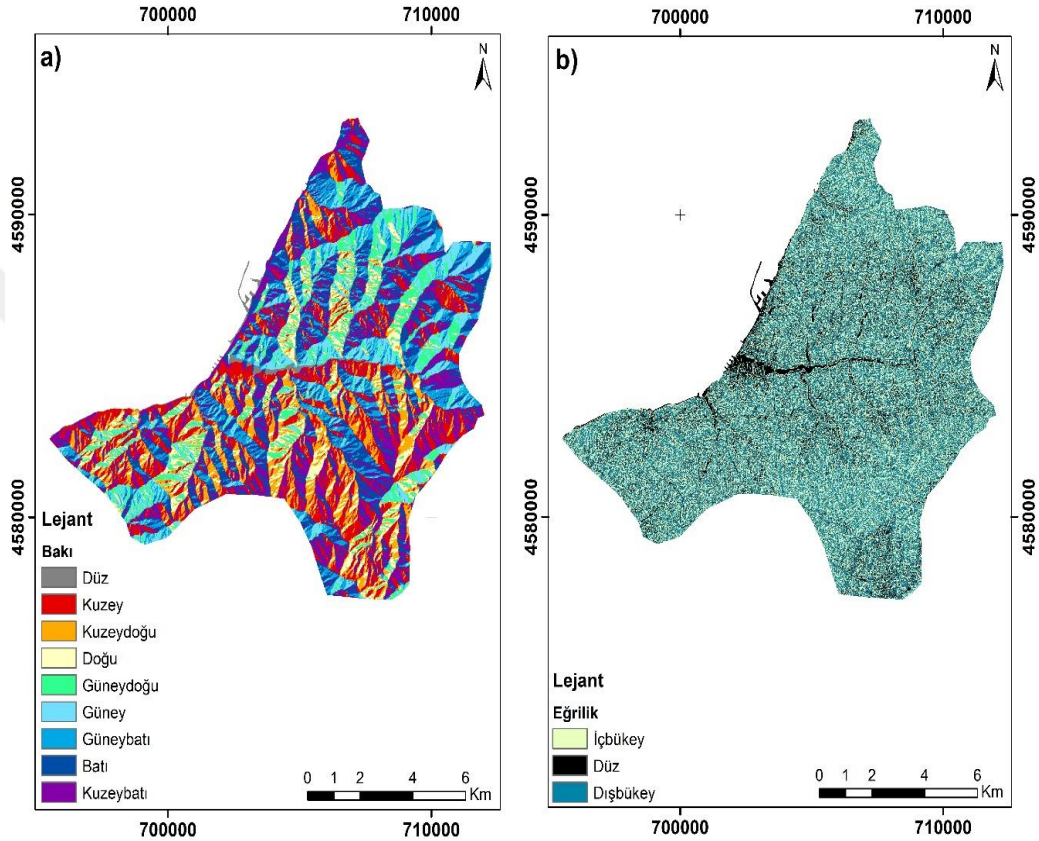
Yükseklik, heyelanların oluşumunda etkili olan önemli parametrelerden bir diğeri olduğu için heyelan duyarlılık haritalandırma çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Dou ve ark., 2019; Hu ve ark., 2020; Wu ve ark., 2020). Çünkü hava ve iklim koşulları yükseklik değıştikçe büyük farklılıklar göstermekte, bu da toprak ve bitki örtüsünde farklılıklara neden olmaktadır (Hong ve ark., 2016). Çalışma alanında yükseklik 0 ile 1860 m arasında değışmektedir. SYM, 186 m eşit aralıkla on alt sınıf oluşturacak şekilde yeniden sınıflandırılmış ve çalışma alanının yükseklik haritası üretilmiştir (Şekil 14b).



Şekil 14. Çalışma alanının a) eğim, b) yükseklik haritaları

Bakı; yağış, rüzgar ve güneş ışığına maruz kalma gibi meteorolojik süreçlerle ilişkilidir ve dolayısıyla heyelanların oluşumu üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir (He ve ark., 2019). Bu nedenle heyelan duyarlılık çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Trigila ve ark., 2015; Pourghasemi ve Rahmati 2018; Chen ve ark., 2020). SYM'den üretilen bakı haritası dokuz kategoride sınıflandırılmıştır (Şekil 15a).

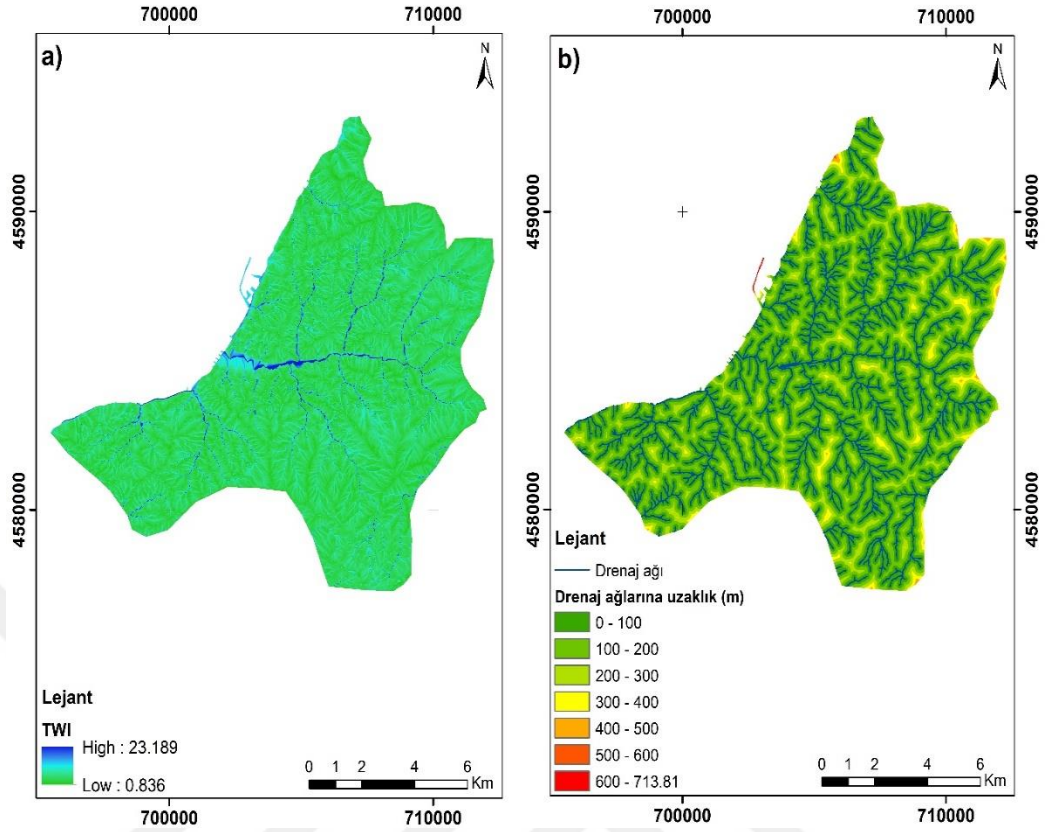
Eğrilik temel arazi parametrelerinden biridir ve jeomorfometrik analizlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Pourghasemi ve Rahmati 2018; Soma ve ark., 2019). Eğrilik, ArcGIS 10.5 yazılımı kullanılarak SYM'den üretilmiş ve negatif eğrilik içbükey, sıfır eğrilik düz ve pozitif eğrilik dışbükey alanları gösterecek şekilde üç alt sınıfa ayrılmıştır (Şekil 15b).



Şekil 15. Çalışma alanının; a) bakı, b) eğrilik haritaları

TWI, bir havza içindeki herhangi bir noktada akış birikiminin ve dolayısıyla toprak neminin teorik bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Bragagnolo ve ark., 2020). Çalışma alanının SAGA GIS yazılımı ile üretilen TWI indeksi, 0.836 ile 23.189 arasında değişmektedir. TWI, doğal kırılmalar (natural breaks) sınıflandırma yöntemi ile 10 alt sınıfa ayrılarak heyelan duyarlılık analizinde kullanılmıştır (Şekil 16a).

Çalışma alanının drenaj ağı, SAGA GIS yazılımı kullanılarak SYM'den üretilmiştir. Drenaj tamponları, ArcGIS 10.5 yazılımındaki öklid mesafesi (Euclidean distance) fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış ve 100 m aralıklarla yeniden sınıflandırılarak 7 alt sınıfa ayrılmıştır (Şekil 16b). Drenaj ağına maksimum uzaklık 713,81 m olarak hesaplanmıştır.

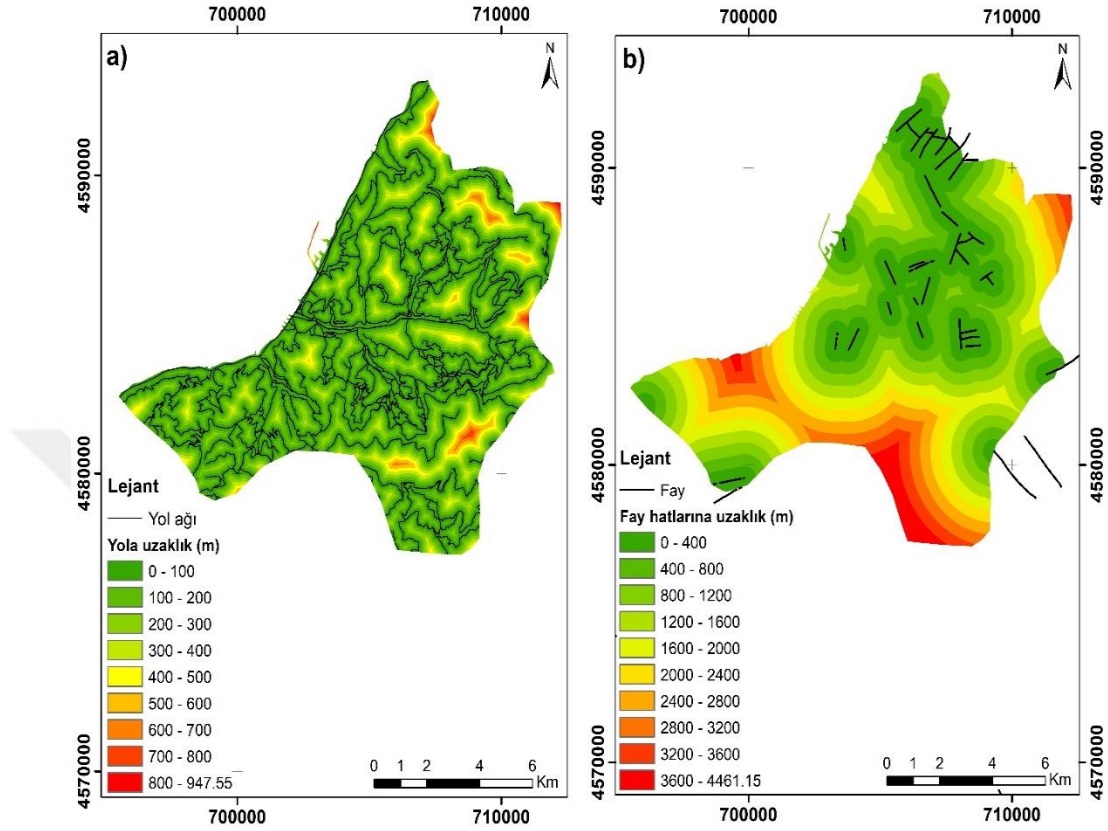


Şekil 16. Çalışma alanının; a) TWI, b) drenaj ağlarına yakınlık haritaları

Pourghasemi ve Rahmati (2018), engebeli alanlardaki yol yapımı faaliyetlerinin çevre stabilitesi üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğini belirtmiş ve bu nedenle yola yakınlık parametresinin heyelana duyarlı alanların belirlenmesinde faydalı olacağını vurgulamıştır. Çalışma bölgesinin yol ağı verisi, Artvin Orman Müdürlüğü'nün Orman Bilgi Sistemi'nden sayısal olarak temin edilmiştir. 1/25.000 ölçekli olan bu veri seti, karayollarını, köy yollarını ve orman yollarını içermektedir. ArcGIS 10.5 yazılımının öklid mesafesi fonksiyonu kullanılarak yol ağının etrafındaki tampon bölgeler üretilmiştir. Yol ağına maksimum uzaklık 947,55 m olarak hesaplanmıştır. Yol tamponları (buffers) 100 m aralıklarla 9 alt sınıfa ayrılarak yola yakınlık haritası üretilmiştir (Şekil 17a).

Çalışmada kullanılan litoloji ve faylar, MTA Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 1:25.000 ölçekli sayısal jeoloji haritasından elde edilmiştir. Tektonik kırılmalar nedeniyle mukavemet azaldığı için faylara yakın alanlar heyelanlara karşı oldukça duyarlıdır (Hu ve ark., 2020). Faylara uzaklık yine öklid uzaklık fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Faylara uzaklık, 400 m eşit aralıklarla 10 alt sınıfa

ayrılacak şekilde yeniden sınıflandırılarak heyelan duyarlılık analizinde kullanılmıştır (Şekil 17b).

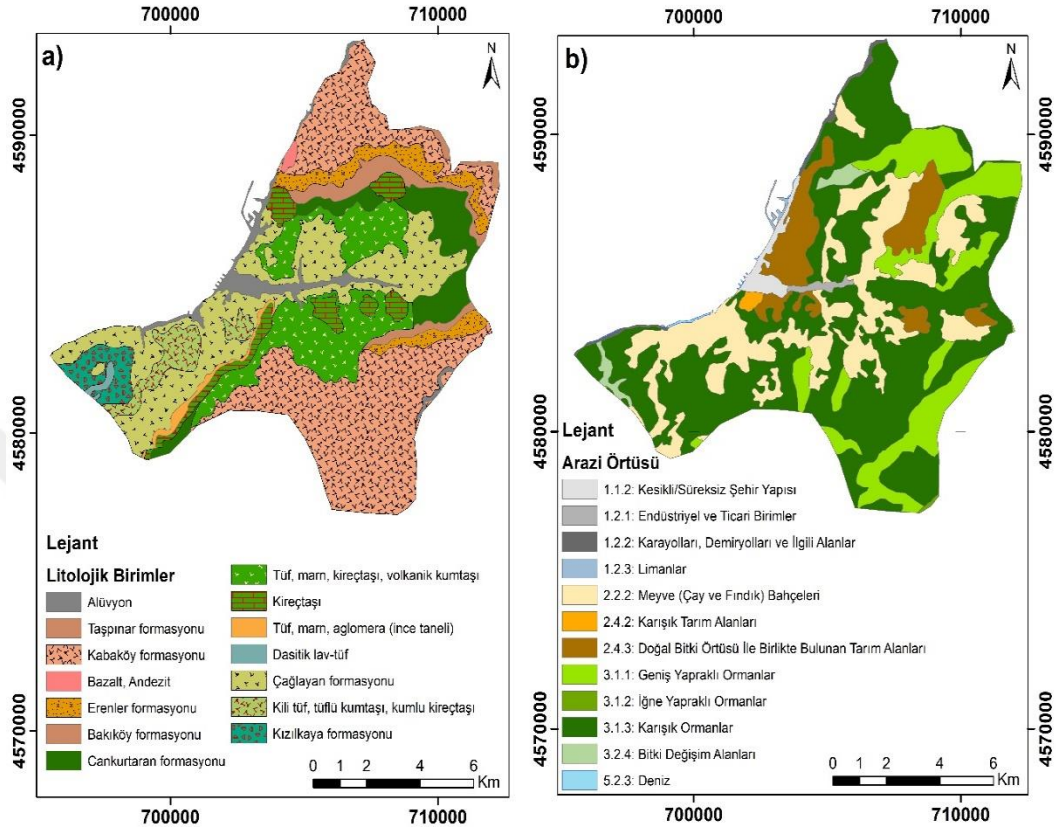


Şekil 17. Çalışma alanının; a) yollara uzaklık, b) faylara uzaklık haritaları

Litoloji, ana kayanın jeomekanik ve hidrolik özelliklerini ve toprak örtüsünün özelliklerini doğrudan etkilediği için heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Catani ve ark., 2013). Şekil 18a, çalışma bölgesindeki litolojik birimleri göstermektedir. Jeoloji haritasına göre çalışma bölgesinde 14 farklı litolojik birim bulunmaktadır.

Yeryüzünün üst kısmı insanlar tarafından çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Her bir arazi kullanımı veya arazi örtüsü tipi, heyelanların meydana gelmesinde farklı bir etkiye sahiptir; örneğin, ormanlık alanlar heyelan oluşumunu azaltırken, açık, çorak bir yüzeyde ya da yerleşim alanlarında heyelanlar daha fazla meydana gelmektedir (Roy ve ark., 2023). Bu çalışmada, Avrupa Birliği Dünya Gözlem Programı (European Union's Earth Observation Program) servislerinden biri olan Copernicus Arazi İzleme Servisi (Copernicus Land Monitoring Service) (URL-5) tarafından sağlanan ve 2018 yılında güncellenen CORINE Arazi Örtüsü (CLC 2018) verisi

kullanılmıştır. Bu veri setine göre çalışma alanı, 14 farklı arazi örtüsü sınıfını içermektedir (Şekil 18b).



Şekil 18. Çalışma alanının; a) litoloji, b) arazi örtüsü haritaları

4.6 Eğitim ve Doğrulama (Test) Veri Setinin Hazırlanması

Heyelan duyarlılık haritalarını üretmek için kullanılan makine öğrenmesi tabanlı modeller, çalışma alanı için hem “heyelan (landslide or positive)” hem de “heyelan olmayan (non-landslide or negative)” örnekler ihtiyacı duyarlar. Bu iki alt kümenin oluşturulmasında kabul edilmiş bir kural olmasa da heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında araştırmacıların büyük çoğunluğu, özellikle “heyelan” örneklerinin seçiminde 70:30 oranını kullanırlar. Bu yaklaşımda envanter haritasındaki rastgele seçilmiş heyelanların %70’i modellerin eğitimi, geri kalan %30’u ise modellerin doğrulanması amacıyla kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2017; Zhou ve ark., 2018; Dou ve ark., 2019; Park ve Kim, 2019; Soma ve ark., 2019). Huang ve Zhao (2018), eğitim ve test veri setindeki heyelan ve heyelan olmayan örneklerin aynı sayıda yani 1:1 oranında olması gerektiğini vurgulamıştır. Diğer taraftan Tien Bui ve ark., (2012), eğitim veri setindeki heyelan ve heyelan olmayan hücre sayısının önemli

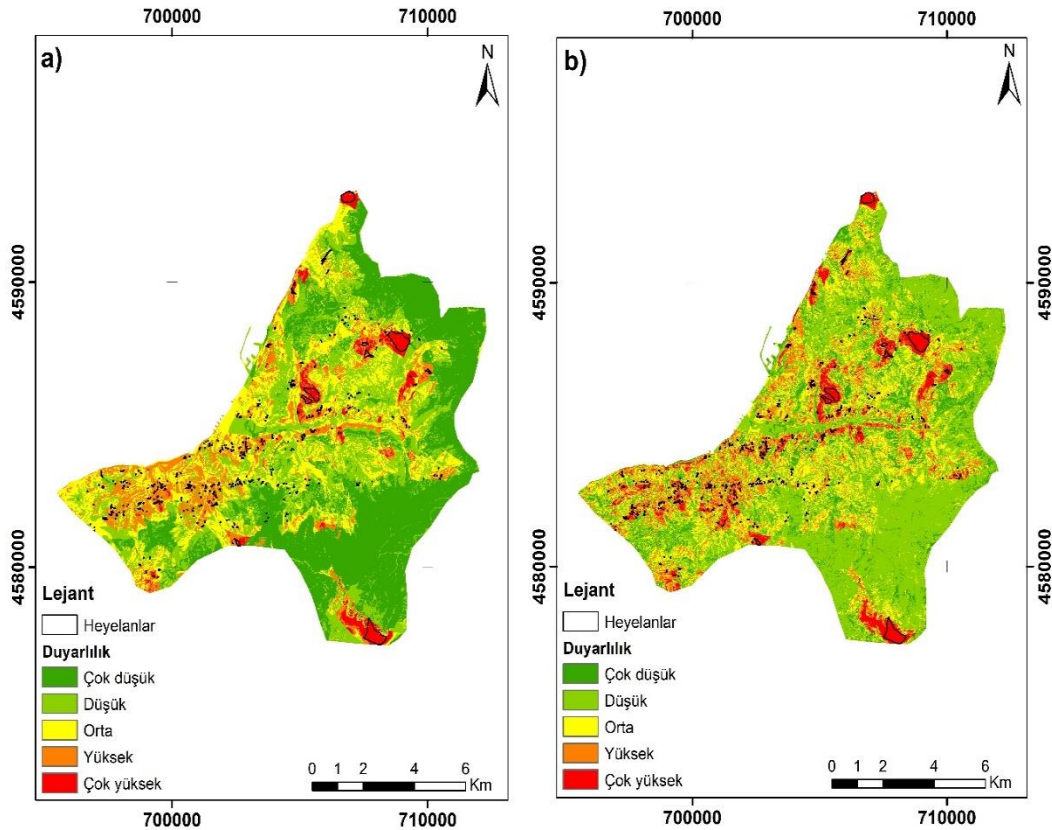
ölçüde dengesiz olması durumunda model performansının ciddi şekilde etkilenebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle araştırmacılar çalışmalarında heyelanlı örnek sayısı kadar heyelanlı olmayan örnek kullanmaktadırlar (Pradhan 2013; Kumar ve ark., 2017; Chen ve ark., 2018; He ve ark., 2019; Wu ve ark., 2020). Çalışma alanındaki toplam heyelanlı piksel sayısı 57.466 dır. Çalışma alanında rastgele aynı sayıda “heyelan olmayan” piksel seçilmiştir. Heyelanlı piksellere “1” ve heyelan olmayan piksellere ise “0” değeri verilmiştir. Toplam 114.932 pikselden oluşan veri setinin %70’i modelin eğitimi için geri kalan %30’u ise modelin doğrulaması için kullanılmıştır.



5 BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Heyelan Duyarlılık Haritaları

Bu çalışmada, Hopa ilçesinin heyelan duyarlılık haritalarının üretiminde RF ve XGBoost modelleri kullanılmıştır. RF ve XGBoost modelleri ile üretilen ve doğal kırılmalar (natural breaks) sınıflandırma metodu kullanılarak beş duyarlılık sınıfına (“çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek”) ayrılan heyelan duyarlılık haritaları Şekil 19’da gösterilmiştir. ArcGIS 10.5 yazılımı; “manuel, equal interval, defined interval, quantile, natural breaks (jenks), geometrical interval ve standard deviation” olmak üzere yedi sınıflandırma yöntemi içermesine rağmen, heyelan duyarlılık değerlendirme çalışmalarında en yaygın kullanılan sınıflandırma yöntemi doğal kırılmalar (natural breaks)’dır (Achour ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2020; Youssef ve Pourghasemi, 2021; Wubalem, 2021; Akinci, 2022).

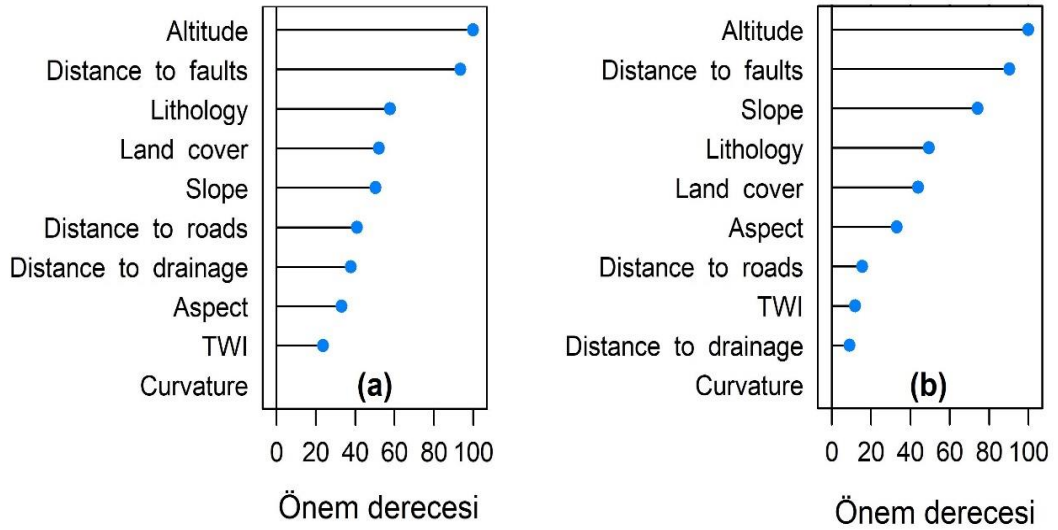


Şekil 19. Heyelan duyarlılık haritaları; a) RF modeli, b) XGBoost modeli

Heyelan duyarlılık sınıflarının RF modelindeki alansal dağılımı, sırasıyla, %33,92, %27,33, %22,91, %12,36 ve %3,48 olarak bulunmuştur. XGBoost modeline göre

üretileen heyelan duyarlılık haritasında ise çalışma alanının %11,22'sini çok düşük derecede heyelana duyarlı bölgeler oluştururken, çalışma alanının, sırasıyla, %45,26, %23,73, %13,12 ve %6,67'sini düşük, orta, yüksek ve çok yüksek derecede heyelana duyarlı bölgeler oluşturmaktadır. Bu sonuçlar, yüksek ve çok yüksek derecede heyelana duyarlı bölgelerin RF modelinde çalışma alanının %15,84'ünü, XGBoost modelinde ise %19,79'unu kapsadığını göstermektedir.

Çalışmada kullanılan faktörlerin duyarlılık modellerindeki önem dereceleri Şekil 16'da gösterilmiştir. Modellerin her ikisinde de yüksekliğin ve fay hatlarına yakınlığın en önemli parametreler (ya da çalışma alanında heyelanların meydana gelmesinde en etkili parametreler) olduğu görülmektedir. Bu iki parametreden sonra çalışma alanında en önemli ya da en etkili parametrelerin eğim, litoloji ve arazi örtüsü olduğu tespit edilmiştir. Eğrilik (curvature) ise her iki modelde de en önemsiz parametre olarak dikkat çekmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Heyelan koşullandırma faktörlerin önem dereceleri; a) RF, b) XGBoost

Bu çalışmada faktörlerin önem dereceleri ile ilgili olarak elde edilen bulguların, Akinci ve ark., (2020) ile Akinci (2022) tarafından yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Akinci ve ark., (2020); Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan çalışma alanının heyelan duyarlılık haritasını RF algoritmasını kullanarak üretmişlerdir. Araştırmacılar, bu çalışmada da RF algoritmasında olduğu gibi (Şekil 20a), çalışma bölgesinde heyelanların meydana gelmesinde en az etkili olan faktörlerin TWI ve eğrilik olduğunu belirlemişlerdir. Eğim, yükseklik, litoloji,

fay hatlarından olan uzaklık ve arazi örtüsü ise sırasıyla en önemli faktörler olarak belirlenmiştir. Akinci (2022) tarafından sonraki yıllarda yapılan çalışmada ise yine Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan çalışma alanının yağış tetikleyici ya da yağıştan kaynaklı heyelan duyarlılık haritaları ANN, SVM, RF ve GBM algoritmaları kullanılarak üretilmiştir. Akinci (2022), RF algoritmasına dayalı heyelan duyarlılık modeli için eğriliğin en önemsiz faktör olduğunu belirlemiştir. Yağış, yükseklik, litoloji, drenaj yoğunluğu ve fay hatlarına uzaklık ise heyelanların meydana gelmesinde en önemli faktörler olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Heyelanların meydana gelmesinde etkili olan faktörlerin frekans oranları

Faktör	Alt Sınıf	Piksel Sayısı	Heyelanlı Piksel Sayısı	Heyelan Yüzdesi (%)	Alt Sınıfın Yüzdesi (%)	Frekans Oranı (FR)
Yükseklik (m)	0 – 186	1064340	14926	25,974	22,135	1,1734
	186 – 372	1567681	18664	32,478	32,603	0,9962
	372 – 558	909717	9897	17,222	18,919	0,9103
	558 – 744	377545	70	0,122	7,852	0,0155
	744 – 930	242241	0	0	5,038	0
	930 – 1116	177894	0	0	3,699	0
	1116–1302	136502	0	0	2,839	0
	1302–1488	103430	0	0	2,151	0
	1488–1674	151921	1943	3,381	3,160	1,070
Eğim (°)	1674–1860	77106	11966	20,823	1,604	12,9852
	0 – 5	217574	2723	4,739	4,525	1,0472
	5 – 10	128687	9711	16,899	2,676	6,3142
	10 – 15	338690	12094	21,045	7,044	2,9878
	15 – 20	589748	10636	18,508	12,265	1,5090
	20 – 25	767973	7966	13,862	15,972	0,8679
	25 – 30	863152	5831	10,147	17,951	0,5653
	30 – 35	799382	4603	8,010	16,625	0,4818
	35 – 40	586402	2460	4,281	12,195	0,3510
Fay hatlarına uzaklık (m)	40 – 45	319489	1031	1,794	6,644	0,2700
	45 –76.084	197280	411	0,715	4,103	0,1743
	0 – 400	938577	18021	31,359	19,520	0,6224
	400 – 800	813765	10494	18,261	16,924	0,9268
	800 – 1200	696852	7084	12,327	14,492	1,1756
	1200–1600	636883	1998	3,477	13,245	3,8096
	1600–2000	502599	1263	2,198	10,453	4,7559
	2000–2400	373339	1271	2,212	7,764	3,5105
	2400–2800	340076	1394	2,426	7,073	2,9156
	2800–3200	245300	9144	15,912	5,102	0,3206
	3200–3600	149683	6797	11,828	3,123	0,2631
	3600–4461.15	111303	0	0	2,314	0

Tablo 2 (devamı). Heyelanların meydana gelmesinde etkili olan faktörlerin frekans oranları

Faktör	Alt Sınıf	Piksel Sayısı	Heyelanlı Piksel Sayısı	Heyelan Yüzdesi (%)	Alt Sınıfın Yüzdesi (%)	Frekans Oranı (FR)
Litoloji	Qal	173504	2209	3,844	3,608	0,0653
	Tet	29731	0	0	0,618	0
	Tek	1555363	20244	35,228	32,347	1,0891
	Tekba	13483	223	0,388	0,280	1,3839
	Tee	262241	430	0,748	5,454	0,1372
	Tpeb	186199	322	0,560	3,872	0,1447
	KTc	346887	12266	21,345	7,214	2,9587
	KTct3	674950	2319	4,035	14,037	0,2875
	KTck	221288	3695	6,430	4,602	1,3972
	KTct2	45739	374	0,651	0,951	0,6842
	Kça	991656	13385	23,292	20,624	1,1294
	Kçat1	159509	1099	1,912	3,317	0,5765
	Kk	130766	564	0,982	2,720	0,3609
Arazi Örtüsü	Kkdt	17056	336	0,585	0,355	1,6483
	112	70457	43	0,075	1,465	0,0511
	121	22692	0	0	0,472	0
	122	36341	2447	4,258	0,756	5,6341
	123	9992	0	0	0,208	0
	222	1006175	13189	22,951	20,925	1,0968
	242	16982	156	0,271	0,353	0,7686
	243	425268	15020	26,137	8,844	2,9552
	311	745269	11777	20,494	15,499	1,3222
	312	3936	0	0	0,082	0
	313	2406096	14618	25,438	50,040	0,5083
	324	57928	216	0,376	1,205	0,3119
	523	7240	0	0	0,151	0

Yükseklik açısından yapılan incelemede çalışma alanındaki heyelanların yaklaşık %58'inin, 0 – 372 m arasında meydana geldiği tespit edilmiştir (Tablo 2). Çalışma bölgesindeki yerleşim alanları ve çay bahçeleri çoğunlukla bu yükseklikler arasında bulunmaktadır (Akinci ve ark., 2020). Çan ve Duman (2017) tarafından yapılan çalışmada da yükseklik açısından bu çalışma ile benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Çan ve Duman (2017), Artvin ilinin Hopa ilçesinde 24 Ağustos 2015 tarihinde aşırı yağışların tetiklediği heyelanların kıyı kuşağı boyunca dağılım gösterdiğini ve heyelanların %80'inin yükseklik olarak 350 m'nin altındaki yerlerde meydana geldiğini belirtmiştir.

Arazi örtüsü katmanı için yapılan değerlendirmelerde, mevcut heyelanların %49,36'sının tarım alanları içerisinde kaldığı tespit edilmiştir (Tablo 2). Akinci, (2022), aynı bölgede yapılan çalışmada, heyelanların büyük çoğunluğunun ormanlık alanlardan dönüştürülerek elde edilen çay tarım alanları içerisinde kaldığını

dile getirmiştir. Benzer sonuçlara Aksoy (2011) tarafından Arhavi ve çevresinin heyelan duyarlılığını değerlendirildiği çalışmada da ulaşılmıştır. Aksoy (2011), Arhavi ve çevresinde meydana gelen heyelanların özellikle çaylık alanlar içerisinde, nispeten orta derecede eğimli ve ayrışma derinliğinin çok fazla olmadığı alanlarda gerçekleştiğini belirlemiştir. Diğer taraftan, Türkiye Ormancılar Derneği, Hopa ilçesi ve çevresinde 24 Ağustos 2015 tarihinde meydana gelen sel ve heyelan felaketi hakkında kapsamlı bir rapor hazırlamıştır (URL-6). Bu raporda, “çalışma bölgesinde çay yetiştiriciliği yapılan sahaların ortalama eğiminin %50 civarında olduğu (eğimin zaman zaman %100 ve daha yüksek olduğu çok dik alanların da azımsanmayacak kadar fazla olduğu), yağışların bol olduğu bölgede çay bahçelerindeki suyun zararsız bir şekilde tahliye edilmesi için su tahliye (drenaj) kanallarının tesis edilmediği, ayrıca çay bahçelerinin hemen üstünde veya altında binalar ve yollar yapılarak yamaç dengesinin bozulduğu ve tüm bu faktörlerin heyelanları tetiklediği” belirtilmiştir.

Çalışma bölgesindeki heyelanların yaklaşık %80’i üç formasyonda (%23,292’si Kampaniyen-Maastrichtiyen yaşlı Çağlayan formasyonunda (Kça), %21,345’i Maastrichtiyen-Daniyen yaşlı Cankurtaran formasyonunda (KTc) ve %35,228’si Orta Eosen yaşlı Kabaköy formasyonunda (Tek)) meydana gelmiştir (Tablo 2). Jeoloji Mühendisleri Odası tarafından 24 Ağustos 2015 tarihinde aşırı yağışlar nedeniyle meydana gelen heyelanların etkin olduğu alanlarda yapılan incelemelerde; “bölgeyi oluşturan ve yukarıda litolojileri belirtilen kaya topluluklarının atmosferik koşullar altında ayrışarak toprak zeminlere dönüştüğü, aşırı nem ve yağışların etkisiyle toprak zeminlerin suya doymuş hale geldiği, üst kısımda yer alan ayrışmış birimler ile onun altında ayrışmamış birimler arasındaki geçirimsizlik farklılığının oluştuğu, vadilerde suyun aşındırma etkisi de dikkate alındığında; topografik eğimin dik veya fazla olduğu bölgelerde; kaya zeminlerin üzerinde yer alan toprak zeminlerin kendi ağırlıkları altında akarak heyelanlara neden olduğu tespit edilmiştir (URL-7).

Fay hatlarına yakınlık açısından yapılan incelemede ise heyelanların yaklaşık %31’inin faylara 0 - 400 m metre mesafede, %18’inin 400 – 800 m mesafede, %12’sinin ise 800 – 1200 m mesafede meydana geldiği tespit edilmiştir (Tablo 2). Akinci (2022) tarafından Arhavi, Hopa ve Kemalpaşa ilçelerini kapsayan bölgede yapılan çalışmada da heyelanların yaklaşık %48’inin faylara 1000 m mesafede

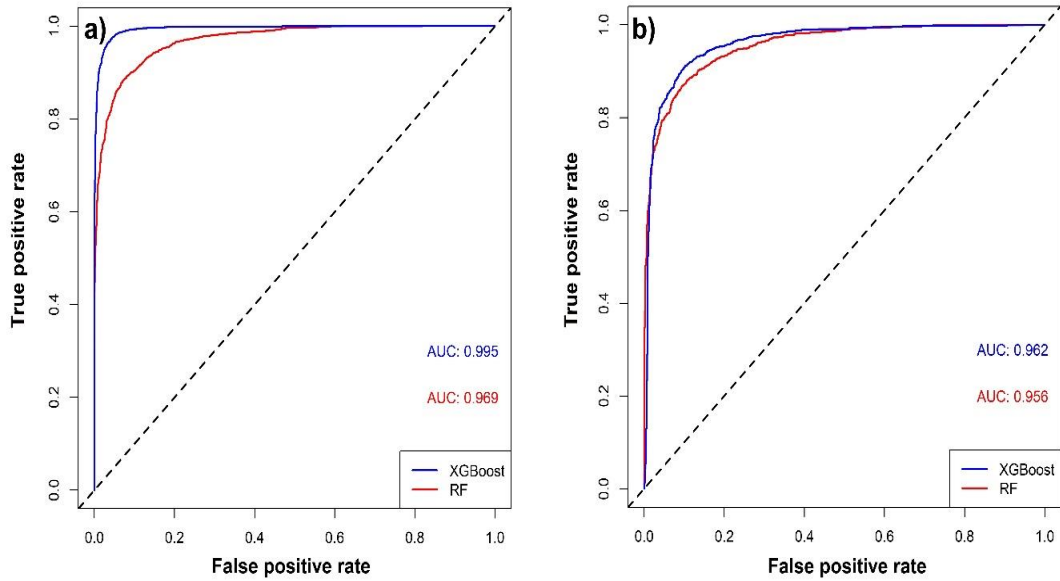
meydana geldiği belirtilmiştir. Ancak araştırmacı, bulguların literatürle uyumlu olmasına rağmen çalışma alanında heyelanları tetikleyen faktörün aktif tektonik olduğuna dair önceki çalışmalarda herhangi bir kanıt bulunmadığını da dile getirmiştir.

5.2. Model Performanslarının Karşılaştırılması

Farklı makine öğrenmesi modelleri kullanılarak üretilen heyelan duyarlılık haritalarının bilimsel olarak kabul görebilmeleri ve yetkililer tarafından zarar azaltma çalışmalarında kullanılabilmeleri için doğrulanmaları gerekmektedir (Yavuz Ozalp ve ark., 2023). Literatürdeki birçok çalışmada doğrulaması yapılmayan heyelan duyarlılık haritalarının hiçbir önemi olmadığı ve bilimsel bir değer taşımadığı vurgulanmıştır (Chen ve ark., 2019; Achour ve Pourghasemi, 2020; Arabameri ve ark., 2020). Bu çalışmada, modellerin değerlendirmesi ve performanslarının karşılaştırılması için alıcı işlem karakteristik (Receiver Operating Characteristic - ROC) eğrisi ve ROC eğrisi altındaki alan (Area Under Curve - AUC) yöntemi kullanılmıştır. AUC-ROC, heyelan duyarlılık haritalarının tahmin kalitesini nicel olarak değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan ve iyi bilinen yöntemlerden biridir (Yan ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2019; Shou ve Lin 2020; Hu ve ark., 2020). ROC eğrisi, düşey ekseninde gerçek pozitif oranının (True Positive Rate - TPR) ve yatay ekseninde yanlış pozitif oranının (False Positive Rate - FPR) gösterildiği bir grafikdir (Akinci ve Yavuz Ozalp, 2021). ROC eğrisinde, duyarlılık modelinin doğruluğunu ya da performansını değerlendirmek için kullanılan en önemli gösterge, eğri altındaki alan (AUC) değeridir. İdeal bir model 1.0'a yakın bir AUC değeri sunarken, 0.5'e yakın bir değer modelin yanlış olduğunu göstermektedir. Chen ve ark., (2018), Jiao ve ark., (2019) ile Wu ve ark., (2020) çalışmalarında, genel olarak, 0.5 ile 0.6 arasında değişen AUC değerinin zayıf, 0.6-0.7 arasında değişen AUC değerinin ortalama, 0.7-0.8 arasında değişen AUC değerinin iyi, 0.8-0.9 arasında değişen AUC değerinin çok iyi ve 0.9-1.0 arasında değişen AUC değerinin ise mükemmel performans gösterdiğini belirtmişlerdir (Akinci ve Yavuz Ozalp, 2021).

Genel olarak, bir duyarlılık modelini doğrulamak için iki farklı ROC eğrisi kullanır. Bunlar başarı oranı (success rate) ve tahmin oranı (prediction rate) eğrileridir (Akinci, 2022). Bu çalışmada kullanılan heyelan duyarlılık modellerinin sonuçları da

başarı oranı ve tahmin oranı eğrileri kullanılarak doğrulanmıştır. Bu amaçla, eğitim ve test veri seti kullanılarak sırasıyla başarı oranı ve tahmin oranı eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 21). Başarı oranı eğrisi, heyelan duyarlılık modellerinin eğitim veri setindeki mevcut heyelan alanlarını ne kadar iyi sınıflandırdığını açıklamak için kullanılırken, tahmin oranı eğrisi modellerin bilinmeyen heyelanları ya da gelecekte yaşanması muhtemel heyelanları ne kadar iyi tahmin edebileceğini açıklamak için kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2020; Rabby ve Li, 2020; Wubalem, 2021). Başarı oranı eğrisi, eğitim veri kümesini kullandığı için heyelan duyarlılık modellerinin tahmin kapasitesini değerlendirmek için uygun bir yöntem değildir. Heyelan duyarlılık modellerinin ve heyelan koşullandırma faktörlerinin heyelanları ne kadar iyi tahmin ettiğini açıklayabilmek için tahmin oranı eğrisi kullanılmaktadır (Althuwaynee ve ark., 2012; Akinci ve Yavuz Ozalp, 2021).



Şekil 21. ROC eğrileri; a) başarı oranı eğrisi, b) tahmin oranı eğrisi

Şekil 21'deki başarı oranı eğrisi incelendiğinde RF modelinin AUC değerinin 0.969 ve XGBoost modelinin AUC değerinin ise 0.995 olduğu görülmektedir (Şekil 21a). Tahmin oranı eğrilerinin AUC değerleri dikkate alındığında ise çalışma bölgesi için her iki modelinde mükemmel performans gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 21b). Bununla birlikte, 0.962 AUC değerine sahip olan XGBoost modelinin RF modelinden daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Akinci ve ark., (2022) tarafından Artvin'in Şavşat ilçesinin heyelan duyarlılığının değerlendirildiği

Çalışmada da araştırmacılar RF, GBM ve XGBoost modellerini kullanmışlardır. Modellerin performanslarının tahmin oranı eğrisi kullanılarak değeriendirildiği çalışmada XGBoost modelinin diğer modellerden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Alkan Akıncı ve Akıncı (2023) tarafından yapılan çalışmada ise Manavgat ilçesinin orman yangını duyarlılık haritalarını üretmek için ANN, GBM, RF ve XGBoost algoritmaları kullanılmıştır. AUC-ROC dışında 4 performans değeriendirme metriği (overall accuracy, precision, recall ve F1-score) daha kullanan araştırmacılar, XGBoost'un tüm metriklerde diğer algoritmalara göre üstün olduğunu belirlemişlerdir.



6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, RF ve XGBoost makine öğrenme modelleri kullanılarak Artvin ilinin Hopa ilçesinin heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Duyarlılık modellerinde; yükseklik, bakı, eğrilik, arazi örtüsü, litoloji, drenaj ağlarına uzaklık, fay hatlarına uzaklık, yola uzaklık, eğim ve TWI faktörleri kullanılmıştır. Çalışmada Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından arazi çalışmaları sonucunda üretilen heyelan envanter haritası kullanılmıştır. Üretilen heyelan duyarlılık haritalarında çalışma alanı; çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beş duyarlılık sınıfına ayrılmıştır. Modellerin tahmin yetenekleri (prediction capability), tahmin oranı eğrisi kullanılarak değerlendirilmiştir. RF ve XGBoost modellerinin tahmin oranları 0,956 ve 0,962 olarak hesaplanmıştır. Doğrulama sonuçlarına göre çalışma bölgesindeki heyelan duyarlılık değerlendirmesinde, XGBoost modelinin RF'den daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Heyelan duyarlılık parametrelerinin önem dereceleri açısından yapılan değerlendirmede, eğriliğin heyelan duyarlılığında en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, yükseklik, fay hatlarına yakınlık, eğim, litoloji ve arazi örtüsü heyelanların meydana gelmesinde en etkili faktörler olarak belirlenmiştir.

Hopa ilçesinde heyelanların neden olduğu zararları azaltmak, can ve mal güvenliği sağlamak için aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi önerilmiştir:

- XGBoost algoritması ile üretilen heyelan duyarlılık haritası, güncel halihazır haritalar ve imar planları ile karşılaştırılarak heyelan duyarlı bölgelerdeki binalar ve kamu tesisleri belirlenmeli, vatandaşların can ve mal güvenliğini sağlayacak mühendislik tedbirleri alınmalıdır,
- Yerleşim alanlarının seçiminde heyelan duyarlılığının yüksek olduğu alanlardan uzak durulmalı, heyelan duyarlılığının yüksek olduğu yerlerde kalan mevcut yerleşim alanları için zarar azaltıcı tedbirler alınmalıdır,
- Kentlerin gelişme alanlarının belirlenmesinde, enerji nakil hatları, kanalizasyon ve içme suyu sistemleri gibi altyapı tesislerinin yer seçiminde heyelan duyarlılık haritalarından yararlanılmalıdır,
- Yüksek ve çok yüksek derecede heyelan duyarlılığına sahip olan köylerde, özellikle eğimli yamaçların yakınlarında yanlış arazi kullanımı faaliyetlerine

(yol ve bina inşası için kontrolsüz kazı çalışmaları ve ormanlık alanların tahribatı gibi) izin verilmemelidir,

- Heyelan envanter haritaları güncellenmeli ve heyelan duyarlılık haritaları güncel altlıklarla yeniden üretilmelidir,
- Çalışma alanındaki kayaçların ayrışma durumları heyelan duyarlılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, heyelan duyarlılık haritalama konusunda uzman jeoloji mühendislerinden yardım alınarak kayaçların ayrışma dereceleri belirlenmeli ve litoloji-ayrışma durumu heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında bir parametre olarak kullanılmalıdır,
- Çay tarımının yapıldığı alanlarda drenaj sistemleri geliştirilmeli ve fazla suyun araziden tahliyesi sağlanmalıdır,
- Çalışma bölgesinde ormanlık alanlar korunmalı ve bu alanların tahrip edilerek tarımsal alanlara dönüştürülmesi engellenmelidir.

KAYNAKLAR

- Achour, Y., Garia, S. ve Cavaleiro, V., 2018. GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Z zere River basin and its surrounding area, Northwest Covilh , Portugal, *Saudi Society for Geosciences*, 11: 550.
- Achour, Y. ve Pourghasemi, H. R., 2020. How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3): 871-883.
- AFAD, 2018. Türkiye’de afet yönetimi ve doğa kaynaklı afet istatistikleri, T.C. İişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- AFAD, 2021. Artvin İRAP- İl afet risk azaltma planı. T.C. Artvin Valiliği İl Afet ve Acil durum Müdürlüğü (Artvin AFAD), Artvin.
- AFAD, 2022. Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü, T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Akgun, A. ve Bulut, F., 2007. GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. *Environmental Geology*, 51: 1377-1387.
- Akgun, A., Dag, S. ve Bulut, F., 2008. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models, *Environmental Geology*, 54: 1127–1143 .
- Akıncı, H., Dogan, S., Kılıçoğlu, C. ve Keçeci, S. B., 2010. Samsun il merkezinin heyelan duyarlılık haritasının  retilmesi , *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi* , 2(3): 13-27.
- Akıncı, H., Doğan, S. ve Kılıçoğlu, C., 2011. Frekans Oranı metodu kullanılarak samsun il merkezinin heyelan duyarlılık haritasının  retilmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- Akinci, H., Kilicoglu, C. ve Dogan, S., 2020. Random forest-based landslide susceptibility mapping in coastal regions of Artvin, Turkey, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9): 553.
- Akinci, H. ve Yavuz Ozalp, A., 2021. Landslide susceptibility mapping and hazard assessment in Artvin (Turkey) using frequency ratio and modified information value model, *Acta Geophysica*, 69(3): 725-745.
- Akinci, H., 2022. Assessment of rainfall-induced landslide susceptibility in Artvin, Turkey using machine learning techniques, *Journal of African Earth Sciences*, 191: 104535.

- Akinci, H., Zeybek, M. ve Dogan, S., 2022. Evaluation of Landslide Susceptibility of Şavşat District of Artvin Province (Turkey) Using Machine Learning Techniques, Landslides, In: Zhang, Y. ve Cheng, Q. (ed.), Chapter 5, IntechOpen, London, United Kingdom, ISBN: 978-1-83969-023-5, 69-95.
- Aksoy, G., 2011. Arhavi (Artvin) ve çevresinin heyelan duyarlılık analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Alkan Akıncı, H. ve Akıncı, H. 2023. Machine learning based forest fire susceptibility assessment of Manavgat district (Antalya), Turkey. *Earth Science Informatics*, 16(1): 397–414.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B. ve Lee, S., 2012. Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping, *Computers & Geosciences*, 44: 120-135.
- Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Chen, W., Blaschke, T., Tien Bui, D., 2020. Landslide Susceptibility Evaluation and Management Using Different Machine Learning Methods in The Gallicash River Watershed, Iran, *Remote Sensing*, 12(3), 475.
- Aydinoğlu, A. Ç. ve Altürk, G., 2021. Heyelan duyarlılık haritalarının istatistik ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak üretilmesi: Taşlıdere Havzası örneği (Rize), *Coğrafya Dergisi*, (43): 159-176 .
- Aydoğan, E., 2019. Yukarı Karasu Havzası'nın Aziziye-Aşkale arasında kalan bölümünün heyelan duyarlılık analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.
- Aydoğan, E. ve Dağ, S., 2023. İstatistiksel yöntemlerle Yukarı Karasu Havzası'nın Kuzeydoğu bölümünün (Erzurum) heyelan duyarlılık analizi, *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(1): 64-82.
- Başara, A. C. ve Şişman, Y., 2022. Frekans Oranı, Kanıt Ağırlığı ve Lojistik Regresyon yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3): 647-660.
- Bragagnolo, L., Silva, R. V. ve Grzybowski, J. M. V., 2020. Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility, *Catena*, 184: 104240.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning*, 45(1): 5-32.
- Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S. ve Tofani, V., 2013. Landslide susceptibility estimation by Random Forests technique: sensitivity and scaling issues, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 2815–2831.

- Chen, W., Li, W., Hou, E., Zhao, Z., Deng, N., Bai, H. ve Wang, D., 2014. Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model for the Chencang District of Baoji, China, *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 4499–4511.
- Chen, T. ve Guestrin, C., 2016. XGBoost: A scalable tree boosting system, KDD '16 Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco (s. 785-794), doi: 10.1145/2939672.2939785.
- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Tien Bui, D., Duan, Z. ve Ma, J., 2017. A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility, *Catena*, 151: 147-160.
- Chen, W., Peng, J., Hong, H., Shahabi, H., Pradhan, B., Liu, J., Zhu, AX., Pei, X. ve Duan, Z., 2018. Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China, *Science of the Total Environment*, 626: 1121-1135.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R. Ve Shahabi, H., 2018. Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling, *Science of the Total Environment*, 644: 1006-1018.
- Chen, W., Zhao, X., Shahabi, H., Shirzadi, A., Khosravi, K., Chai, H., Zhang, S., Zhang, L., Ma, J., Chen, Y., Wang, X., Ahmad, B. B. ve Li, R., 2019. Spatial prediction of landslide susceptibility by combining evidential belief function, logistic regression and logistic model tree, *Geocarto International*, 34(11): 1177-1201.
- Chen, T., Zhu, L., Niu, RQ., Trinder, C. J., Peng, L. ve Lei, T., 2020. Mapping landslide susceptibility at the Three Gorges Reservoir, China, using gradient boosting decision tree, random forest and information value models, *Journal of Mountain Science*, 17(3): 670-685.
- Coşgun, E., Karabulut, E. ve Karaağaoğlu, E., 2009. Random forest ve destek vektör makinesi yöntemleri ile gen seçimi ve sınıflama, 6. İstatistik Kongresi, Antalya, s.222-234.
- CRED, 2023. EM-DAT Disaster Classification, <https://www.emdat.be> (8 mayıs 2023, 14:11).
- Cruden, D. M., 1991. A simple definition of a landslide, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43: 27-29.
- Çan, T. ve Duman, T., 2017. Hopa (Doğu Karadeniz) Bölgesi Heyelan Olay Envanter Haritası ve Yağış Şiddet İlişkisi, Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, 12-14 Ekim 2017, Çukurova Üniversitesi, Adana.

- ÇEM, 2016. Doğu Karadeniz heyelanları, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, Ankara.
- ÇŞB, 2018. Genel Arazi Örtüsü Dağılımı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/genel-arazi-ortusu-dagilimi-i-85766> (19 Haziran 2023, 15:46).
- Çölkesen, İ. ve Şahin, E. K., 2020. Heyelan duyarlılık analizinde eğitim seti boyutunun harita doğruluğuna etkilerinin araştırılması, *Harita Dergisi*, 164: 43-60.
- Dağ, S., 2007. Çayeli(Rize) ve çevresinin istatistiksel yöntemlerle heyelan duyarlılık analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dağ, S. ve Bulut, F., 2012. Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye), *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36(1): 35-62.
- Dag, S., Akgun, A., Kaya, A., Alemdag, S. ve Bostanci, H. T., 2020. Medium scale earthflow susceptibility modelling by remote sensing and geographical information systems based multivariate statistics approach: an example from Northeastern Turkey, *Environmental Earth Sciences*, 79: 468.
- Dağdelenler, G., 2013. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde örneklem ve doğrulama stratejilerinin değerlendirilmesi (Gelibolu Yarımadası'nın doğu kesimi), Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara.
- Dalkes, M. ve Korkmaz, M. S., 2023. Analitik Hiyerarşi süreci ve Frekans Oranı yöntemlerinin heyelan duyarlılık analizinde karşılaştırılması: Trabzon ili Akçaabat ve Düzköy ilçeleri örneği, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1): 16-38.
- Demir, G., 2018. Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Suşehri (Sivas) heyelan duyarlılık analizi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1): 96-112.
- Demirağ, O., 1991. Jeofizik yöntemlerle heyelan araştırmaları / Landslide investigations by geophysical methods, *Jeofizik Dergisi*, 5(1): 43-50.
- Dereli, M. A., 2019. Giresun iline ait Coğrafi Bilgi Sistemleri destekli heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi, *4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences*, 4(6): 473-476 .
- Dixit, A., 2017. Ensemble machine learning. Birmingham, UK.: Packt Publishing Ltd.

- Dou, J., Yunus, A. P., Tien Bui, D., Merghadi, A., Sahana, M., Zhu, Z., Chen, C.W., Khosravi, K., Yang, Y. ve Pham, B. T., 2019. 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: 332-346.
- Dou, J., Yunus, A. P., Xu, Y., Zhu, Z., Chen, C., Sahana, M., Yang, Y., Pham, B. T. ve Khosravi, K., 2019. Torrential rainfall-triggered shallow landslide characteristics and susceptibility assessment using ensemble data-driven models in the Dongjiang Reservoir Watershed, China, *Natural Hazards*, 97: 579-609.
- Duman, N. ve İrcan, M. R., 2022. Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı Çankırı merkez ilçesinin taşkın duyarlılık analizi, *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (9): 50-66.
- Eker, R. ve Aydın, A. 2014. Ormanların heyelan oluşumu üzerindeki etkileri , *Turkish Journal of Forestry*, 15(1): 84-93.
- Erener, A. ve Düzgün, H.S.B., 2010. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway), *Landslides*, 7(1): 55-68.
- Ergünay, O., 2002. Afete hazırlık ve afet yönetimi raporu. Türkiye Kızılay Derneği Genel Müdürlüğü Afet Operasyon Merkezi (AFOM), Ankara (Yayımlanmamıştır).
- Erkal, T. ve Değerliyurt, M., 2009. Türkiye’de afet yönetimi, *Doğu Coğrafya Dergisi*, 14(22): 147-164.
- Ersoy, Ş., 2020. Kütle hareketleri ve şev duyarlılığı, Fen Bilgisi Öğretmenliği Lisans Programı Yer Bilimi Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi Eğitim Fakültesi.
- Fidancı, A. S., 2017. Random forest algoritması, <https://www.slideshare.net/SezerFidanc/random-forest-algoritmas> (27 Haziran 2023, 13:04)
- Gholami, M., Ghachkanlu, E. N., Khosravi, K. ve Pirasteh, S., 2019. Landslide prediction capability by comparison of frequency ratio, fuzzy gamma and landslide index method, *Journal of Earth System Science*, 128(2), 42.
- Gökçeoğlu, C. ve Ercanoğlu, M., 2001. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler, *Yerbilimleri Dergisi*, 23: 189-206.
- He, Q., Shahabi, H., Shirzadi, A., Li, S., Chen, W., Wang, N., Chai, H., Bian, H., Ma, J., Chen, Y., Wang, X., Chapi, K. ve Ahmad, B. B., 2019. Landslide spatial modelling using novel bivariate statistical based Naïve Bayes, RBF

Classifier, and RBF Network machine learning algorithms, *Science of the Total Environment*, 663: 1-15.

Hong, H., Pourghasemi, H. R. ve Pourtaghi, Z. S., 2016. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models, *Geomorphology*, 259: 105-118.

Hong, H., Miao, Y., Liu, J. ve Zhu, AX., 2019. Exploring the effects of the design and quantity of absence data on the performance of random forest-based landslide susceptibility mapping, *Catena*, 176: 45-64.

Hu, Q., Zhou, Y., Wang, S. ve Wang, F., 2020. Machine learning and fractal theory models for landslide susceptibility mapping: Case study from the Jinsha River Basin, *Geomorphology*, 351: 106975.

Huang, Y. ve Zhao, L., 2018. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines, *Catena*, 165: 520-529.

IBM, 2023. What is machine learning? <https://www.ibm.com/topics/machine-learning> (10 Haziran 2023, 10:40).

Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., Liu, C., Liu, Z., Zha, Z. ve Li, R., 2019. Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China, *Catena*, 183: 104221.

Karsli, F., Atasoy, M., Yalcin, A., Reis, S., Demir, O. ve Gokceoglu, C., 2009. Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey). *Environ Monit Assess*, 156: 241-255.

Kavzoğlu, T., Şahin, E. K. ve Çölkesen, İ., 2012. Heyelan duyarlılığının incelenmesinde regresyon ağaçlarının kullanımı: Trabzon örneği, *Harita Dergisi*, 78(147): 21-33.

Kelle, A. C. ve Yüce, H., 2022. MQTT trafiğinde DoS saldırılarının makine öğrenmesi ile sınıflandırılması ve modelin SHAP ile yorumlanması, *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 3(1): 50-62 .

KGM, 2015. Heyelan Tanımlama ve Veri Oluşturma Kılavuzu, T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı ,Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Kılıçoğlu, C. 2020. Frekans Oranı metodu ve Bayesyen Olasılık modeli kullanılarak Samsun ili Vezirköprü ilçesinin heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1): 138-154.

- Kumar, D., Thakur, M., Dubey, C. S. ve Shukla, D. P., 2017. Landslide susceptibility mapping & prediction using support vector machine for Mandakini River Basin, Garhwal Himalaya, India, *Geomorphology*, 295: 115-125.
- Lee, S. ve Min, K., 2001. Statistical analyses of landslide susceptibility at Yongin, Korea, *Environmental Geology*, 40(9): 1095-1113.
- Lee, S. ve Choi, J., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model, *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8): 789-814.
- Lee, S., Choi, J. ve Min, K., 2004. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea, *International Journal of Remote Sensing*, 25(11): 2037-2052.
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., Avatar, R. ve Abderrahmane, B., 2020. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance, *Earth-Science Reviews*, 207: 103225.
- MGM, 2021. 2020 yılı meteorolojik afetler değerlendirmesi, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara
- MGM, 2022. Türkiye meteorolojik afetler değerlendirmesi (2010-2021), T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MTA, 2023. Heyelan, Maden, Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA), <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/heyelan> (18 Haziran 2023, 11:24).
- Muratlar, E. R., 2020. XGBoost Nasıl Çalışır? Neden İyi Performans Gösterir? <https://www.veribilimiokulu.com/xgboost-nasil-calisir/> (29 Haziran 2023, 15:37).
- Okan, N., 2003. Heyelan geliyor der, *Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi*, (7): 14-17.
- Öz, T. ve Günek, H., 2021. Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi, *International Journal of Geography and Geography Education*, (44): 396-412.
- Özşahin, E., 2015. Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla heyelan duyarlılık analizi: Ganos Dağı örneği (Tekirdağ), *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1): 47-63.
- Öztürk, K., 2002. Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri, *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(2): 35-50.

- Pal, M., 2005. Random forest classifier for remote sensing classification, *International Journal of Remote Sensing*, 26(1): 217-222.
- Park, S. ve Kim, J., 2019. Landslide Susceptibility Mapping Based on Random Forest and Boosted Regression Tree Models, and a Comparison of Their Performance, *Applied Sciences*, 9(5), 942.
- Pourghasemi, H. R. ve Rahmati, O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162: 177-192.
- Pradhan, B., 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS, *Computers & Geosciences*, 51: 350-365.
- Rabby, Y. W. ve Li, Y., 2020. Landslide Susceptibility Mapping Using Integrated Methods: A Case Study in the Chittagong Hilly Areas, Bangladesh, *Geosciences*, 10(12): 483.
- Reif, D. M., Motsinger, A. A., McKinney, B. A., Crowe, J. E. ve Moore, J. H. 2006, Feature selection using a random forests classifier for the integrated analysis of multiple data types, Proceedings of the 2006 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology, 171-178.
- Roy, D., Sarkar, A., Kundu, P., Paul, S. ve Sarkar, B. C., 2023. An ensemble of evidence belief function (EBF) with frequency ratio (FR) using geospatial data for landslide prediction in Darjeeling Himalayan region of India, *Quaternary Science Advances*, 11: 100092.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., Paz, A.D. ve Marturia, J., 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain), *Natural Hazards*, 30: 281-295.
- Shou, KJ. ve Lin, JF., 2020. Evaluation of the extreme rainfall predictions and their impact on landslide susceptibility in a sub-catchment scale, *Engineering Geology*, 265: 105434.
- Soma, A. S., Kubota, T. ve Mizuno, H., 2019. Optimization of causative factors using logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility assessment in Ujung Loe Watershed, South Sulawesi Indonesia, *Journal of Mountain Science*, 16(2): 383-401.
- Şahin, E. K., 2018. Heyelan duyarlılık haritası için adımsal regresyona dayalı Faktör Seçme yönteminin etkinliğinin araştırılması, *Harita Dergisi*, 84(159): 1-15.
- Taşoğlu, E., 2020. Devrek ilçesinin (Zonguldak) Yapay Sinir Ağları ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O. ve Revhaug, I., 2012. Landslide susceptibility assessment in Vietnam using support vector machines, decision tree and naive bayes models, *Mathematical Problems in Engineering*, (6): 1-26.
- Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C. ve Scarascia-Mugnozza, G., 2015. Comparison of logistic regression and random forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy), *Geomorphology*, 249: 119-136.
- Ulamış, K., 2022. Kütle hareketleri, Jeoloji Mühendisliği Lisans Programı Mühendislik Jeolojisi Ders Notu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- Ulusay, R., 2007. Heyelanlar ve mühendislik şevlerindeki duraysızlıklar: türleri, etkileri ve zararların azaltılması, Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu, Samsun.
- UNISDR&CRED, 2015. The human cost of weather related disasters 1995-2015.
- URL-1. İletişim Başkanlığınca “Asrın Felaketi: 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri” kitabı yayımlandı, <https://www.iletisim.gov.tr/turkce/haberler/detay/iletisim-baskanliginca-asrin-felaketi-06-subat-2023-kahramanmaras-depremleri-kitabi-yayimlandi> (10 Mayıs 2023, 17:03).
- URL-2. Heyelan Nedir? Heyelan Çeşitleri ve Sınıflandırılması, <https://insapedia.com/heyelan-nedir-heyelan-cesitleri-ve-siniflandirilmesi/> (24 Mayıs 2023, 20:43).
- URL-3. Heyelan Araştırma Çalışmaları, <https://proteknik.com/faaliyet-alanlari/heyelan-arastirma-calismasi/> (25 Mayıs 2023, 15:03).
- URL-4. Makine Öğrenimi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Makine_öğrenimi (26 Haziran 2023, 14:17)
- URL-5. CORINE Land Cover (CLC 2018), <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018> (26 Temmuz 2023, 15:37)
- URL-6. Türkiye Ormancılar Derneğinin Hopa sel ve heyelan inceleme raporu, <https://www.ormancilar Dernegi.org/Documents/a278232e-0da1-45ed-bf00-6d97d9968c7a.pdf> (3 Ağustos 2023, 14:05)
- URL-7. Hopa’da çözüm üretmek yerine “yara sarma” politikası yeterli değil. https://www.jmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=7928&tipi=2&%20sube=0.%20Turkish (3 Ağustos 2023, 14:42)
- Varnes, D. J. 1958. Landslides types and processes. E. B. Eckel, Landslides and Engineering Practice. Special Report 29, NAS-NRC Publication 544. Washington, DC: Highway Research Board, 20–47.

- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In *Landslides: Analysis And Control*. Edited by R. L. Schuster And R. J. Krizek. Transportation Research Board, National Academy Of Science, Washington. Special Report 176, Chapter 2, 11-33.
- Yalçın, A., 2007. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde Analitik Hiyerarşi yönteminin ve CBS'nin kullanımı, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 22(3): 1-14.
- Yan, F., Zhang, Q., Ye, S. ve Ren, B., 2019. A novel hybrid approach for landslide susceptibility mapping integrating analytical hierarchy process and normalized frequency ratio methods with the cloud model, *Geomorphology*, 327: 170-187.
- Yangın, G., 2019. XGBOOST VE Karar Ağacı tabanlı algoritmaların diyabet veri setleri üzerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yavuz Ozalp A., Akinci H. ve Zeybek M., 2023. Comparative Analysis of Tree-Based Ensemble Learning Algorithms for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study in Rize, Turkey. *Water*, 15(14): 2661.
- Yılmaz, O. S., 2023. Frekans Oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler köyü örneği, *Geomatik* , 8(1): 42-54 .
- Youssef, A. M. ve Pourghasemi, H. R., 2021. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia, *Geoscience Frontiers*, 12: 639-655.
- Zhang, YX., Lan, HX., Li, LP., Wu, YM., Chen, JH. ve Tian, NM., 2020. Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China, *Journal of Mountain Science*, 17(2): 340-357.
- Zhou, C., Yin, K., Cao, Y., Ahmed, B., Li, Y., Catani, F. ve Pourghasemi, H. R., 2018. Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China, *Computers and Geosciences*, 112: 23-37.
- Zhao, Y., Wang, R., Jiang, Y., Liu, H. ve Wei, Z., 2019. GIS-based logistic regression for rainfall-induced landslide susceptibility mapping under different grid sizes in Yueqing, Southeastern China, *Engineering Geology*, 259: 105147.
- Wilson, J. ve Gallant, J., 2000. *Terrain Analysis: Principles and Applications* (1 edition b.). Wiley.

- Wu, Y., Ke, Y., Chen, Z., Liang, S., Zhao, H. ve Hong, H., 2020. Application of alternating decision tree with AdaBoost and bagging ensembles for landslide susceptibility mapping, *Catena*, 187: 104396.
- Wubalem, A, 2021. Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia, *Geoenvironmental Disasters*, 8(1): 1-21.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : MUTLU, Özge

Uyruğu :

Doğum tarihi ve yeri :

Medeni hali :

Yabancı dili :

Telefon :

Faks :

E-posta

Eğitim

<u>Derece</u>	<u>Eğitim Birimi</u>	<u>Mezuniyet Tarihi</u>
Lise	Hopa Nuri Vatan Anadolu Lisesi	2014
Lisans	K.T.Ü Harita Mühendisliği Bölümü	2019
Yüksek Lisans	A.Ç.Ü. L.E.E. Harita Mühendisliği	2023