

**MAKİNE ÖĞRENMESİ TEKNİKLERİ KULLANILARAK
HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİ:
İNEGÖL (BURSA) ÖRNEĞİ**

**PRODUCTION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS
USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES: İNEGÖL
(BURSA) EXAMPLE**

ELİF GÜLER

PROF. DR CEVDET COŞKUN AYDIN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır

Aileme, sevgili eşim **Murat**'a
ve canım oğlum **Kerem**'e

ÖZET

MAKİNE ÖĞRENMESİ TEKNİKLERİ KULLANILARAK HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİLMESİ: İNEGÖL (BURSA) ÖRNEĞİ

ELİF GÜLER

Yüksek Lisans, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cevdet Coşkun AYDIN

Haziran 2025, 77 sayfa

Bu tez çalışmasında, Bursa ili İnegöl ilçesi için heyelan duyarlılığının belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, heyelan oluşumuna etki eden 13 çevresel faktör (eğim, bakı, yükselti, litoloji, toprak grubu, NDVI, arazi kullanımı, yağış, fay hattına, akarsuya ve yola uzaklık, eğrisellik ve topografik nemlilik indeksi) Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında analiz edilerek her biri 5 sınıfa yeniden sınıflandırılmış ve tematik uygunluk haritaları üretilmiştir. Çalışma alanında baskın faktör sınıfı belirlenerek sınıflandırma algoritmalarına girdi veri seti hazırlanmıştır. Sınıflandırma sürecinde dört farklı makine öğrenmesi algoritması olan Lojistik Regresyon (LR), Destek Vektör Makineleri (DVM), LightGBM ve Rastgele Orman (RO) karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Modellerin başarısı doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru gibi metriklerle değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, Rastgele Orman (Random Forest) algoritması %98 doğruluk, %98 kesinlik, %98 duyarlılık ve %98 F1 skoru ile en yüksek başarıyı göstermiştir. Çalışma, Rastgele Orman algoritmasının mekânsal veri analizlerinde yüksek performans sunduğunu ve CBS ile entegre edildiğinde heyelan risk haritalamasında güvenilir bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymuştur. Üretilen duyarlılık haritası, afet

risklerinin azaltılması ve arazi kullanım planlamasında karar destek aracı olarak değerlendirilebilecek niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Duyarlılık, Makine Öğrenmeleri, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri, LightGBM, Rastgele Orman.

ABSTRACT

PRODUCTION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES: İNEGÖL (BURSA) EXAMPLE

Elif GÜLER

Master of Sciences, Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Cevdet Coşkun AYDIN

July 2025, 77 pages

In this thesis study, a research was conducted to determine landslide susceptibility in the İnegöl district of Bursa province. 13 environmental factors influencing landslide occurrence (slope, aspect, elevation, lithology, soil group, NDVI, land use, precipitation, distance to fault lines, distance to streams, distance to roads, curvature, and topographic wetness index) were analyzed within a Geographic Information System (GIS) environment; each factor was reclassified into five classes and thematic suitability maps were generated. The dominant class for each factor in the study area was identified to assemble the input dataset for the classification algorithms. Four different machine learning algorithms (Logistic Regression, Support Vector Machines, LightGBM, and Random Forest) were applied in a comparative framework. Model performance was assessed using metrics such as accuracy, precision, recall, and F1 score. According to the analysis results, the Random Forest algorithm achieved the highest performance with 98% accuracy, 98% precision, 98% recall, and a 98% F1 score. The study demonstrates that Random Forest delivers high performance in spatial

data analyses and, when integrated with GIS, provides a reliable approach for landslide risk mapping. The resulting susceptibility map can serve as a decision-support tool for disaster risk reduction and land-use planning.

Keywords: Landslide Susceptibility, Machine Learning, Logistic Regression, Support Vector Machines, Light Gradient Boosting Machine, Random Forest

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında katkı sunan, destek olan ve yanımda olan herkese en içten duygularıyla teşekkür etmek isterim. Akademik yolculuğum boyunca bilgi birikimi, rehberliği ve ilham verici yaklaşımıyla bana her zaman yol gösteren, çalışmamın her aşamasında kıymetli katkılarını esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Cevdet Coşkun AYDIN'a en derin şükranlarımı sunarım. Tez süreci boyunca yolumu aydınlatan, fikirleriyle katkıda bulunan ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen Öğr. Gör. Dr. Ayhan DOĞAN'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, tez yazım aşamasında bilgi birikimi ve yapıcı desteğiyle süreci kolaylaştıran Dr. Murat BAŞEĞMEZ'e de katkılarından dolayı minnettarım. Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatım boyunca sevgisini ve desteğini daima yanımda hissettiğim anneme ve her zaman başaracağıma inanan babama sonsuz teşekkür ederim. Her daim yanımda olduklarını hissettiren, sevgileri ve varlıklarıyla güç veren kız kardeşlerim Sema ve Deniz'e destekleri için minnettarım.

Ve elbette, bu zorlu süreçte gösterdiği sabır, anlayış ve sonsuz desteğiyle her adımda yanımda olan sevgili eşim Murat GÜLER ile, bana her zaman ilham kaynağı olan canım oğlum Kerem GÜLER'e kalpten teşekkür ederim. Onların varlığı, bu çalışmayı tamamlayabilmemde en güçlü motivasyonum olmuştur.

Haziran 2025, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Coğrafi Bilgi Sistemleri.....	4
1.1.1. Coğrafi Bilgi Sistemi'nin Heyelan Duyarlılık Haritası Üretimindeki Rolü.....	5
1.1.1.1. Heyelan Değerlendirme Yöntemleri.....	7
1.1.1.1.1. Nitel Yöntemler.....	8
1.1.1.1.2. Nicel Yöntemler.....	8
1.2. Makine Öğrenme Teknikleri.....	9
1.2.1. Lojistik Regresyon.....	9
1.2.2. Destek Vektör Makineleri.....	10
1.2.3. Rastgele Orman.....	10
1.2.4. LightGBM	11
1.3. Doğruluk Analizi.....	11
1.3.1. Doğruluk.....	12
1.3.2. Duyarlılık.....	12
1.3.3. Kesinlik.....	12
1.3.4. F1 Skoru.....	12
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	13

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Çalışma Alanı.....	16
3.1.1. Heyelan Envanter Haritası.....	17
3.2. Çalışmada Kullanılan Faktörler ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi.....	19
3.2.1. Eğim.....	21
3.2.2. Bakı	23
3.2.3. Yükselti	25
3.2.4. Eğrisellik	27
3.2.5. Topografik Nemlilik İndeksi (TNİ).....	29
3.2.6. Akarsulara Uzaklık.....	31
3.2.7. Yıllık Yağış Miktarı.....	33
3.2.8. Kara Yollarına Uzaklık.....	35
3.2.9. Fay Hattına Mesafe	37
3.2.10. Litolojik Yapı.....	40
3.2.11. Arazi Kullanım Durumu	42
3.2.12. Toprak Grubu	45
3.2.13. Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI).....	47
4. UYGULAMA	49
4.1. Uygunluk Haritalarının Oluşturulması.....	49
4.2. Makine Öğrenme Teknikleri ile Faktörlerin Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	52
4.3. Karar Haritalarının Oluşturulması.....	53
5. BULGULAR.....	59
5.1. Makine Öğrenme Tekniklerinin Çalışmaya Katkısı.....	60
5.2. Kullanılan Makine Öğrenme Tekniklerinin Çalışmaya Etkisi.....	60
5.3. RO Karar Haritasının İncelenmesi.....	62
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
7. KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Ana Bileşenleri.....	4
Şekil 3.1. İnegöl İlçesi Çalışma Alanı Haritası.....	17
Şekil 3.2. İnegöl İlçesi Heyelan Envanter Haritası.....	19
Şekil 3.3. Çalışma Alanı Eğim Haritası.....	22
Şekil 3.4. Çalışma Alanı Bakı Haritası.....	24
Şekil 3.5. Çalışma Alanı Yükselti Haritası.....	26
Şekil 3.6. Çalışma Alanı Eğim Şekli Haritası.....	28
Şekil 3.7. Çalışma Alanı Topoğrafik Nemlilik İndeksi Haritası.....	30
Şekil 3.8. Çalışma Alanı Akarsulara Mesafe Haritası.....	32
Şekil 3.9 Çalışma Alanı Yağış Miktarı Haritası.....	34
Şekil 3.10. Çalışma Alanı Yollara Mesafe Haritası.....	36
Şekil 3.11. Çalışma Alanı Fay Hattına Mesafe Haritası.....	38
Şekil 3.12. Çalışma Alanı Litoloji Haritası.....	41
Şekil 3.13. Çalışma Alanı Arazi Kullanım Haritası.....	43
Şekil 3.14. Çalışma Alanı Toprak Grubu Haritası.....	45
Şekil 3.15 Çalışma Alanı NDVI Haritası.....	47
Şekil 4.1. Çalışma Alanı Uygun Haritaları.....	51
Şekil 4.2. Çalışma Alanına Ait 31 Adet Bölge.....	52
Şekil 4.3. İnegöl İlçesi Heyelan Duyarlılık Haritası-LR Yöntemi.....	54
Şekil 4.4. İnegöl İlçesi Heyelan Duyarlılık Haritası-RO Yöntemi.....	55
Şekil 4.5. İnegöl İlçesi Heyelan Duyarlılık Haritası-SVM Yöntemi.....	56
Şekil 4.6. İnegöl İlçesi Heyelan Duyarlılık Haritası-LightGBM Yöntemi.....	57
Şekil 4.7. Farklı Teknikler ile Üretilen Heyelan Duyarlılık Haritalarının Karşılaştırılması.....	58

Şekil 5.1. RO Tekniğine Göre Üretilen Karar Haritasındaki Sınıf Oranları.....	63
Şekil 5.2. RO Tekniği Kullanılarak Hazırlanan Heyelan Duyrallık Haritası.....	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Heyelan türlerinin Sınıflandırması.....	5
Çizelge 1.2. Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesinde Kullanılan Yöntemler.....	8
Çizelge 1.3. Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	11
Çizelge 1.4. Modelin temsil ettiği sınıflar.....	12
Çizelge 3.1 Çalışmada Kullanılacak Verilere Ait Bilgiler.....	21
Çizelge 3.2. Eğitim Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları.....	23
Çizelge 3.3. Baki Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	25
Çizelge 3.4. Yükselti Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	27
Çizelge 3.5. Eğrisellik Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	29
Çizelge 3.6. TNİ Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	31
Çizelge 3.7. Akarsulara Mesafe Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	33
Çizelge 3.8. Yağış Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	35
Çizelge 3.9. Yollara Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	37
Çizelge 3.10. Fay Hattına Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	39
Çizelge 3.11. Fay Hattına Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	42
Çizelge 3.12. Arazi Kullanım Durumu Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları...	44
Çizelge 3.13. Toprak Grubu Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	46
Çizelge 3.14. Ndzi Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları	48
Çizelge 5.1. Makine Öğrenme Teknikleri Ağırlık Sonuçları.....	61
Çizelge 5.2. Makine Öğrenme Teknikleri Metrik Sonuçlar.....	62
Çizelge 5.3. Ro Karar Haritasına Ait Sınıflara Ait Yüzölçümleri ve Oranlar.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_2 Akış Toplama Alanı

$\tan \beta$ Lokal Eğim

Kısaltmalar

CBS Coğrafi Bilgi Sistemleri

RO Rastgele Orman

LR Lojistik Regresyon

LIGHTGBM Hızlı Gradyan Güçlendirme(Light Gradient Boosting Machine)

DVM Destek Vektör Makinesi

FO Frekans Oranı

YSA Yapay Sinir Ağları

NASA Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
(National Aeronautics and Space Administration)

SRTM Shuttle Radar Topography Mission

TNİ Topografik Nemlilik İndeksi

NDVI Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi

SYM Sayısal Yükseklik Modeli

HDH Heyelan Duyarlılık Haritaları

MTA Maden Tetkik ve Arama

TUREF Türkiye Ulusal Referans Sistemi

OSM Open Street Map

AFAD	Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
NIR	Near Infrared
ASM	Açısal İkinci Moment veya Düzenlilik Ölçütü(Angular Second Moment)
GOSS	Gradyan Tabanlı Tek Taraflı Örnekleme(Gradient-based one- sided sampling)
EFB	Özel Öznitelik Paketleme
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı
CORINE	Coordination Of Information On The Environment
CLC	CORINE Land Cover
TUCBS	Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi
ARAS	Afet Risk Analiz Sistemi
İRAP	İl Afet Risk Azaltma Planı
ROC	Receiver-Operating Characteristics
AUC	Area Under Curve
KNN	K-En Yakın Komşu
SAM	Sayısal Arazi Modeli
SNAP	Sertinel Uygulama Platformu
GLCM	Gri Düzey Ortaklık Matrisi(Gray Level Co-occurrence Matrix)

1. GİRİŞ

Doğal afet olarak tanımlanan insan kontrolü dışında gerçekleşen beklenmedik ve yıkıcı olaylar, toplumun yaşam, sağlık, mal varlığı ve güvenlik unsurlarını tehdit ederken; doğal çevre ve kamu altyapısında da ciddi zararlara yol açmaktadır [1]. Ülkemizde meydana gelen doğal afetlerin yol açtığı zararlar incelendiğinde, depremlerden sonra en fazla can ve mal kaybına neden olan afet türünün, kütle hareketleri şeklinde tanımlanan heyelanlar olduğu anlaşılmaktadır [2]. 1950’lerden bu yana yapılan bir çalışmaya göre meydana gelen tüm doğal afetler incelendiğinde gerçekleşen afetlerden etkilenen afetzede sayısı bakımından depremler 158.241 ile birinci sırada yer alırken heyelanlar 59.345 ile ikinci sırayı almıştır [3].

Heyelan, yerçekimi etkisiyle yüzeydeki kayaç, toprak ve diğer malzemelerin aşağıya doğru hareket ettiği bir doğal afet türüdür. Çoğunlukla dağlık ve eğimli arazilerde meydana gelir, ancak insan faaliyetleri ve doğal faktörlerin birleşimiyle herhangi bir arazi tipinde de görülebilir. Heyelanlar, genellikle aniden meydana gelir ve büyük can ve mal kayıplarına yol açabilir. Jeolojik yapılar, eğim, iklim koşulları, toprak türleri ve arazi kullanımı gibi çeşitli faktörlerin bir araya gelmesiyle tetiklenir [4,5].

Küresel ölümcül heyelan veri tabanına ilişkin 2004 – 2016 yılları arasında yapılan kapsamlı bir çalışmada bu yıllar arasında raporlanan 4.862 heyelanın 55.997 can kaybına yol açtığı; vakaların yaklaşık %75’inin Asya kıtasında gerçekleştiği ortaya konmuştur [6]. 2022 yılında yapılan bir çalışmada 1900-2022 yılları arasında meydana gelen doğal afetlerin en yoğun şekilde Asya kıtasında meydana geldiği belirtilmiş; bu kıtayı sırasıyla Amerika ve Afrika’nın izlediği ifade edilmiştir. Bölgesel açıdan bakıldığında ise en fazla afet olayının Güney Asya’da gerçekleştiği, ardından Güneydoğu Asya ve Güney Amerika bölgelerinin geldiği ortaya koyulmuştur [7].

Türkiye’deki afet istatistikleri, depremden sonra en yüksek can ve mal kaybının heyelanlardan kaynaklandığını göstermektedir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ’nın “Türkiye’nin Afet Risk Haritası” verilerine göre, 2021’de yalnızca 39 büyük heyelan olayı kaydedilmiş olmasına rağmen heyelanlar, depremden sonra en yıkıcı ikinci afet türü konumunu sürdürmektedir Bu durum, 2017’de başlatılan ve bugün Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) altyapısı üzerinden paylaşılan Afet Risk Analiz Sistemi (ARAS) kapsamında üretilen ulusal heyelan, kaya düşmesi ve çık

duyarlılık katmanları ile desteklenmektedir; ARAS, söz konusu afetlere ilişkin ayrıntılı envanter ve duyarlılık haritalarını tüm kamu kurumlarının kullanımına sunarak risk azaltma çalışmalarına stratejik veri sağlamaktadır [8]. 1929 yılı ve sonrasındaki Türkiye'de, 81 ilin 67'sinde can kaybına yol açan heyelan olayları rapor edilmiştir. Bu bağlamda, İstanbul 58 olayda 85 ölümle, Trabzon 38 olayda 336 ölümle ve Rize 30 olayda 191 ölümle en yüksek heyelan sayısına ve ölüm oranlarına sahip iller arasında öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, Giresun (19 olay), Artvin (12 olay), Ankara (12 olay), Antalya (12 olay) ve Bursa (10 olay) gibi iller de ölümle sonuçlanan heyelanların sıkça gözlendiği bölgeler arasında yer almaktadır [9]. Yapılan ilçe düzeyindeki analizler sonucunda, Türkiye'deki 922 ilçenin 679'unda, yani tüm ilçelerin yaklaşık %73,6'sında heyelan olaylarının gerçekleştiği belirlenmiştir [3].

Heyelanlar, can ve mal kayıplarına sebep olduğu gibi, afetten etkilenen bölgelerde taşınmazların değerinde azalma ve önleyici müdahaleler için yapılan yüksek maliyetli harcamalara da sebep olmaktadır [10]. Yaşanan maddi ve manevi kayıpların önüne geçmek için yapılacak en önemli adım, heyelan riski değerlendirmelerinde kullanılan en etkili araçlardan biri olan heyelan duyarlılık haritalarının (HDH) üretilmesidir. HDH jeolojik, topoğrafik ve çevresel faktörler gibi heyelan oluşumunda etkin olduğu düşünülen yerel koşullar dikkate alınarak hazırlanmaktadır. Bu koşullar dikkate alınarak gelecekte heyelan olma olasılığı yüksek alanlar belirlenmektedir [11]. Bu sayede, elde edilen haritalar yerel yönetimler ve afet planlaması yapan kurumlar için kritik bir rehber görevi görmektedir [10]. Afet yönetimi açısından önemli bir role sahip olan HDH'nın, yüksek doğruluk ve güncelliğe sahip biçimde üretilmesi hem ulusal hem de uluslararası ölçekte yürütülen çalışmalarda temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir [12].

12. Kalkınma Planı (2024-2028) 830.4 numaralı eylemiyle İl Afet Risk Azaltma Planlarının (İRAP) sürekli güncellenmesi ve karar süreçlerinde güncel duyarlılık haritalarının kullanılması zorunluluğunu vurgular. Dolayısıyla yüksek çözünürlüklü, veri odaklı HDH üretimi ulusal afet risk azaltma hedefleriyle doğrudan örtüşmektedir [13]. HDH üretilirken verilerin hızlı, ekonomik ve etkili bir biçimde analiz edilmesine imkân tanıyan CBS, heyelan duyarlılık haritalarında kullanılacak parametrelerin oluşturulmasında çok büyük kolaylık sağlamaktadır [14]. CBS' nin önemli olduğu kadar uzaktan algılama sistemleri de heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. CBS verilerin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesini sağlarken; uzaktan algılama yöntemleri, zaman kaybını ortadan kaldırarak veriyi kolaylıkla elde etmeyi sağlar [15].

Son yıllarda makine öğrenme algoritmalarının coğrafi bilgi sistemleriyle entegre edilerek heyelan duyarlılık analizlerinde kullanımı, risk değerlendirme çalışmalarında önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Özellikle LR, DVM, RO ve LightGBM gibi algoritmalar, hem modelleme başarımı hem de doğruluk değerleri açısından literatürde dikkat çekici sonuçlar sunmuştur. Lee [5], LR modelini kullanarak oluşturduğu heyelan duyarlılık haritasında yüksek doğruluk oranlarına ulaşırken Yılmaz [16], DVM ve yapay sinir ağları (YSA) gibi yöntemlerin geleneksel istatistiksel tekniklerden daha isabetli sınıflandırmalar gerçekleştirdiğini göstermiştir. Doğan [17], İzmir ili özelinde gerçekleştirdiği çalışmada dört farklı makine öğrenme tekniği kullanmış RO tekniğinin en başarılı sonucu verdiğini rapor etmiştir. Daha güncel yaklaşımlardan biri olan LightGBM, işlem hızının fazlalığı, yüksek verimlilik, düşük bellek kullanımı, daha iyi doğruluk, büyük ölçekli verileri işleme kapasitesine sahip olma gibi avantajları ile hem çevresel hem de mekânsal faktörlerin analizinde etkin bir rol üstlenmiştir [18]. Tüm bu teknikler, doğruluk analizi, sınıf ayrımı kabiliyeti ve performans istikrarı bakımından heyelan risk modellemelerinde güçlü alternatifler sunarak afet yönetimi ve arazi planlaması süreçlerine katkı sağlamaktadır.

Bu tez önerisinin sunulduğu tarihte Web Of Science ve Yüksek Öğretim Kurulu Başkanlığı Ulusal Tez Merkezi'nde yapılan literatür taraması sonucunda, HDH'nın üretilmesi ile ilgili çalışmaların ağırlıklı olarak ülkenin kuzey ve kuzeydoğu bölgelerine odaklandığını göstermektedir. Ancak yapılan araştırmada, Bursa ili İnegöl ilçesini kapsayan güncel bir heyelan duyarlılık haritası çalışmasına rastlanmamıştır. Bölgeye ilişkin sistematik ve güncel bilimsel çalışmaların sınırlı olması, bu alandaki araştırma boşluğunu ortaya koymuştur.

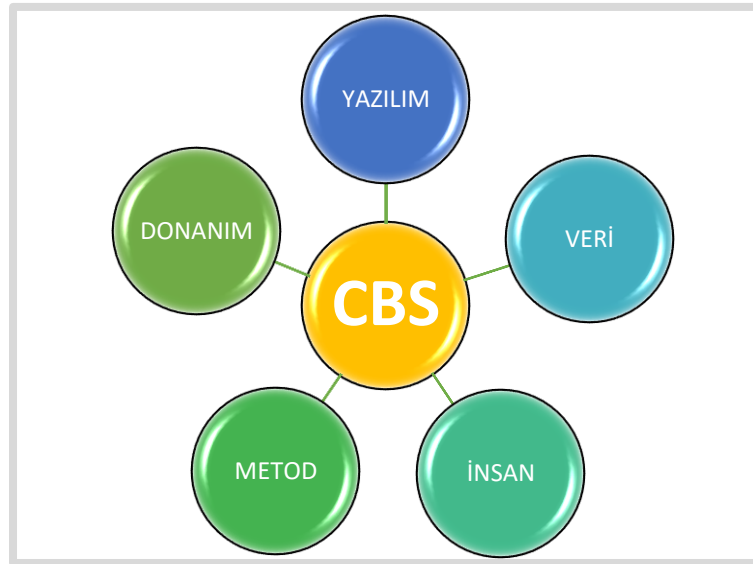
Bu çalışmada öncelikli olarak çalışma alanının jeolojik, topoğrafik ve meteorolojik özellikleri dikkate alınarak heyelan oluşumuna etki edebilecek 13 adet faktör (eğim, bakı, yükselti, fay hatlarına uzaklık, karayollarına uzaklık, akarsulara uzaklık, arazi kullanım durumu, litolojik yapı, yıllık yağış miktarı, eğrisellik, topografik nemlilik indeksi (TNİ), normalize edilmiş fark vejetasyon indeksi (NDVI) ve toprak grubu) belirlenmiştir. Bu faktörlere ait bazı veriler Maden Tetkik Arama Müdürlüğü (MTA), Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğünden temin edilip bazıları ise ücretsiz veri sağlayan sitelerden (earthexplorer, openstreetmap vs.) indirilip CBS ortamında işlenerek faktörlerin tematik haritaları oluşturulmuştur. Sonraki aşamada her bir faktöre ait haritalar yeniden sınıflandırılarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflandırmada 5=heyelan riski en yüksek alan, 1=heyelan riski en az alanı temsil etmektedir. Heyelana etki eden faktörlerin

ağırlıklarının makine öğrenme yöntemleriyle belirlenebilmesi için çalışma alanı 31 adet bölgeye ayrılarak her bir bölgede baskın gelen faktör sınıfı belirlenerek tablo haline getirilmiştir. Hazırlanan bu tablo 4 farklı makine öğrenme tekniği ile çalışılmak üzere makine öğrenmelerine girdi olarak kullanılmıştır. Faktörlere ait ağırlık değerleri ve metrik sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek doğruluğa sahip makine öğrenme tekniği belirlenerek bu teknikle karar haritası oluşturulmuştur.

1.1. Coğrafi Bilgi Sistemleri

CBS, yeryüzüne ilişkin mekânsal bilgiyi toplama, saklama, yönetme, işleme, çözümleme ve görselleştirme işlevlerini bütüncül biçimde yerine getiren kapsamlı bir sistemdir [19]. CBS'nin çok disiplinli yapısı; kentsel ve bölgesel planlama, tarım, ormancılık ve peyzaj tasarımı başta olmak üzere jeoloji, savunma ve güvenlik, turizm, arkeoloji, yerel yönetim hizmetleri, demografi, eğitim, çevre yönetimi ve sağlık gibi pek çok alanda geniş çapta uygulama bulmaktadır [20]. Coğrafi bilgi sistemlerinin işlevsel olarak etkin çalışabilmesi, en az beş temel bileşenin eş-zamanlı olarak bir arada bulunmasına bağlıdır [21].

CBS'nin sahip olduğu bileşenler Şekil 1.1'de gösterildiği üzere veri, insanlar, yazılım, donanım ve metotlardır.



Şekil 1.1. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Ana Bileşenleri

Donanım, bilgisayar sistemleri ile yazıcı, tarayıcı, çizici ve sayısallaştırıcı gibi çevre birimlerini kapsayarak mekânsal veriyi elde etme ve sunma altyapısını oluşturur.

Yazılım, konumsal veriyi depolayan, işleyen, sorgulayan ve görselleştiren algoritmik araçlar bütünü olup veri tabanı yönetiminden analize uzanan geniş bir fonksiyon seti sunar.

Veri, grafik (konumsal) katmanlar ile bunlara ait öznitelik tablolarından meydana gelir; üretimi ve standardizasyonu en fazla zaman ve maliyet gerektiren ögedir.

İnsan faktörü, sistemi tasarlayan uzmanlardan günlük kullanıcıya uzanan geniş bir yelpazede CBS'yi işlerlik kazandırır.

Metod, kurumun örgütsel düzenine ve yasal çerçevesine uygun plan, standart ve iş akışlarını tanımlayarak verinin edinilmesinden sonuçların sunumuna kadar tüm süreçlerin tutarlılığını güvence altına alır.

1.1.1. Coğrafi Bilgi Sistemi'nin Heyelan Duyarlılık Haritası Üretimindeki Rolü

Heyelan, eğimli arazilerde kaya, toprak ve benzeri malzemelerin yerçekimi nedeniyle ani ve hızlı bir şekilde aşağıya doğru hareket etmesiyle meydana gelen doğal bir afettir. Bu olay, özellikle dağlık bölgelerde yaygın olmakla birlikte, insan müdahaleleri ve çevresel koşulların etkisiyle farklı bölgelerde de ortaya çıkabilir. Heyelanlar; zemin özellikleri, eğim derecesi, yağış miktarı, litolojik yapı ve arazi kullanımı gibi çeşitli faktörlerin etkileşimi sonucu oluşur ve ciddi zararlara yol açabilir.

Heyelan türleri, hareketin şekli ve hızı açısından farklılık gösterir. Varnes [4] tarafından yapılan sınıflandırmaya göre Çizelge 1.1 'de gösterildiği üzere heyelan 6 ayrı gruba ayrılır. Bunlar; Düşme, devrilme, kayma, öteleme, akma ve karmaşık duyarsızlıklardır.

Çizelge 1.1. Heyelan türlerinin Sınıflandırması [22]

DUYARLILIK TÜRÜ	MALZEMENİN TÜRÜ		
	TOPRAK ZEMİNLER		ANA KAYA
	İNCE TANELİ	İRİ TANELİ	
DÜŞME	Zemin Düşmesi	Moloz Düşmesi	Kaya Düşmesi
DEVİRİLME	Zemin Devrilmesi	Moloz Devrilmesi	Kaya Devrilmesi

KAYMA	DÖNEL	Sınırlı Sayıda Birim	Zeminde Dairesel Kayma	Molozda Dairesel Kayma	Kayada Dairesel Kayma
	ÖTELENMELİ	Çok Sayıda Birim	Zeminde Blok Türü Ötelenme Zemin Kayması	Molozda Blok Türü Ötelenme Moloz Kayması	Kayada Blok Türü Ötelenme Kaya Ötelenmesi
YANAL YAYILMA			Zemin Yayılması	Moloz Yayılması	Kaya Yayılması
AKMA			Zemin Akması	Moloz Akması	Kaya Akması
KARMAŞIK DUYARSIZLIKLAR			Yukarıda belirtilen diğer duyarsızlık türlerinden ikisinin veya birkaçının birbirini izlemesiyle gelişen duyarsızlıklar		

Deprem, taşkın ve heyelan gibi doğal afetlere ilişkin tehlikelerin saptanmasında yardımcı olacak; uydu görüntüleri, hava fotoğrafları ve kartografik veriler CBS ortamında bir araya getirilerek olası risk düzeylerinin ayrıntılı biçimde değerlendirildiği heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmaktadır. Risk analizi süreçlerinde, sahada daha önce gerçekleşmiş ya da gelecekte ortaya çıkma olasılığı bulunan doğal tehlikeler ele alınmakta; bu doğrultuda, CBS veri tabanında sorgulamaya uygun veri katmanlarının seçilmesi zorunlu hâle gelmektedir. Veri tiplerinin belirlenmesi ise çalışmanın tasarımına göre CBS'nin değerlendirme araçları aracılığıyla yapılmakta ve potansiyel riskler nicel olarak ortaya konulmaktadır [11].

HDH jeolojik, topoğrafik ve çevresel faktörler gibi heyelan oluşumunda etkin olduğu düşünülen yerel koşullar dikkate alınarak hazırlanmaktadır. Bu koşullar dikkate alınarak gelecekte heyelan olma olasılığı yüksek alanlar belirlenmektedir. Belirlenen bu heyelan olma olasılığı yüksek alanlar sayesinde yetkili kişi ve kurumlar tarafından yapılacak olan iyileştirmeler sonucunda daha az can ve mal kaybı oluşacaktır [11].

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte son zamanlarda arazi çalışmalarının yerini CBS ile heyelan duyarlılık haritası üretimi ve analizi çalışmaları almıştır. Geçmişten bugüne birçok bilim insanı heyelan duyarlılık haritaları üretmek için CBS'ye dayalı teknikler uygulamaktadır [23].

CBS' nin önemli olduğu kadar uzaktan algılama sistemleride heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde önemli bir yer tutmaktadır. CBS verilerin toplanması, işlenmesi ve analiz edilmesini sağlarken; uzaktan algılama yöntemleri, zaman kaybını ortadan kaldırarak veriyi kolaylıkla elde etmeyi sağlar [15].

Bu çalışm kapsamında heyelana sebep olduğu düşünölen 13 parametreye ilişkin tüm mekânsal veriler, CBS tabanlı ArcMap 10.8 yazılımı kullanılarak sayısal bir veri tabanı hâline getirilmiştir. Faktör katmanlarının oluşturulmasında, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından yürütölen Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) projesi kapsamında sağlanan yüksek çözünürlüklü radar temelli sayısal yükseklik modeli (SYM) verilerinden faydalanılmıştır. Bu verilere ücretsiz bir şekilde kolaylıkla ulaşılabilir.

Analiz kapsamında değeriendirilen parametreler arasında eğim, bakı, yükselti, fay hattına mesafe, yola mesafe, arazi kullanım sınıfları, litolojik yapı, yıllık yağış miktarı, eğrisellik, topografik nemlilik indeksi (TNİ), normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI), toprak türü ve akarsuya olan mesafe yer almaktadır. Bu parametrelere ait tematik katmanlar, ArcMap 10.8 yazılımının bir modölü olan Spatial Analyst aracı kullanılarak raster tabanlı analizler ile hazırlanmıştır. Tüm veriler, güvenilir ulusal ve uluslararası kaynaklardan temin edilerek analiz sürecine uygun hâle getirilmiş ve ön işleme uğramıştır.

Çalışmada analizlerin raster veri yapısı üzerinde yürütölecek olması nedeniyle, tüm vektörel veriler uygun şekilde raster formata dönüştürölmüştür. Veri entegrasyonunun sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, tüm tematik katmanların aynı koordinat referans sistemi, ortak datum ve eşit piksel çözünürlüğü ile uyumlu olmasına dikkat edilmiştir.

Oluşturulan tüm tematik haritalar makine öğrenme tekniklerinde kullanılmak üzere 5 sınıfa yeniden sınıflandırılarak renklendirilmiştir. Bu renklendirme işlemine göre kırmızı heyelan riski yüksek olan bölgeyi, yeşil renk ise heyelan riski az bölgeyi göstermektedir.

1.1.1.1. Heyelan Değeriendirme Yöntemleri

Heyelan riskinin belirlenmesi için çeşitli değeriendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, genel olarak nitel ve nicel olmak üzere iki ana grupta ele alınabilir. Nitel

yöntemler, uzman deneyim ve görüşlerine dayanırken, nicel yöntemler ise matematiksel modelleme ve istatistiksel analizler kullanarak heyelan risklerini belirler [24,25].

1.1.1.1.1. Nitel Yöntemler

Nitel yaklaşımın temelinde, uzmanların deneyim ve görüşleri yer almaktadır. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde, heyelan envanter haritaları ile uzman değerlendirmelerine dayalı olarak ağırlıkları belirlenen çevresel faktör haritaları beraber kullanılmaktadır. Nitel yöntem, faktör ağırlıklarının belirlenmesinde farklı yöntemlerle desteklenir ve hiyerarşik bir yapıya sahip hesaplama süreçlerini kapsar. Oluşturulan bu hiyerarşik sezgisel model, mekânsal karar süreçlerinde karar destek mekanizmasının bir bileşeni olarak hizmet vermektedir[24].

1.1.1.1.2. Nicel Yöntemler

Nicel yöntemler, öznelikten uzak, içerisinde matematiksel, istatistiksel işlemler yer alır ve teknolojinin gelişmesi ile yapay zeka yöntemlerini içinde barındırır. Nesnel kriterlere dayanmasından dolayı farklı bölgeler için benzer veri setlerinde yaklaşık olarak aynı sonuçlar oluşturmaktadır. Bu yöntemlerde parametrelere atanan ağırlık değerleri ve son girdi parametrelerinin istatistiksel olarak değerlendirilerek denetlenebilmesi en önemli üstünlüğü olarak görülmektedir[25].

Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde kullanılan yöntemler Çizelge 1.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesinde Kullanılan Yöntemler [26]

HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER				
Niteliksel Yöntemler		Niceliksel Yöntemler		
Arazide Yapılan Jeomorfolojik Değerlendirmeler Ve Gözlemler	Parametre Haritalarının Kullanımı	İstatistiksel Analiz	Yapay Sinir Ağları Ve Bulanık	Jeoteknik Yöntem

	Mantıksal Analiz Yöntemleri	İki Değişkenli Parametre Analizi	Mantık Yaklaşımı	Deterministik Yaklaşım
	İndeks Haritalarının Çakıştırılması	Çok Değişkenli Parametre Analizi		Olasılık Yaklaşımı

Makine öğrenmesi, nicel yöntemlerin en etkili olanlarından biri olduğu ve genellikle doğruluk oranlarını artıran algoritmalar olduğu düşünülmektedir. Tez çalışması kapsamında makine öğrenmesi tekniklerinden Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman, Işık Gradyan Güçlendirme Makinesi yöntemlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

1.2. Makine Öğrenme Teknikleri

Makine öğrenmesi teknikleri, büyük ve çok boyutlu veri kümeleri üzerinde örüntü tanıma, sınıflandırma ve tahmin yapma yeteneği sayesinde, özellikle doğal afet riski gibi karmaşık mekânsal problemlerin modellenmesinde etkin bir araç olarak öne çıkmaktadır.

1.2.1. Lojistik Regresyon

LR, potansiyele sahip riskli alanları tahmin etmek için heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan matematiksel olarak kolay anlaşılabilen istatistiksel bir modeldir. Lojistik regresyon yönteminin tercih edilme nedeni, heyelan riski tespitinde hızlı ve doğru sonuçlar vermesidir [27]. LR algoritmasının temelinde, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasında çok değişkenli bir regresyon ilişkisi kurmak yer almaktadır [5]. Çoklu doğrusal regresyon modeli eşitlik 1.1 ile gösterilebilir.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1.1)$$

Doğrusal regresyon modelindeki Y , 0 ve 1 aralığındaki yanıt değişkeni, b_0 bağımlı değişken sabit sayısı, $b_1, \dots, b_n$ regresyon katsayılarını ve $x_1, \dots, x_n$ ise bağımsız değişkenlerin 1'den n 'e kadarki düzey değerlerini göstermektedir.

LR yönteminin en büyük avantajlarından biri, bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki bulunma gibi bir şartın olmamasıdır ve aynı zamanda değişkenlerin eşit istatistiksel

varyansa sahip olduğu düşünülmez. Ayrıca, LR yöntemi sürekli, kesikli veya bunların birleşimi olan nominal, eşit aralıklı ya da oransal ölçekteki değişkenlerle çalışabilme rahatlığına sahiptir. Literatürde birçok araştırmacı çalışmasında, LR yaklaşımının veri tabanlı heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında en uygun yöntemlerden biri olduğuna karar vermiştir [28,29].

1.2.2. Destek Vektör Makineleri

DVM, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde etkili sonuçlar veren bir makine öğrenmesi yöntemidir. Bu algoritmanın temel çalışma prensibi, eğitim verisindeki farklı sınıfları en iyi şekilde ayıran bir karar sınırı belirlemektir. DVM, sınıflar arasındaki en geniş boşluğu tanımlayan destek vektörlerini kullanarak bu hiperdüzlemi oluşturur. Optimize edilmiş bu sınır sayesinde, model eğitildikten sonra yeni veri noktalarının hangi sınıfa ait olduğu tahmin edilebilir.

Eğer veri kümesi doğrusal bir ayırma izin vermiyorsa, DVM kernel fonksiyonları aracılığıyla veriyi daha yüksek boyutlu bir uzaya taşır. Bu sayede, orijinal özellik uzayında doğrusal olarak ayıramayan veriler, yüksek boyutta doğrusal bir hiperdüzlemle sınıflandırılabilir. Bu teknik, modelin karmaşık (doğrusal olmayan) karar sınırları oluşturmasını sağlar.

Özetle DVM, marjinal sınıflandırma prensibine dayanan, esnek kernel yapılarıyla doğrusal olmayan problemleri de çözeabilen güçlü bir algoritmadır. Yılmaz [16] tarafından yapılan çalışmada, DVM'in yüksek doğruluk sağladığı bulunmuştur. DVM, özellikle toprak yapısı, eğim gibi faktörler için güçlü tahminler yapmaktadır.

1.2.3. Rastgele Orman

RO, temelde karar ağaçlarına dayanan bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Bu yöntem, belirli bir durma kriteri sağlanıncaya kadar veriyi ardışık olarak bölerek ağaç yapıları oluşturur [30]. RO Leo Breiman tarafından 2001 yılında geliştirilmiştir [31]. Algoritma, orijinal veri setinden örnekleme yöntemiyle rastgele alt kümeler seçerek çeşitliliği artırır. Her bir alt küme üzerinde, aşırı öğrenmenin önüne geçmek için derinliği kontrol edilmiş karar ağaçları eğitilir. Ağaçların her düğümünde rastlantısal özellik seçimi yapılması, modellerin birbirinden bağımsız ve farklı olma imkanını verir. Tahmin aşamasında,

sınıflandırma problemlerinde çoğunluk oylaması yapılarak, regresyon problemlerinde ise ortalama değerden yararlanılarak sonuç alınır.

1.2.4. LightGBM

LightGBM, ağaç tabanlı öğrenme algoritmaları kullanan bir gradyan artırma çerçevesidir. Dağıtılabilir ve verimli olacak şekilde tasarlanmış olan çerçeve hızlı eğitim süresi, yüksek verimlilik, düşük bellek kullanımı, daha iyi doğruluk, büyük ölçekli verileri işleme kapasitesine sahip olma gibi avantajlara sahiptir [18].

Makine Öğrenmesi yöntemlerinin kullanım alanı, avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılmış hali Çizelge 1.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 1.3. Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem	Kullanım Alanı	Avantajları	Dezavantajları
Lojistik Regresyon (LR)	İkili sınıflandırma	Basit, hızlı, yorumlanabilir	Lineer olmayan verilerle zor çalışır
Destek Vektör Makineleri (DVM)	Çoklu sınıflandırma	Yüksek doğruluk, güçlü doğrusal olmayan sınıflama	Hesaplama maliyeti yüksektir
Rastgele Orman (RO)	Çoklu sınıflandırma ve regresyon	Yüksek doğruluk, dayanıklı ve esnek	Hesaplama maliyeti yüksek olabilir
LightGBM	Büyük veri setleri	Hızlı ve etkili, yüksek doğruluk	Parametre ayarları karmaşık olabilir

1.3. Doğruluk Analizi

Bu çalışmada, uygulanan dört farklı makine öğrenmesi algoritmasının sınıflandırma performansını değerlendirmek amacıyla dört temel istatistiksel başarı ölçütü kullanılmıştır: doğruluk (accuracy), duyarlılık (recall), kesinlik (precision) ve F1 skoru (F1-score). Makine öğrenmesi modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan Kesinlik, Duyarlılık,

F1 Skoru ve Doğruluk metrikleri, farklı senaryolarda modelin gücünü ve zayıflıklarının belirlenmesi açısından önemlidir. [32] Değerlendirme süreci, her bir modelin çıktılarına ait karışıklık matrisi üzerinden yürütülmüştür. Modelin tahmin ettiği ve gerçek durumu temsil eden sınıflar Çizelge 1.4’de ifade edilmiştir.

Çizelge 1.4. Modelin temsil ettiği sınıflar

	Gerçek Pozitif (P)	Gerçek Negatif (N)
Tahmin Pozitif	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Tahmin Negatif	False Negative (FN)	True Negative (TN)

1.3.1. Doğruluk (Accuracy)

Modelin tüm tahminlerindeki doğru sınıflandırma oranını gösterir ve eşitlikteki formül ile hesaplanır.[33]

$$\text{Accuracy} = \frac{(TP + TN)}{(TP + FP + FN + TN)}$$

1.3.2. Duyarlılık (Recall veya Sensitivity)

Gerçek pozitif olayların ne kadarının doğru şekilde tahmin edildiğini gösterir. Eşitlik 1.2’deki formülle hesaplanır [33].

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1.2)$$

1.3.3. Kesinlik (Precision)

Modelin pozitif olarak tahmin ettiği alanların ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu gösterir. Eşitlik 1.3’deki formülle hesaplanır [33].

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1.3)$$

1.3.4. F1 Skoru (F1 Score)

F1 skoru, duyarlılık ve kesinliğin harmonik ortalamasıdır. Eşitlik 1.4’deki formülle hesaplanır [32].

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (1.4)$$

2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatür araştırmasında HDH'nın üretilmesinde kullanılan makine öğrenme tekniklerinden LR, DVM, RO ve LightGBM kullanılarak yapılan çalışmalar ile heyelana sebep olabileceği düşünülen parametreler incelenmiştir.

Sevgen [34], çalışmasında bir baraj rezervuarı çevresinde olası heyelan alanlarını belirlemek amacıyla ro, ysa ve lr yöntemleriyle heyelan duyarlılık haritaları üretmiş, modelleri fotogrametrik veriler ve öklidyen mesafe analizleriyle değerlendirmiştir. receiver-operating characteristics (roc) eğrileri ve area under curve (auc) değerlerine göre ro yöntemi 0,95 ile en yüksek doğruluğa ulaşırken, ysa 0,84 ve lr daha düşük başarı göstermiştir. tüm yöntemlerin kabul edilebilir sonuçlar verdiği, ancak ro'nun öne çıktığı belirlenmiştir.

Hussain [35], çalışmasında Muzaffarabad bölgesinde heyelan duyarlılık analizini gerçekleştirmek amacıyla XGBoost, RO ve k-En Yakın Komşu (KNN) algoritmalarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Dokuz farklı çevresel faktör kullanılarak geliştirilen modeller arasında en yüksek AUC değeri %89,5 ile RO algoritmasında elde edilmiştir. Çalışma, özellikle yükselti ve eğim değişkenlerinin heyelan oluşumunda belirleyici olduğunu ortaya koyarken, RO modelinin yüksek doğruluk kapasitesiyle bölgesel risk haritalaması için uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Yanar [36], çalışmasında kentsel gelişim alanlarında heyelan duyarlılığının belirlenmesi amacıyla Sentinel-2 uydu görüntüleri, yüksek çözünürlüklü Sayısal Arazi Modeli (SAM) ve litoloji verilerini kullanarak Ankara ili Mamak ilçesinde bir çalışma yürütmüştür. Sentinel Uygulama Platformu (SNAP) aracı ile gerçekleştirilen sınıflandırma sürecinde, RO algoritması Arazi Kullanımı / Arazi Örtüsü verilerinin üretiminde etkili olmuş; Gri Düzey Ortaklık Matrisi (GLCM)- Açısız İkinci Moment veya Düzenlilik Ölçütü (ASM) parametresi ise sanayi alanlarının yollardan ayrıştırılmasına katkı sağlamıştır. LR yönteminin doğruluğu, çalışma amacı açısından yeterli bulunmuştur.

Şahin [11], çalışmasında Bartın-Ulus ve Trabzon-Araklı bölgelerinde heyelan duyarlılığı analizini 20 çevresel faktörle gerçekleştirmiş; özellik seçimi algoritmaları ile optimum değişken kümeleri belirlemiştir. Bartın-Ulus için %84,2 doğrulukla DVM tabanlı Model, Trabzon-Araklı için ise %90,3 doğrulukla Model5 en başarılı sonuçları vermiştir. Çalışmada

DVM, LR'ye kıyasla yaklaşık %10 daha yüksek performans göstermiştir; bu da az fakat etkili faktörlerle model kurmanın başarısını artırdığını ortaya koymuştur.

Çölkesen [12], çalışmasında eğitim veri seti boyutunun HDH'nin doğruluğuna etkisini araştırmak amacıyla 12 farklı örnekleme oranı kullanarak LR ve RO algoritmaları ile modelleme yapmıştır. Genel doğruluk, AUC ve ROC eğrileriyle değerlendirilen modellerde, RO algoritmasının tüm örnekleme oranlarında LR yöntemine göre daha yüksek performans gösterdiği saptanmıştır. En uygun örnekleme oranları RO için 70: 30, LR için 30: 70 olarak belirlenmiştir.

Karakaş [37], Türkiye'nin kuzeyinde yer alan Ordu ili örneğinde, HDH üretmek amacıyla RO algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmada, topoğrafik ve litolojik parametreler ile yüksek mekânsal çözünürlüklü ortofotolar ve SAM verileri kullanılarak model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Heyelan envanteri, uzmanlar tarafından manuel olarak belirlenmiş ve model bu verilerle eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %83 doğruluk ve %92 kesinlik ile yüksek performanslı bir duyarlılık haritası üretilmiştir. Çalışma RO yönteminin fotogrametrik verilerle entegre edilerek heyelan riski taşıyan alanların yarı otomatik biçimde haritalanmasında etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Doğan [17], İzmir ili özelinde gerçekleştirdiği çalışmada, 6 ve üzeri büyüklükteki olası depremlerin odak konumları ve derinlikleri, 1900–2023 arası deprem katalog verileri ile Gutenberg-Richter yasasından elde edilen a ve b katsayıları kullanılarak RO, Karar Ağacı, LightGBM, CatBoost ve DVM gibi makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Yapılan performans değerlendirmelerinde tüm yöntemlerin yüksek doğruluk sağladığı, en başarılı sonucun ise RO algoritmasından elde edildiği belirtilmiştir.

Ke [18], çalışmasında LightGBM algoritmasının, geleneksel GBDT yaklaşımlarına kıyasla daha hızlı ve verimli çalışmak üzere geliştirilmiş yenilikçi bir makine öğrenmesi yöntemi olduğunu belirtmiştir. Bu yöntemde iki temel teknik öne çıkmaktadır: Gradyan Tabanlı Tek Taraflı Örnekleme (GOSS), bilgi kazancını tahmin ederken düşük gradyanlı örnekleri dışlayarak hesaplama yükünü azaltırken doğruluğu korur; Özel Öznitelik Paketleme (EFB) ise birbirini dışlayan öznitelikleri gruplayarak boyut sayısını düşürür. Bu teknikler sayesinde LightGBM, özellikle büyük veri setlerinde XGBoost'a kıyasla 20 kata kadar daha hızlı eğitim sunarken benzer doğruluk seviyesini koruyabilmektedir. Bu özellikleriyle, heyelan

duyarlılığı gibi çok boyutlu mekânsal analizlerde LightGBM etkili bir sınıflandırma algoritması olarak kullanılabilir.

Altürk [22], çalışmasında Rize ili Taşlıdere Havzası örneğinde sığ heyelanlara yönelik duyarlılık analizini gerçekleştirmek amacıyla istatistiksel ve makine öğrenmesi tabanlı modelleme yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, CBS tabanlı olarak elde edilen 15 farklı çevresel parametre (örneğin litoloji, eğim, pürüzlülük, drenaj yoğunluğu, yol mesafesi gibi) kullanılarak FO, LR ve YSA yöntemleriyle duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Model başarımı, AUC değerleri ile değerlendirilmiş; YSA tekniği 0,87 ile en yüksek doğruluğu sunarken, LR yöntemi 0,83 değerleriyle doğruluğu yüksek ve YSA'ya yakın performans göstermiştir.

Karakaş [38], 2020 Elazığ depremi sonrasında tetiklenen heyelanları kullanarak RO ve Çok katmanlı algılayıcı (MLP) yöntemlerinin heyelan duyarlılık haritalarındaki performansını karşılaştırmıştır. Eğitim için L1 ve L2 tipi heyelanlar, doğrulama için ise L3 ve L4 tipi heyelanlar kullanılmış; RO modeli AUC 0.93 değeriyle MLP 'ye (AUC 0.87) göre daha yüksek doğruluk sergilemiştir. Ayrıca, performans değerlendirmesinde hacim değişim haritaları ve dijital yükseklik modelleri de kullanılmıştır. Çalışma, yalnızca alt havzalardan elde edilen eğitim verileriyle bölgesel ölçekte güvenilir HDH üretilabileceğini göstermiştir. Bu yönüyle, afet sonrası güncel envanter verileri ile makine öğrenmesi tabanlı modellerin entegrasyonunun harita doğruluğunu artırmada etkili olduğu vurgulanmaktadır.

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.Çalışma Alanı

Bu çalışmanın uygulama alanı olarak seçilen İnegöl ilçesi, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Bursa ilinin doğusunda konumlanmıştır. İlçe, yaklaşık olarak 39°55' – 40°15' kuzey enlemleri ile 29°20' – 29°45' doğu boylamları arasında yer almakta ve Marmara Bölgesi'nin Güney Marmara bölümünde bulunmaktadır [39]. Toplam yüzölçümü yaklaşık 1.118 km² olan İnegöl, sahip olduğu topoğrafik çeşitlilik ve jeolojik yapı nedeniyle heyelan olaylarının meydana gelebileceği çok fazla potansiyel alana sahiptir [40].

İnegöl ilçesi, genel itibarıyla dalgalı ve engebeli bir arazi yapısına sahiptir. Rakım, ova kesimlerinde yaklaşık 250 metre civarındayken, dağlık kesimlerde 1.700 metreyi geçebilmektedir. İlçenin güney kesiminde yer alan Uludağ etekleri, topoğrafik eğimin arttığı, dolayısıyla heyelan açısından daha riskli bir alan olduğunu göstermektedir [40]. İnegöl'ün yüzey suları, Sakarya Nehri'nin kollarından biri olan Pazaryeri Deresi ile diğer küçük akarsular tarafından boşaltılmaktadır. Bu akarsuların özellikle eğimli arazilerde yüzey akışı ve su yüklenmesiyle birlikte heyelanları tetikleyici rol oynadığı düşünülmektedir [41].

İklim açısından İnegöl, Marmara ile İç Anadolu geçiş kuşağında yer alması nedeniyle hem karasal hem de deniz etkili iklim özelliklerini barındırmaktadır. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise soğuk ve yağışlı geçmektedir. İlçede yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık 13.5 °C olup, yıllık ortalama yağış miktarı 700–950 mm arasında değişmektedir [42]. En yoğun yağış genellikle ilkbahar aylarında (Nisan-Mayıs) görülmekte, bu dönemler heyelan oluşumu açısından kritik zaman dilimleri olarak yorumlanmaktadır [43].

İnegöl'ün doğal bitki örtüsü, yer yer antropojen etkilerle değişikliğe uğramış olsa da genellikle ormanlık alanlardan meydana gelmektedir. Özellikle güney yamaçlarda meşe, çam ve kayın türlerinin hâkim olduğu geniş yapraklı ormanlar mevcuttur [43]. Bu bitki örtüsü, yüzey erozyonunu azaltıcı ve zeminin stabilitesini artırıcı etkisiyle heyelan risk analizlerinde dikkate alınmasında fayda sağlayacak bir detaydır.

Söz konusu morfolojik, iklimatik ve hidrolojik özellikleri nedeniyle İnegöl ilçesi, heyelan duyarlılık modellemeleri için uygun bir doğal laboratuvar niteliğindedir. Geçmişte yaşanan birçok yüzey deformasyonu ve kütle hareketi, bu alanın duyarlılık analizleri açısından

bilimsel çalışmalara elverişli olduğunu ortaya koymaktadır [40]. Çalışma alanı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İnegöl İlçesi Çalışma Alanı Haritası

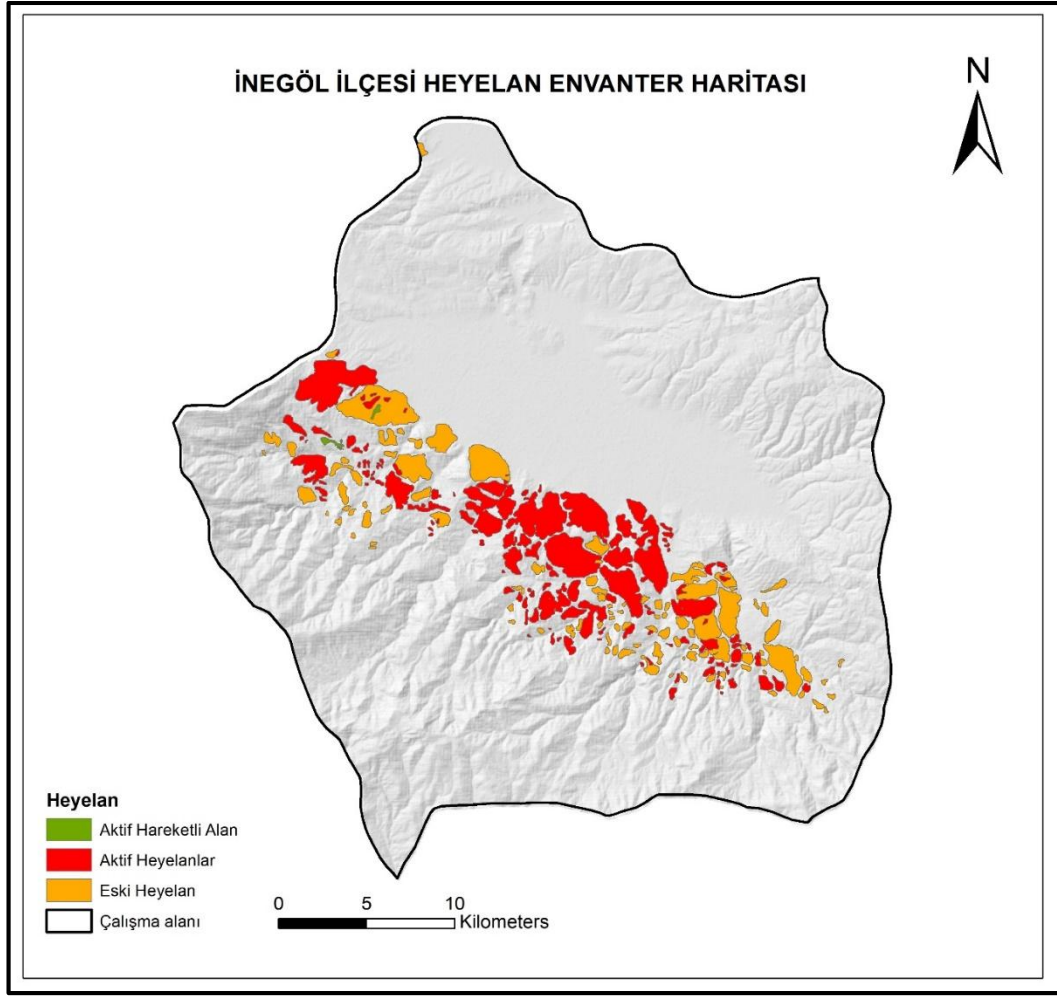
3.1.1. Heyelan Envanter Haritası

Heyelan envanter haritaları (HEH), geçmişte meydana gelmiş heyelan olaylarının konumlarını, boyutlarını, türlerini ve oluşum zamanlarını sistemli bir şekilde belgeleyen tematik haritalardır. Bu haritalar, heyelanların mekânsal dağılımını ve karakteristiklerini ortaya koyarak, risk değerlendirmesi ve arazi yönetimi süreçlerinde temel bir veri kaynağı olarak görev yapar. HEH'ler, heyelan tehlikesi ve duyarlılık analizleri için referans veri seti elde eder. Bu haritalar, geçmiş heyelanların dağılımını göstererek, gelecekteki heyelanların

olası konumlarını tahmin etmede önemli bir rol oynar. HEH'lerin hazırlanmasında, uzaktan algılama teknikleri ve CBS yaygın olarak kullanılır. Bu gibi teknolojiler, heyelanların tespit edilmesi, haritalanması ve analizinde yüksek doğruluk ve verimlilik sağlamaktadır.

Heyelan duyarlılık analizlerinde temel referans veri olarak kullanılan heyelan envanteri, bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından üretilmiş olan 1/25.000 ölçekli heyelan paftaları temel alınarak oluşturulmuştur. Bu paftalarda yer alan heyelan olaylarının mekânsal yayılımı, şekli ve tipi dikkate alınarak çalışma alanı içerisinde yer alan hareketli alanlar ve heyelanlar CBS ortamına aktarılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, İnegöl ilçesine ait heyelan envanteri üç ana kategoride sınıflandırılmıştır: aktif hareketli alanlar, aktif heyelan sahaları ve eski (stabil) heyelan alanları. Bu sınıflandırma, alandaki farklı heyelan karakteristiklerinin ayrı ayrı analiz edilmesine ve duyarlılık modelinin doğruluğunun artırılmasına imkan vermiştir.

Sonuç olarak, bölgedeki heyelan geçmişi ve mevcut tehlike durumunun daha sağlıklı yorumlanabilmesi adına oluşturulan bu çok katmanlı envanter verisi (Şekil 3.2) makine öğrenmelerinde hedef parameter olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.2. İnegöl İlçesi Heyelan Envanter Haritası

3.2.Çalışmada Kullanılan Faktörler ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi

Heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan parametreler, haritalama yaklaşımlarındaki farklılıklar ve çalışma alanlarının özgün özellikleri nedeniyle değişkenlik gösterebilmektedir. Bu bağlamda, hangi parametre kombinasyonlarının daha başarılı sonuçlar vereceği ya da hangilerinin yetersiz kalacağına dair genel geçer bir standart bulunmamaktadır. Başara [44] yaptığı çalışmada 1990-2016 yılları arasında meydana gelen heyelan olaylarında duyarlılık analizi, tehlike ve risk değerlendirmesi amacıyla yapılan 266 çalışmada kullanılan parametrelerin kullanım oranını sıralamıştır. Bu sıralamaya göre kullanma oranı en yüksek parametreler yamaç eğimi, litoloji, bakı, yükseklik, drenaj özellikleri, arazi kullanımı, eğrisellik, tektonik unsura uzaklık, bitki özellikleri – NDVI, malzeme özelliği, yollara uzaklık, yağış, topoğrafik nemlilik indeksi, deprensellik, yamaç özellikleri, akarsu aşındırma gücü indeksi, sediman taşıma gücü indeksi, morfoloji,

bozunma, sırtlara olan uzaklık, yıllık güneş radyasyonudur. Chowdhury [45], çalışması için yaptığı literatür araştırması sonucunda 45 tip heyelan faktörünün çalışmalarda kullanıldığını belirtmiş ve en sık kullanılan faktörlerin eğim açısı, arazi kullanımı ve arazi örtüsü, bakı, yükseklik, Jeoloji, NDVI, yoldan uzaklık, yağış ve dereden uzaklık olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmada, İnegöl ilçesi sınırları içerisinde heyelan duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, alanın mevcut fiziksel ve çevresel özellikleri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Yapılan kapsamlı literatür taraması ve alanın yüzey şekilleri, iklim koşulları, yer yapısı karakteristikleri göz önünde bulundurularak, heyelan oluşumuna doğrudan ya da dolaylı etki edebilecek 13 adet çevresel faktör belirlenmiştir. Kriter seçimi sürecinde, önceki benzer çalışmalarda sıkça kullanılan değişkenler dikkate alınmış ve bölgenin özgün doğa koşullarıyla uyumlu olacak biçimde belirlenmiştir. Faktörler belirlenirken yalnızca literatürde sıkça kullanılan kriterleri çalışmaya dahil etmek yanlış sonuçlar doğuracaktır, bu yüzden öncelikli olarak çalışma alanı hakkında detaylı bilgi sahibi olunmalı alana uygun faktör belirlenmelidir. Bir örnek verilecek olursa bu çalışmada arazi kullanım durumu faktörü kullanılmıştır. Çalışma alanı sadece tek bir arazi türünden oluşsaydı bu faktörü kullanmak anlamsız olacaktı. Ancak çalışma alanında yerleşim yeri, orman, sanayi alanı, maden sahası vb. alanlar mevcut olduğu için bu faktörün çalışmaya faydası olacağı düşünülerek çalışmaya dahil edilmiştir.

Söz konusu faktörlerin her biri, heyelan mekanizmasında etkili olan zemin özellikleri, yüzey suyu birikimi, bitki örtüsü yoğunluğu, topoğrafik yapı ve insan kaynaklı etkilerin (örneğin yol inşaatları) modellenmesine olanak tanımaktadır. Faktörler raster veri formatına dönüştürülerek sayısal ortamda analiz edilmeye uygun hale getirilmiş ve makine öğrenmesi algoritmalarında kullanılmak üzere sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada, analizlerin yerel düzeyde daha hassas ve doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla Türkiye Ulusal Referans Sistemi'ne (TUREF) dayalı, 30. doğu meridyenini merkez alan Transvers Merkator projeksiyonuna sahip TUREF / TM30 koordinat sistemi tercih edilmiştir. Çalışma alanı CBS ortamında, raster tabanlı olarak her bir piksel 27 x 27 m boyutunda temsil edilmektedir. Bu boyutların sebebi indirilen SYM veri çözünürlüğünün 27 x 27 m olmasıdır. Bu çalışma kapsamında kullanılacak olan verilere ilişkin bilgiler Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

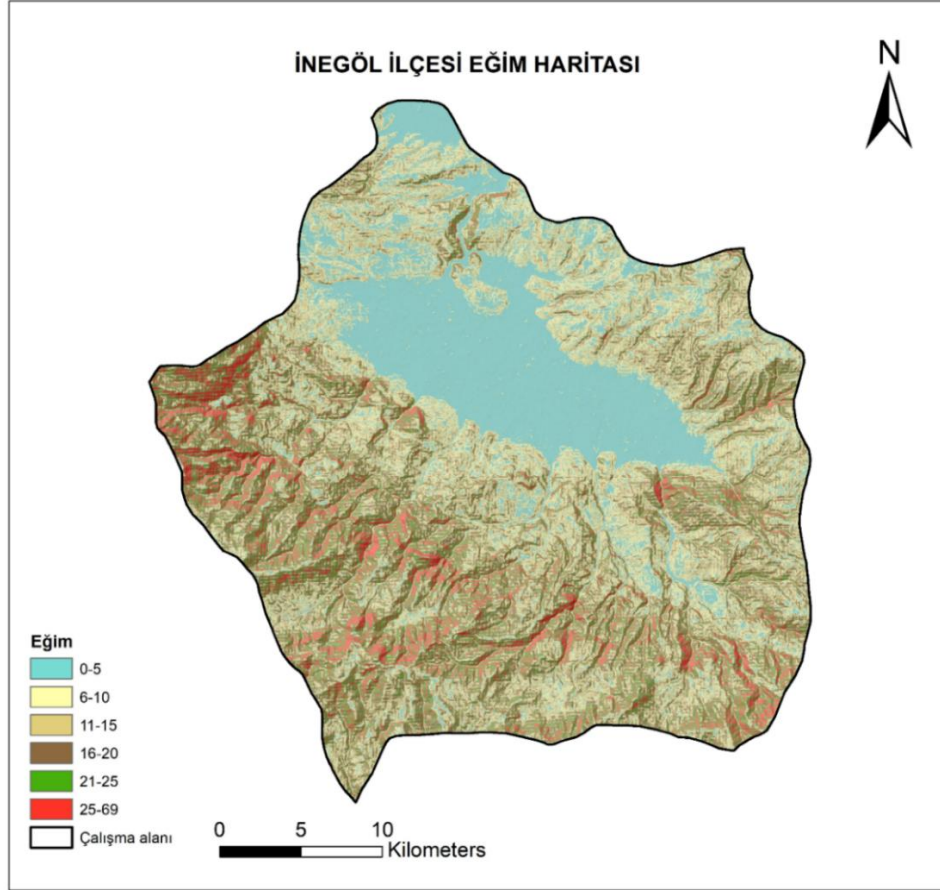
Çizelge 3.1 Çalışmada kullanılacak verilere ait bilgiler.

Veri	Format/Ölçek/Çözünürlük	Veri Kaynağı	Oluşturulan Faktör
SYM	Raster (27*27 m)	https://earthexplorer.usgs.gov	Eğim
			Bakı
			Yükselti
			Eğrisellik
			TNİ
			Akarsulara Mesafe
			Yıllık Yağış Miktarı
Fay Hattı Verisi	Vektör (1:25.000)	MTA	Fay Hattına Mesafe
Heyelan Envanteri	Vektör (1:25.000)	MTA	Heyelan Envanteri
Yol Verisi	Vektör	https://www.openstreetmap.org/	Yola Mesafe
Arazi Sınıfları Verisi	Vektör	https://land.copernicus.eu	Arazi Kullanım
Litoloji Verisi	Vektör (1:25.000)	MTA	Litoloji
Toprak Grubu Verisi	Vektör	Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü	Toprak Grubu
Landsat 8	Raster (2024)	https://earthexplorer.usgs.gov/	NDVI

3.2.1. Eğim

Eğim, topoğrafyanın diklik derecesini ifade eden temel bir morfometrik parametre olup, yüzey akışı, suyun hız ve yönü, erozyon süreçleri ve kütle hareketleri üzerinde doğrudan etkili olması nedeniyle heyelan duyarlılık analizlerinde kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir [46]. Eğim değeri arttıkça, yerçekimi etkisiyle zemin üzerindeki kayma kuvvetleri büyümekte ve zemin stabilitesi azalmaktadır; bu durum, özellikle belirli

bir eşik değerinin üzerindeki eğimlerde heyelan riskinin belirgin şekilde yükselmesine neden olmaktadır [47]. Araştırmalar, düşük eğimli alanlarda heyelan olasılığının nispeten düşük olduğunu, orta eğimli alanlarda heyelanların daha sık görüldüğünü, çok dik alanlarda ise çoğu malzemenin zaten taşınmış olması nedeniyle heyelan riskinin sınırlı kalabileceğini göstermektedir [48].



Şekil 3.3. Çalışma Alanına Ait Eğim Haritası

Çalışma alanı olan İnegöl ilçesine ait eğim haritası, ArcGIS yazılımındaki Slope aracı yardımıyla SYM kullanılarak üretilmiş ve CBS ortamında sınıflandırılmıştır (Şekil 3.3). İnegöl ilçesi için oluşturulan eğim haritası, eğim değerleri 0–5°, 6–10°, 11–15°, 16–20°, 21–25° ve 26° ve üzeri olmak üzere altı sınıfa ayrılarak analiz edilmiştir. Haritadan elde edilen verilerine göre, çalışma alanının büyük bir bölümü düşük ve orta seviyede eğimli alanlardan oluşmaktadır. Şehir merkezinin eğimi düşük olarak gözlenirken Uludağ eteklerine yaklaştıkça eğim artmaktadır.

Eğim değerlerinin artışı, zemin duyarlılığının azalmasına ve yüzey akışı ile erozyon potansiyelinin artmasına yol açarak heyelan riskini artıran önemli bir faktör olarak dikkat çekmektedir. Çalışma alanında düşük ve orta eğimli alanların yaygınlığı, yerleşim ve tarımsal kullanım açısından avantaj sağlarken, eğimin yüksek olduğu belli alanlar, heyelan duyarlılığı bakımından daha riskli bölgeler olarak dikkat çekmektedir. Eğim faktörü, bu yönüyle heyelan duyarlılık analizlerinde temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir.

Heyelana sebep olabileceği düşünülen faktörlerden olan eğim faktörünün HDH üretilirken faktör ağırlığının hesaplanabilmesi için eğim faktörüne ait uygun haritası elde edilmesi gerekmektedir. Uygunluk haritası, duyarlılık analizleri sırasında her mekânsal birimin (piksel / hücre) uygunluk düzeyini niteliksel ya da niceliksel olarak gösteren tematik bir raster katmandır [49].

Uygun haritasını elde edebilmek için eğim faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. İşlem sonucunda çalışma alanı 1 çok düşük riskli bölgeden 5 çok yüksek riskli bölgeye doğru sınıflanmıştır. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

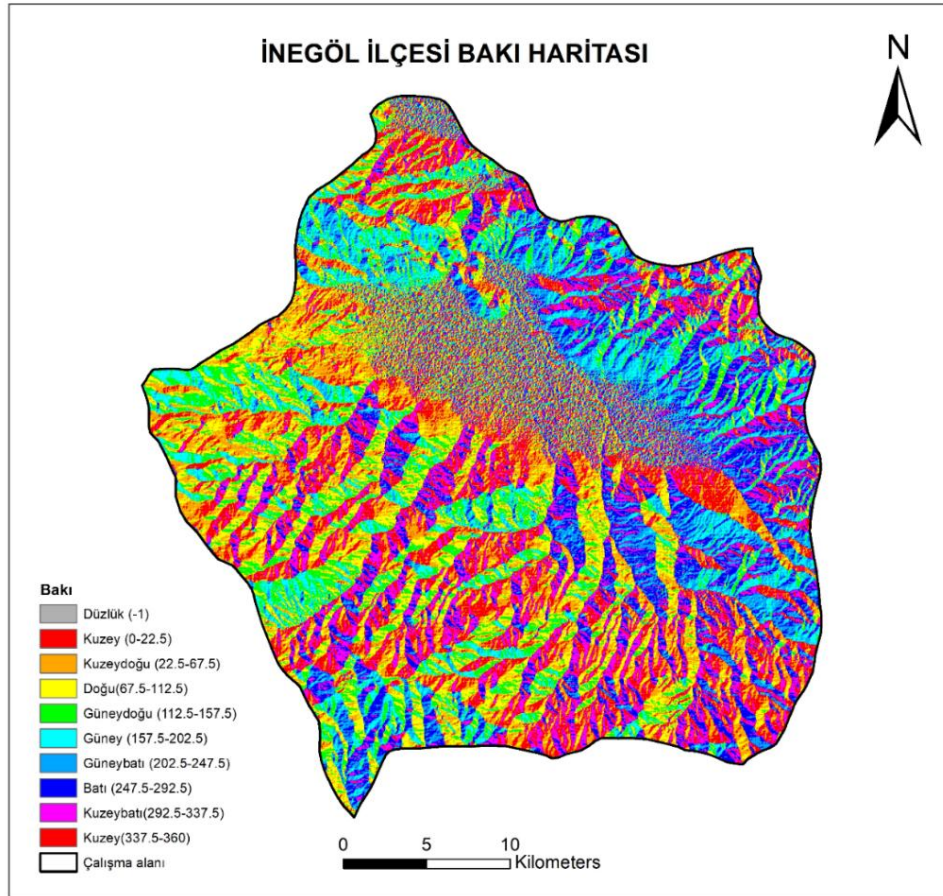
Çizelge 3.2. Eğim Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	0-10
2.Sınıf(Düşük)	11-20
3.Sınıf(Orta)	21-30
4.Sınıf(Yüksek)	31-40
5.Sınıf(Çok Yüksek)	41-69

3.2.2. Bakı

Heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan topoğrafik faktörlerden biri olan bakı, bir yamaç yüzeyinin coğrafi yönelimini belirtmektedir [50]. Güneye bakan yamaçlarda, suyun buharlaşma oranı fazlalaşır ve yağmurdan sonra bitki örtüsünde ani bir su ihtiyacı doğar. Bu nedenle bitki örtüsü seyrekler. Kuzeye bakan yamaçlar ise toprak nemliliğini yağıştan sonra da uzun bir süre muhafaza eder. Bu da yüksek nemlilik içeriğinden dolayı kütle hareketleri

için uygun şartlar sağlar [51]. Literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda, heyelanların belli başlı bakı yönlerinde daha yoğunlaştığı tespit edilmiş ve bu dağılımın, topoğrafik eğimle birlikte güneşlenme farklılıkları ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bakı faktörünün etkisi çoğu zaman diğer değişkenlerle birlikte değerlendirilmekte; özellikle eğim, yükseklik, arazi kullanımı ve jeolojik yapı gibi faktörlerle etkileşim içinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bakı parametresinin tek başına değerlendirilmesi yerine, çok faktörlü analizlerde yer alması, heyelan duyarlılığı haritalarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır [52].



Şekil 3.4. Çalışma Alanına Ait Bakı Haritası

Bu çalışmada, İnegöl ilçesine ait bakı haritası SYM kullanılarak CBS ortamında üretilmiş ve yamaç yönleri Şekil 3.4.'de gösterildiği üzere 9 sınıfa ayrılarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma, genel olarak düzlük (-1), ana yönler (kuzey, doğu, güney, batı) ve ara yönler (kuzeydoğu, güneydoğu, güneybatı, kuzeybatı) olmak üzere toplam dokuz farklı yönelimden oluşmaktadır.

Harita incelendiğinde, İnegöl ilçesi genelinde en fazla yayılım gösteren bakı yönlerinin kuzeybatı (292.5°–337.5°), güneydoğu (112.5°–157.5°) ve güney (157.5°–202.5°) olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle güney ve güneydoğuya bakan yamaçlar, daha fazla güneş ışınına maruz kaldıkları için bu alanlarda toprak neminin azaldığı, buharlaşmanın arttığı ve dolayısıyla bitki örtüsünün daha seyrek geliştiği varsayılabilir. Buna karşın, kuzey ve kuzeydoğu yönlerine sahip yamaçlar daha az güneşlenme alarak, nemli ve doymuş toprak koşullarına sahip olabilirler; bu da heyelan gelişimi açısından daha hassas alanları temsil edebilir.

Uygun haritasını elde edebilmek için bakı faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre güneşe çok maruz kalan yönler düşük risk grubunu oluştururken güneşe az maruz kalan yerler yüksek risk grubunu temsil etmektedir.

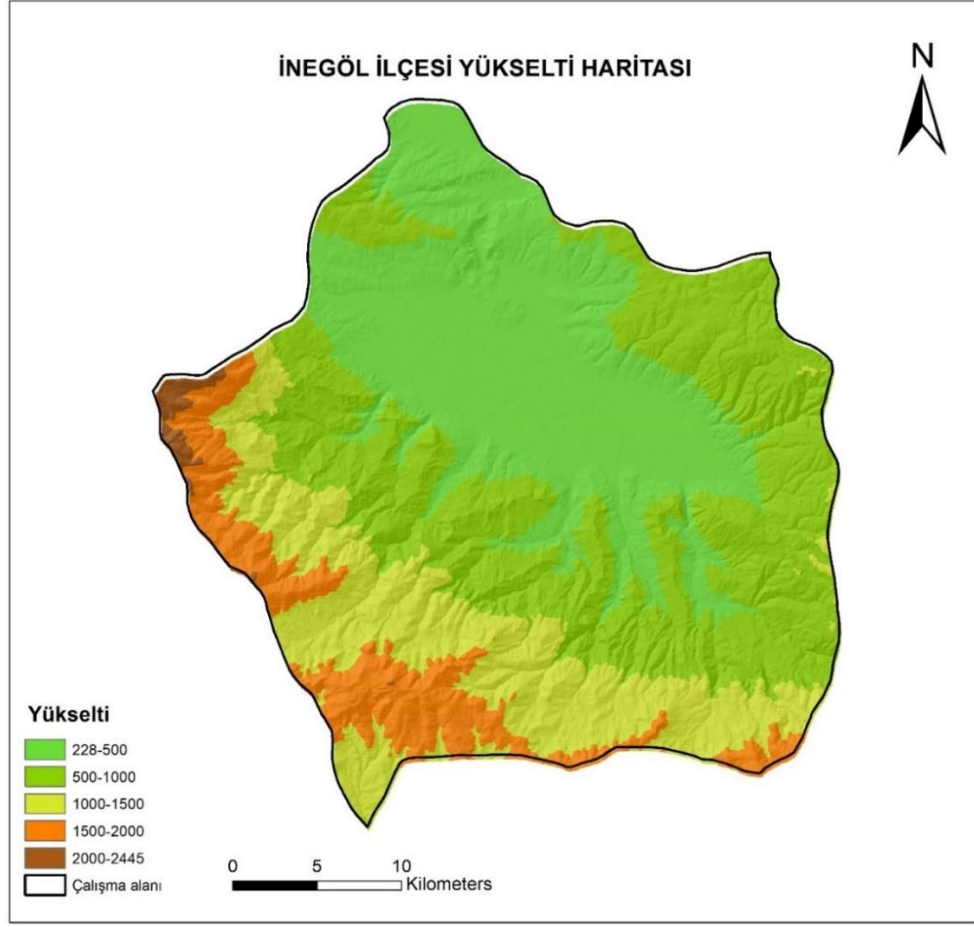
Çizelge 3.3. Bakı Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	Güney
2.Sınıf(Düşük)	Güneydoğu
3.Sınıf(Orta)	Doğu,Güneybatı
4.Sınıf(Yüksek)	Batı,Kuzeydoğu
5.Sınıf(Çok Yüksek)	Kuzey,Kuzeybatı

3.2.3.Yükselti

Yükselti, bir arazinin deniz seviyesine göre yüksekliğini ifade eden temel bir topografik parametredir ve heyelan duyarlılığı üzerinde dolaylı fakat önemli etkilere sahiptir [53]. Yükselti arttıkça, sıcaklık ve buharlaşma oranı azalırken, nem tutma kapasitesi ve yağış miktarı gibi iklimsel koşullar değişir; bu da toprak özelliklerini ve bitki örtüsünü etkileyerek heyelan oluşumuna neden olabilir [54]. Ayrıca yüksek kotlardaki arazilerde eğim değerlerinin de genellikle yüksek olması, kütle hareketlerine karşı yapısal istikrarın azalmasına sebep olabilir [55]. Araştırmalar, belirli yükselti aralıklarında heyelan olaylarının daha da fazlaştığını ve özellikle orta yükseklikteki alanların hem topoğrafik hem de hidrolojik koşullar açısından daha riskli olabildiğini ortaya koymaktadır [53]. Bu nedenle,

yükselti faktörü, diğer morfometrik değişkenlerle beraber ele alınarak heyelan duyarlılık haritalarının daha doğru ve güvenilir şekilde oluşturulmasına fayda sağlar [54].



Şekil 3.5. Çalışma Alanına Ait Yükselti Haritası

İnegöl ilçesine ait yükselti haritası, SYM kullanılarak raster formatta oluşturulmuş ve alansal yükselti dağılımı beş sınıf altında gruplandırılarak Şekil 3.5.'de gösterilmiştir. Haritada yükseklik değerleri yaklaşık 228 metreden 2445 metreye kadar değişmekte olup, bu aralık hem düşük kotlu ova alanlarını hem de yüksek dağlık kesimleri kapsamaktadır. Harita verilerine göre çalışma alanının büyük bir bölümünü 500–1000 metre aralığındaki yükselti sınıfı oluşturmaktadır. Bu alanlar daha çok ilçenin merkezi ve kuzeydoğu kesiminde yoğunlaşmakta olup, tarımsal faaliyetlerin ve yerleşimlerin de yaygın olduğu düzlüklere karşılık gelmektedir. Buna karşın, 1000–1500 metre ve üzerindeki yükselti sınıfları genellikle güney, güneybatı ve güneydoğu yönlerinde konumlanmış dağlık alanları ifade etmektedir. 1500–2000 m ve 2000 m üzeri kotlar özellikle Domaniç Dağları ve Uludağ etekleri gibi jeomorfolojik birimlere karşılık gelmektedir. Bu bölgelerde eğim değerlerinin de yüksek olması nedeniyle, topoğrafik stabilitenin azaldığı ve heyelan riskinin arttığı

düşünülmektedir. Yüksek kotlu sahalar, aynı zamanda artan yağış miktarı, düşük sıcaklık ve zayıf toprak yapısı gibi heyelanın gelişimini kolaylaştırabilecek çevresel faktörlerle de ilişkilidir.

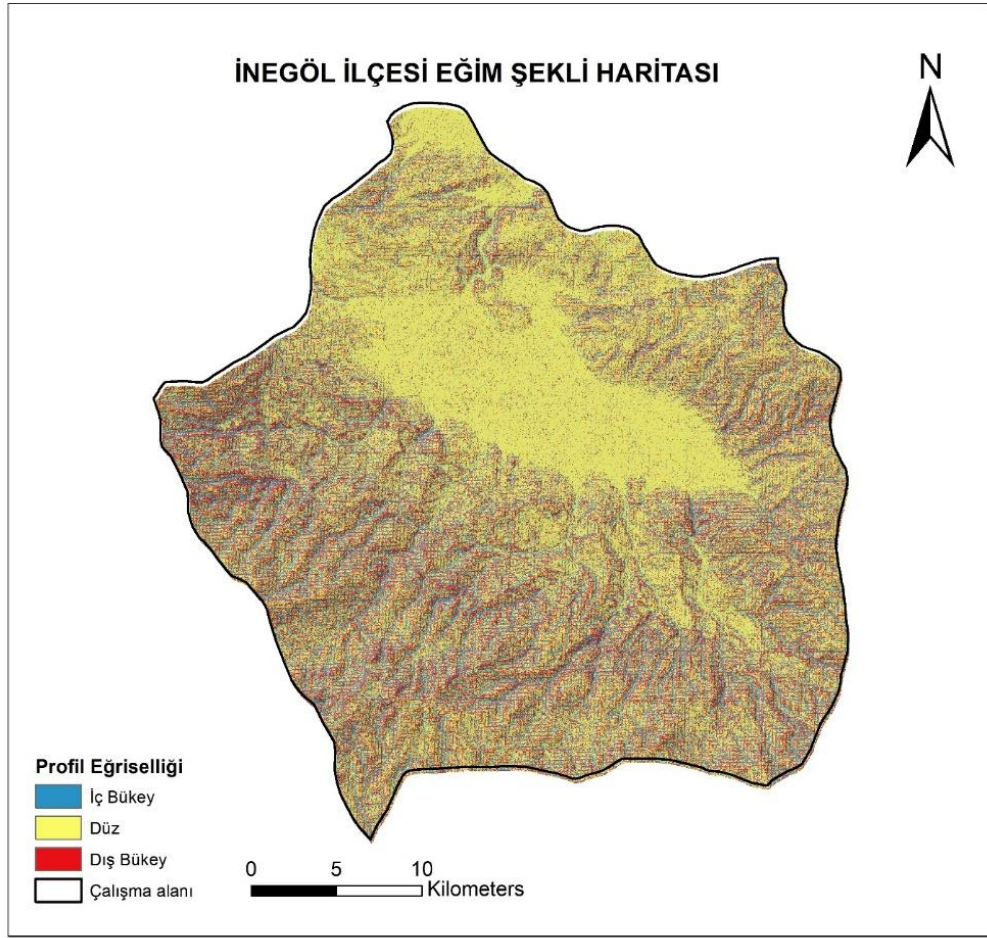
Uygun haritasını elde edebilmek için yükselti faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.4.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre yükseltinin en düşük olduğu yerler 1. sınıfta yer alırken yükseltinin en fazla olduğu yerler 5. sınıfta yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Yükselti Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	228-500
2.Sınıf(Düşük)	500-1000
3.Sınıf(Orta)	1000-1500
4.Sınıf(Yüksek)	1500-2000
5.Sınıf(Çok Yüksek)	2000-2445

3.2.4. Eğrisellik

Eğrisellik faktörü, arazinin yüzey geometrisinin konveks, konkav veya düz olma durumunu ifade ederek, yüzey akışı, su birikimi ve zemin stabilitesi gibi süreçleri etkileyen önemli bir morfometrik parametre olarak tanımlanmaktadır [56]. Arazi eğriselliği, suyun eğim boyunca hareketini ve akış yönünü yönlendiren bir unsur olduğundan, heyelanların oluşumunda dolaylı ancak kritik bir rol oynamaktadır [57]. Yapılan çalışmalarda, konkav yüzeylerin suyun birikmesine ve gözenek su basıncının artmasına neden olarak kayma yüzeylerinin doygunluk koşullarına ulaşmasını kolaylaştırdığı; buna karşılık konveks alanların suyu uzaklaştırarak stabiliteyi artırdığı belirtilmektedir [58]. Bu nedenle eğrisellik faktörü, özellikle yüksek çözünürlüklü dijital yükseklik modellerinden türetilen morfometrik analizlerde, HDH'nın mekânsal doğruluğunu artıran önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir [59]. Eğim şekli (profil eğriselliği) haritası, SYM verisi kullanılarak oluşturulmuştur. ArcGIS ortamında Surface > Curvature aracı kullanılarak eğim yönündeki eğrisellik hesaplanmış; ardından bu raster veri Reclassify işlemiyle iç bükey, düz ve dış bükey sınıflarına ayrılarak tematik hale getirilmiştir.(Şekil 3.6.)



Şekil 3.6. Çalışma Alanına Ait Eğim Şekli Haritası

İnegöl ilçesine ait eğim şekli haritası incelendiğinde, alanın büyük bir kısmının düz yüzeylerden oluştuğu, bu alanların genellikle orta kesimlerde yoğunlaştığı görülmektedir. Haritada sınırlı oranda yer kaplayan iç bükey (mavi) alanlar, yüzeysel akışın biriktiği, suyun toprakta tutulma eğiliminin yüksek olduğu çöküntüleri göstermektedir ve bu alanlar heyelan açısından potansiyel risk barındırabilir. Dış bükey (kırmızı) alanlar ise yüksek eğimli, dışa doğru kıvrımlı sırt bölgelerine karşılık gelmekte ve yüzey suyu akışının hızlandığı yerler olarak dikkat çekmektedir. Eğimin eğrisel biçimi, suyun birikimi ya da uzaklaşması üzerinde doğrudan etkili olduğundan, bu parametre heyelan duyarlılığı açısından önemli bir göstergedir.

Uygun haritasını elde edebilmek için eğrisellik faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.5.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre eksili değerler düşük heyelan riskini gösterirken artılı değerler artıktıkça heyelan riski artmaktadır.

Çizelge 3.5. Eğrisellik Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	$-19 \leq \text{eğrisellik} \leq -1,6$
2.Sınıf(Düşük)	$-1,6 < \text{eğrisellik} \leq -0,5$
3.Sınıf(Orta)	$-0,5 < \text{eğrisellik} \leq 0,25$
4.Sınıf(Yüksek)	$0,25 < \text{eğrisellik} \leq 1,2$
5.Sınıf(Çok Yüksek)	$1,2 < \text{eğrisellik} \leq 20,9$

3.2.5. Topografik Nemlilik İndeksi

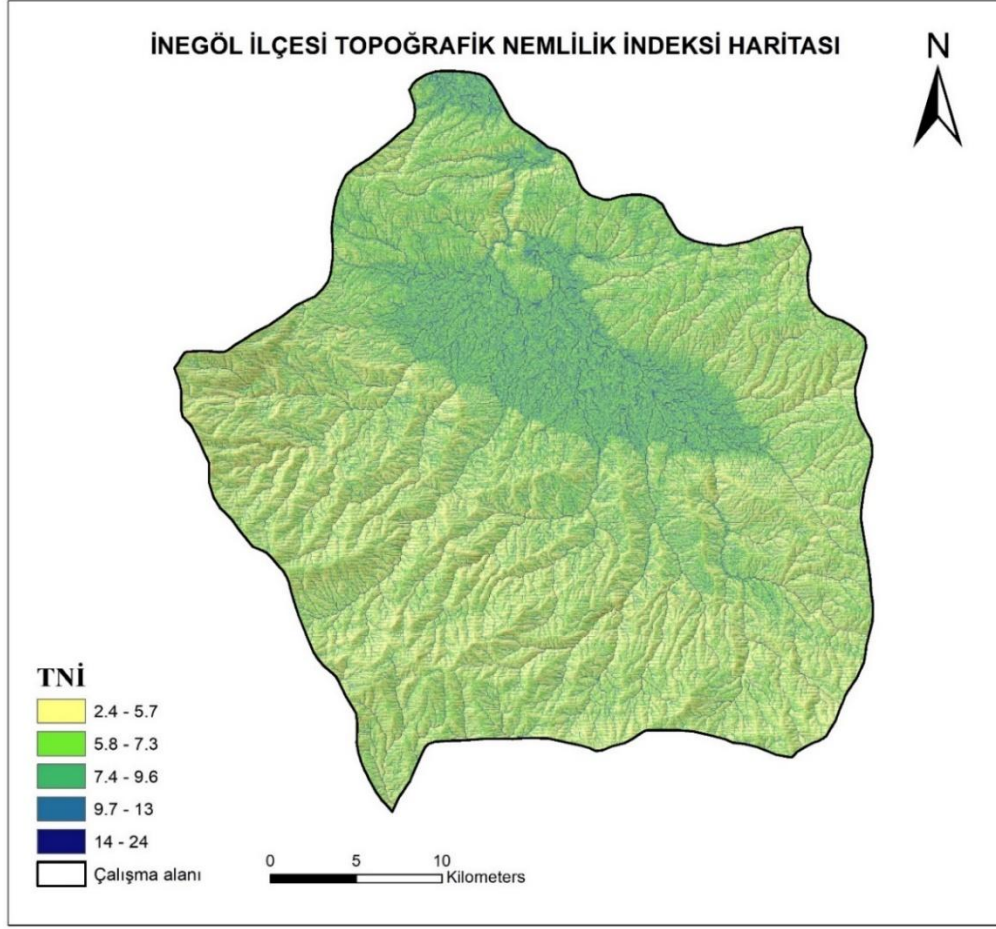
TNİ, bir arazi parçasının su biriktirme potansiyelini ve yerel akış yoğunluğunu belirleyen, yüzey drenaj süreçlerini yansıtan önemli bir hidro-morfometrik parametre olarak tanımlanmaktadır [60]. Literatürde yapılan çalışmalar, yüksek TNİ değerlerinin gözenek su basıncını artırarak heyelan oluşumuna uygun ortamlar yarattığını, buna karşılık düşük TNİ değerlerinin drenaj koşullarının hakim olduğu, sabit alanlara işaret ettiğini ortaya koymaktadır [61].

TNİ haritası, SYM verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Öncelikle akış yönü ve akış birikimi rasterları elde edilmiş, ardından TNİ değeri formülü eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu işlem sonucunda, alandaki her hücre için yüzey akışının birikme potansiyelini ve eğime bağlı olarak suyun tutulma kapasitesini ifade eden nemlilik değerleri elde edilmiştir [22].

$$TNİ = \ln \left(\frac{a_2}{\tan \beta} \right) \quad (3.1)$$

a_2 = akış toplama alanı

$\tan \beta$ = lokal eğim



Şekil 3.7. Çalışma Alanına Ait Topoğrafik Nemlilik İndeksi Haritası

Harita incelendiğinde, İnegöl ilçesinin orta ve kuzey kesimlerinde yer alan vadi tabanları ve akarsu çevrelerinde TNİ değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. (Şekil 3.7) Bu bölgelerde suyun yüzeyde birikme eğilimi fazla olduğundan, toprak nemliliği de artmaktadır. Özellikle mavi tonlarla gösterilen 13 üzeri TNİ değerleri, zemin doygunluğunun yüksek olabileceği ve bu nedenle heyelan oluşumuna daha yatkın alanları işaret etmektedir.

Daha düşük TNİ değerleri ise genellikle eğimin fazla olduğu, suyun hızla akıp uzaklaştığı sırt ve yamaç bölgelerinde yoğunlaşmakta, bu alanlar nispeten daha kuru ve stabil zemin özellikleri göstermektedir. TNİ, yüzey suyu birikiminin analizinde kritik rol oynadığı için heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde temel parametrelerden biri olarak dikkate alınmıştır.

Uygun haritasını elde edebilmek için TNİ faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.6.'da gösterilmiştir. Bu

sınıflandırmaya göre toprak nemlilik değerleri düşük olan yerler düşük heyelan riskini ifade ederken yüksek nemli bölgeler yüksek heyelan riskini ifade etmektedir.

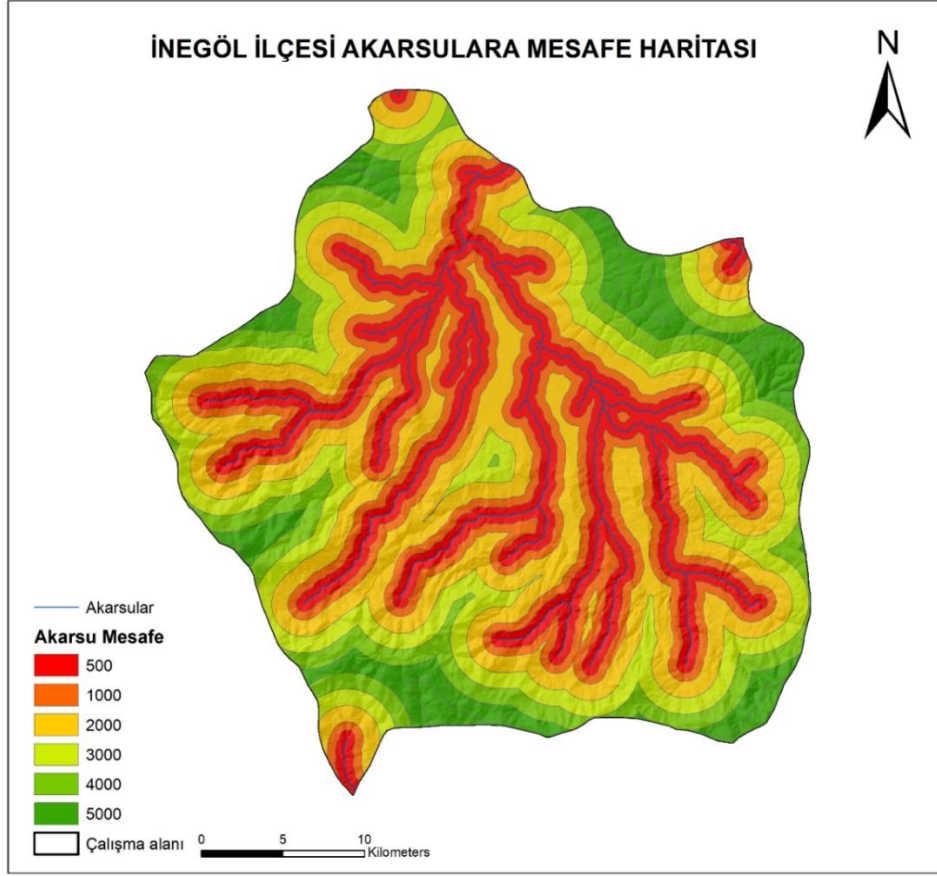
Çizelge 3.6. TNİ Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	2,4-5,7
2.Sınıf(Düşük)	5,8-7,3
3.Sınıf(Orta)	7,4-9,6
4.Sınıf(Yüksek)	9,7-13
5.Sınıf(Çok Yüksek)	14-24

3.2.6.Akarsulara Uzaklık

Akarsular, erozyon ve taşıma süreçleri yoluyla yamaç dengesini etkileyerek heyelan oluşumunu tetikleyen önemli morfolojik unsurlar arasında yer almaktadır [46]. Özellikle akarsulara yakın alanlarda, suyun mekanik etkisi ve aşındırıcı gücü zemin dayanımını zayıflatmakta ve heyelan riskini artırmaktadır [62]. Çalışmalar, akarsu yataklarına yakın mesafelerde heyelan olasılığının, daha uzak bölgelere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle akarsulara olan mesafe, heyelan duyarlılık analizlerinde temel faktörlerden biri olarak dikkate alınmaktadır [59].

Akarsulara mesafe faktörünün oluşturulabilmesi için öncelikle hidrografik yapının belirlenmesine yönelik temel hidrolojik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, SYM kullanılarak yüzey akışını yönlendiren depresyonlar Fill (doldurma) aracı ile giderilmiş ve topografik yüzey düzeltilmiştir. Ardından, Flow Direction işlemi uygulanarak her hücrenin en dik eğim yönüne göre akış yönü belirlenmiştir. Bu yön bilgileri temel alınarak Flow Accumulation işlemiyle her hücrenin havza içinde ne kadar akış topladığı hesaplanmış ve potansiyel akarsu yolları tespit edilmiştir. Elde edilen bu akım toplama verileri üzerinde Stream Order analizi uygulanarak akarsuların hiyerarşik yapısı belirlenmiş, böylece sürekli akım yolları tanımlanmıştır. Son olarak, tanımlanan akarsu yolları Stream to Feature aracı kullanılarak vektör formata dönüştürülmüş ve analizlerde kullanılmak üzere shapefile dosyası haline getirilmiştir. Bu işlem adımları sonucunda, çalışma alanındaki akarsuların konumsal dağılımı hassas biçimde belirlenmiş ve mesafe analizlerine uygun hale getirilerek Şekil 3.8’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Çalışma Alanına Ait Akarsulara Mesafe Haritası

İnegöl ilçesi için hazırlanan akarsulara mesafe haritası, akarsu hatlarının çevresinde oluşturulan tampon zonlarla altı sınıfa ayrılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, çalışma alanının %28,3'ü 0–500 metre, %24,7'si ise 500–1000 metre mesafede yer almakta olup, toplamda alanın %53'ü akarsulara 1000 metreden daha yakın konumdadır. Bu durum, yüzeysel akış ve erozyon etkisinin yoğun olduğu bu bölgelerde heyelan riskinin arttığını göstermektedir. Mesafe arttıkça (%6,9'luk 4000–5000 m zonu gibi), akarsuların zemin üzerindeki etkisi azalmakta, bu da heyelan duyarlılığının düştüğü daha stabil alanlara işaret etmektedir.

Uygun haritasını elde edebilmek için akarsulara mesafe faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre akarsuya yakın mesafede olan bölgeler yüksek riskli olurken uzak bölgeler düşük heyelan riski göstermektedir.

Çizelge 3.7. Akarsulara Mesafe Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	3000-5000
2.Sınıf(Düşük)	2000-3000
3.Sınıf(Orta)	1000-2000
4.Sınıf(Yüksek)	500-1000
5.Sınıf(Çok Yüksek)	0-500

3.2.7.Yıllık Yağış Miktarı

Yıllık yağış miktarı, heyelanların oluşumunda tetikleyici bir faktör olarak önemli bir role sahiptir ve bu nedenle heyelan duyarlılık analizlerinde temel parametrelerden biri olarak değerlendirilir [46]. Uzun süreli ve şiddetli yağışlar, zemin doygunluğunu artırarak gözenek su basıncını yükseltmekte ve bu durum eğimli arazilerde zemin stabilitesinin azalmasına yol açmaktadır [63]. Literatürde yapılan çalışmalar, yüksek yağış alan bölgelerde heyelan olaylarının daha yaygın görüldüğünü ve yağış miktarındaki ani artışların özellikle yüzeysel kaymalar için kritik bir eşik oluşturduğunu göstermektedir [64]. Ayrıca yağışın mevsimsel dağılımı ve yoğunluk karakteristiği de heyelanların zamanlamasını ve mekânsal dağılımını etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır [65]. Bu nedenle, yıllık yağış miktarı verileri heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında, özellikle hidrolojik ve iklimsel süreçlerle ilişkili risk bölgelerinin belirlenmesinde vazgeçilmez bir değişken olarak kullanılmaktadır [66]. Yağış verilerinin mekânsal analizlerde doğru ve güncel kaynaklardan elde edilmesi, duyarlılık haritalarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir [67].

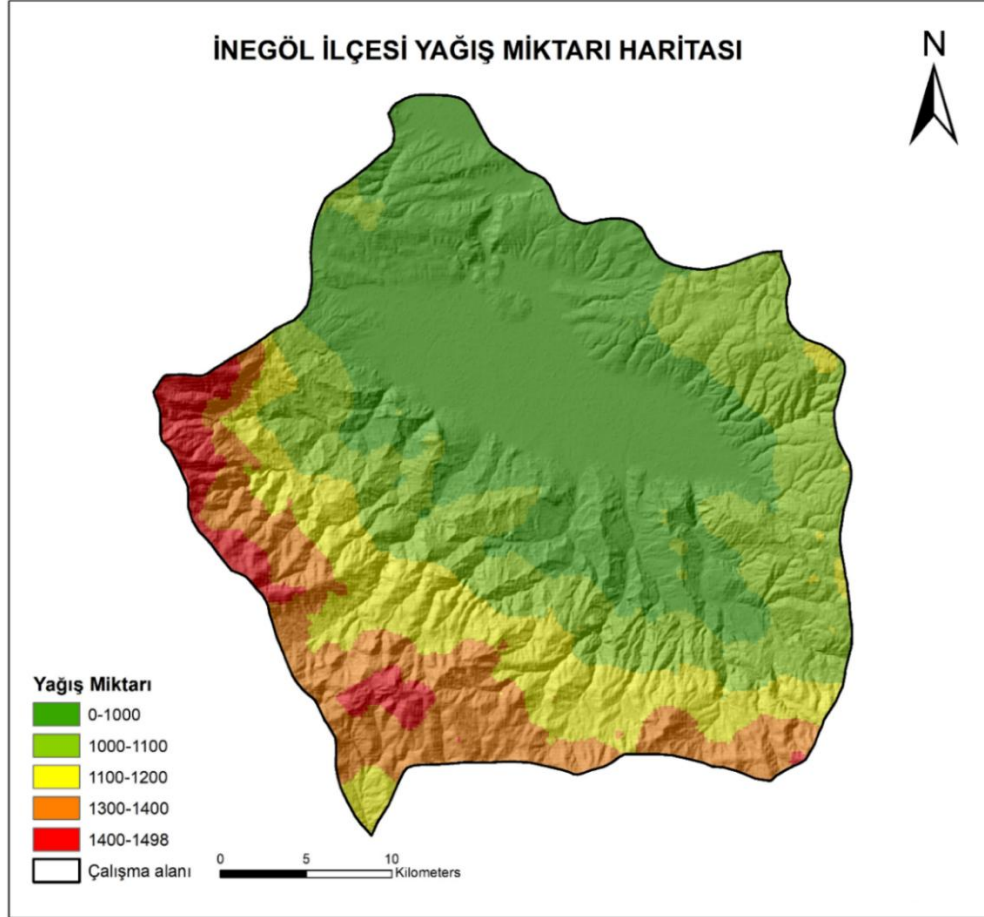
Yağış faktörüne ilişkin raster haritanın oluşturulmasında, veriler <https://en.climate-data.org/> web platformu üzerinden temin edilmiştir. İnegöl ilçesi için 291 m rakımda yıllık ortalama 922 mm yağış ve 13,3°C sıcaklık bilgileri esas alınmıştır. Çalışma kapsamında yıllık ortalama yağış değerlerinin tahmini amacıyla, yükseklikle yağış arasındaki ilişkiyi ifade eden empirik bir model kullanılmıştır. Bu amaçla, topografik verilerden elde edilen SYM verileri kullanılarak, Schreiber formülüne dayanan bir hesaplama gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle göre, yükseltideki her 100 metrelik artış, yaklaşık 54 mm’lik bir yağış artışına karşılık gelmektedir. Schreiber formülü eşitlik 3.2’de gösterilmiştir.

$$Ph = P0 + (54h) \quad (3.2)$$

Ph : Yükseltisi bilinen yağışı bulunacak bir noktanın yağışı (mm),

h : Ph ile $P0$ arasındaki yükselti farkını (hektometre) ifade etmektedir.

$P0$: Yağış değeri ve yükseltisi bilinen karşılaştırma istasyonun yağış tutarı (mm)'dir [68].



Şekil 3.9. Çalışma Alanına Ait Yağış Miktarı Haritası

İnegöl ilçesine ait yağış miktarı haritası incelendiğinde, çalışma alanı genelinde yağışın bölgesel farklılıklar gösterdiği dikkat çekmektedir (Şekil 3.9). Haritada, özellikle batı ve güneybatı kesimlerde 1400 mm'yi aşan yüksek yağış değerlerine sahip alanlar yer almakta olup, bu bölgelerde topografyanın da etkisiyle yüzey suyu birikimi ve toprak doygunluğu artmaktadır. Bu durum, heyelan oluşumu açısından önemli bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir.

İlçenin doğu ve kuzeydoğu bölümleri ise genellikle 1000 mm'nin altında kalan düşük yağış zonlarına karşılık gelmektedir. Bu alanlarda suya bağlı zemin doygunluğu daha sınırlı düzeydedir, bu nedenle heyelan potansiyeli yağışa bağlı olarak daha düşüktür. 1000–1200

mm aralığında kalan orta kuşak ise geçiş zonu niteliğinde olup, topoğrafik yapı ve litoloji gibi diğer faktörlerle birlikte değerlendirildiğinde farklı duyarlılık düzeyleri gösterebilmektedir.

Yağışın şiddeti ve süresi, zemin su içeriği üzerinde doğrudan etkili olduğu için bu parametre, heyelan analizlerinde dikkate alınması gereken temel çevresel faktörlerden biridir. Özellikle yüksek eğimli ve geçirgenliği düşük zeminlerde yağışa bağlı olarak zemin stabilitesinin bozulması, yüzeysel hareketlerin oluşmasına zemin hazırlayabilmektedir.

Uygun haritasını elde edebilmek için yağış faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.8’de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre yağış miktarının fazla olduğu bölgeler yüksek heyelan riskli bölgeleri oluştururken yağış miktarı az olan bölgeler düşük heyelan riskli sınıfları oluşturmaktadır.

Çizelge 3.8. Yağış Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

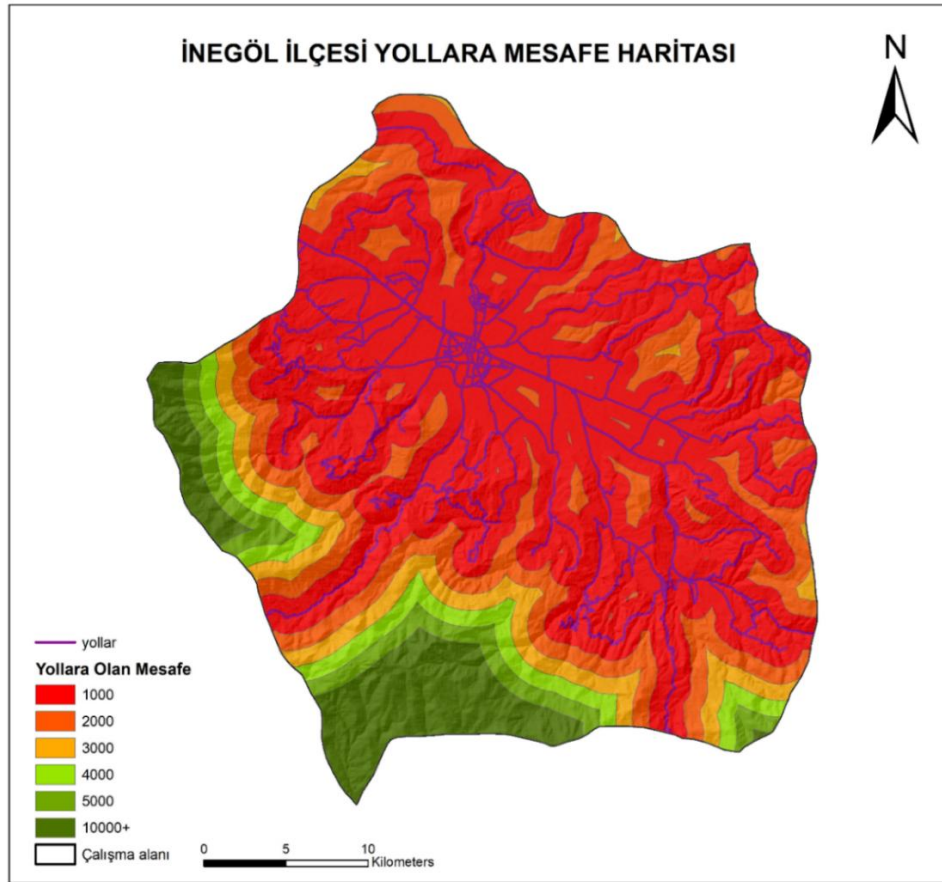
Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	0-1000
2.Sınıf(Düşük)	1000-1100
3.Sınıf(Orta)	1100-1200
4.Sınıf(Yüksek)	1200-1400
5.Sınıf(Çok Yüksek)	1400-1498

3.2.8. Kara Yollarına Uzaklık

Karayollarına olan mesafe, heyelan duyarlılığı analizlerinde dikkate alınan önemli antropojenik faktörlerden biridir [69]. Özellikle yamaçlarda açılan yollar, drenaj sistemlerinin değiştirilmesine, yüzey suyu akış yollarının yönlendirilmesine ve suyun toprak içerisine sızmasına neden olarak heyelan gelişimini tetikleyebilir [69]. Literatürde yapılan çalışmalar, karayollarına yakın alanlarda heyelan olasılığının arttığını ve riskin mesafeye bağlı olarak azaldığını göstermektedir [59]. Karayollarına yakın bölgelerde yapılan yol çalışmaları, özellikle kazı, dolgu ve şev kesme işlemleri gibi müdahaleler, doğal topoğrafik dengeyi bozarak zemin stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu tür yapay müdahaleler, eğim yapısını değiştirerek heyelan oluşumunu kolaylaştıran zayıf bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Yol ağının genişlemesi ve mühendislik faaliyetleri, çoğu zaman doğal

drenaj sistemini de değiştirerek suyun toprakta birikmesine ve kayma yüzeylerinin aktif hale gelmesine zemin hazırlar [66,59].

Bu çalışmada, karayolu ağını temsil eden vektör veri, Open Street Map (OSM) (<https://www.openstreetmap.org/>) platformundan ücretsiz olarak temin edilmiştir. İndirilen bu vektör veriler, CBS ortamında işlenerek çalışma alanına uygun izdüşümü ve koordinat sistemine dönüştürülmüş; bu doğrultuda, çalışma alanını kapsayan yollara mesafe haritası üretilmiştir.



şekil 3.10. Çalışma Alanına Ait Yollara Mesafe Haritası

İnegöl ilçesi için oluşturulan karayollarına mesafe haritası, karayollarının çevresinde 1000 metrelik tampon zonlar üretilerek hazırlanmış ve alan, altı mesafe sınıfı halinde sınıflandırılmıştır ve şekil 3.10'da gösterilmiştir. Analiz sonuçları, çalışma alanının büyük bir kısmının karayollarına oldukça yakın konumlandığını ortaya koymaktadır. Gerçek alan verilerine göre, çalışma alanının %60,9'u karayollarına 0–1000 metre mesafede yer almaktadır. Bu durum, özellikle ile merkezi ve çevresinde karayollarının yoğunluğuna ve

topoğrafik konumuna bağılı olarak, insan kaynaklı müdahalelerin ve dolayısıyla heyelan duyarlılığının yüksek olduğu alanların geniş bir alan kapladığını göstermektedir.

Karayollarına 1000–2000 metre mesafede bulunan alanlar, toplam alanın %16,1’ini oluşturmaktadır. Daha uzak mesafelerde, 2000–3000 metre (%6,2) ve 3000–4000 metre (%4,7) oranlarında daha sınırlı alanlar yer almakta olup, bu oranlar yolların etkisinin mesafeyle birlikte azaldığını göstermektedir. Çalışma alanında karayollarına 4000–5000 metre uzaklıktaki alanlar ise toplam alanın %12,1’lik kısmını oluşturmaktadır.

Uygun haritasını elde edebilmek için yağış faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.9.’da gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre yollara yakın olan bölgeler yüksek riskli bölge iken yoldan uzaklaştıkça heyelan riski azalmaktadır.

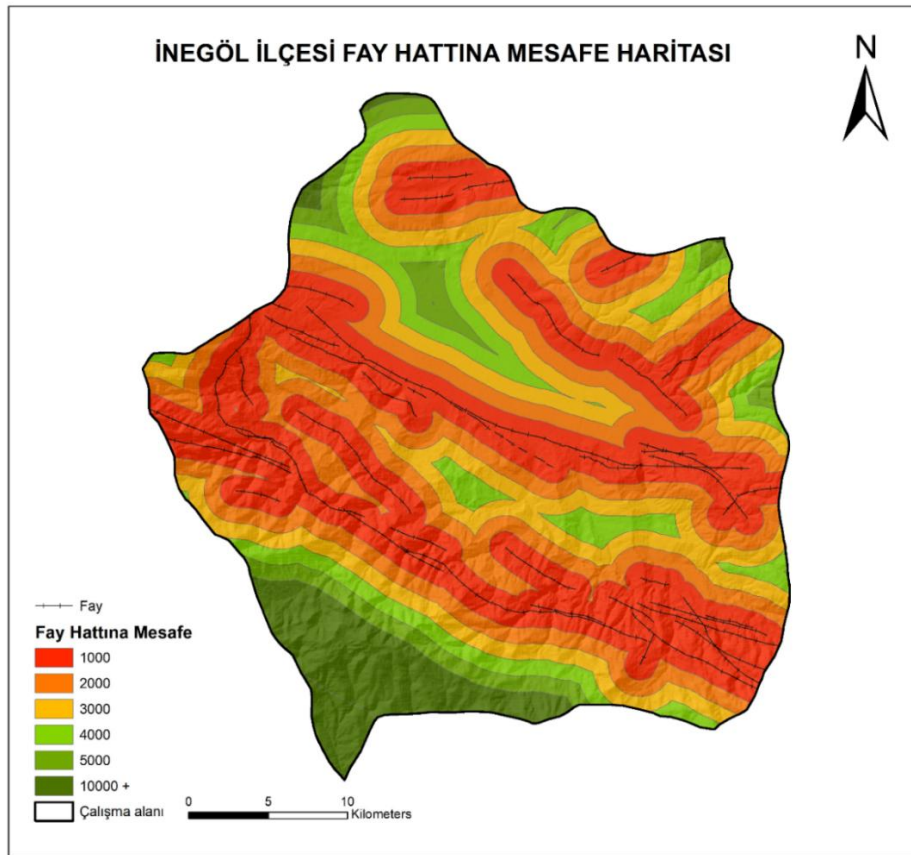
Çizelge 3.9. Yollara Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	4000-5000+
2.Sınıf(Düşük)	3000-4000
3.Sınıf(Orta)	2000-3000
4.Sınıf(Yüksek)	1000-2000
5.Sınıf(Çok Yüksek)	0-1000

3.2.9. Fay Hattına Mesafe

Fay hatları, yer kabuğundaki kırık zonlar olarak, kayaçların zayıflamasına ve yüzeyde yapısal istikrarsızlıklara neden oldukları için heyelan oluşumunu etkileyen önemli tektonik unsurlar arasındadır [70]. Bu kırık zonlar boyunca oluşan fiziksel zayıflıklar, hem yüzey hem de yeraltı suyu hareketliliğini artırarak heyelan meydana gelmesini kolaylaştırabilir [70]. Faylara yakın bölgelerde sismik titreşimlerin zemin bütünlüğünü bozması da, heyelan oluşum riskini doğrudan artıran bir diğer nedendir [71]. Bu nedenle, heyelan duyarlılığı modellemelerinde, fay hatlarına olan mesafe parametresi çok sık kullanılmakta ve bu mesafeye bağılı olarak risk seviyeleri sınıflandırılmaktadır [72].

Literatürde yapılan çalışmalar, fay hatlarına yakın bölgelerde heyelan yoğunluğunun arttığını göstermektedir. Örneğin, fay hatlarına 0–1000 metre mesafede yer alan alanlarda, heyelan gözlemlerinin daha sık gerçekleştiği gözlenmiştir [70]. Benzer şekilde, bazı çalışmalarda fay zonlarına 180–240 metre mesafede maksimum heyelan yoğunluğunun olduğu rapor edilmiştir [71]. Fay hatlarına olan mesafe genellikle buffer (tampon) zonlar şeklinde belirlenmekte; bu zonlar 0–500 m, 500–1000 m, 1000–2000 m gibi sınıflara ayrılarak analiz edilmektedir. Mesafe arttıkça heyelan riski azalma eğilimi gösterdiğinden, bu faktör, alanın jeodinamik karakteri ile birlikte değerlendirilerek modelleme sürecine dahil edilmektedir [72].



Şekil 3.11. Çalışma Alanına Ait Fay Hattına Mesafe Haritası

İnegöl ilçesi fay hattına mesafe haritası MTA Genel Müdürlüğü tarafından üretilmiş olan 1/25.000 ölçekli dirifay paftaları temel alınarak oluşturulmuştur. Fay hatlarına mesafe değişimleri, raster analiz yöntemi ile oluşturulmuş ve toplamda yedi mesafe sınıfı

oluşturularak mekânsal dağılımları Şekil 3.11’de gösterildiği gibi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının büyük bölümü 0–2000 metre mesafedeki zonlarda yoğunlaşmaktadır. Bu iki mesafe dilimi toplamda çalışma alanının yaklaşık %55.7’lik kısmını oluşturmaktadır; bu durum, ilçedeki geniş bir alanın fay hatlarına oldukça yakın konumlandığını göstermektedir.

Özellikle güneybatı, güneydoğu ve kuzeydoğu kesimlerde faylara 0–1000 metre mesafede kalan alanlar dikkat çekici düzeydedir ve bu bölgeler, yapısal zayıflık zonları ile çakıştığı için heyelan açısından daha yüksek duyarlılığa sahiptir. Buna karşılık, çalışma alanının yalnızca yaklaşık %7.3’lük kısmı fay hatlarından 10 kilometreden fazla uzaklıktadır. Bu mesafe sınıfı, güneyde yer alan yüksek eğimli alanlarda yer almaktadır.

Bu bulgular, fay hatlarına yakınlık ile heyelan potansiyeli arasındaki doğrudan ilişkiyi desteklemektedir. Fay hatlarının oluşturduğu kırık zonları, zemin direncini düşürerek heyelan gelişimini kolaylaştırmakta; özellikle sismik mikrohareketlilik, topoğrafik stabiliteyi zayıflatmaktadır. Dolayısıyla, fay hatlarına olan mesafe, yalnızca jeodinamik aktiviteyi değil, aynı zamanda heyelan duyarlılığını da doğrudan etkileyen bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Uygun haritasını elde edebilmek için fay hattına mesafe faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.10.’da gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre fay hattına yakın olan bölgeler yüksek riskli bölge iken fay hattından uzaklaştıkça heyelan riski azalmaktadır.

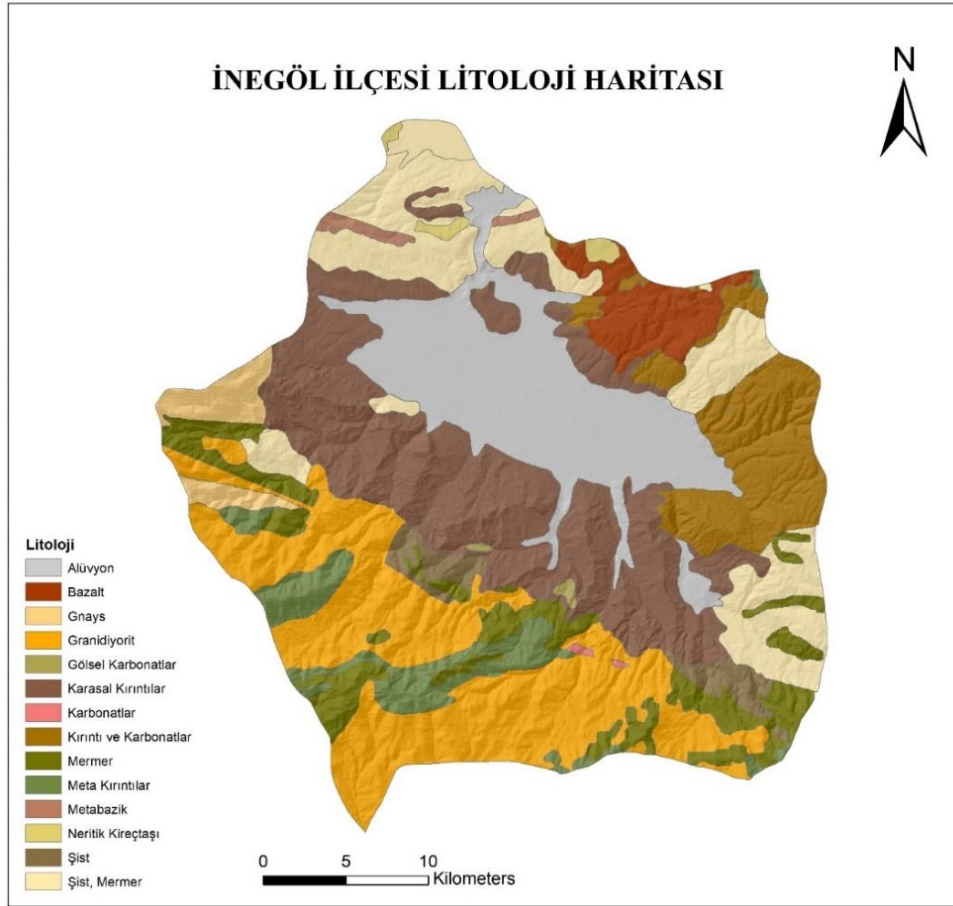
Çizelge 3.10. Fay Hattına Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	4000-5000+
2.Sınıf(Düşük)	3000-4000
3.Sınıf(Orta)	2000-3000
4.Sınıf(Yüksek)	1000-2000
5.Sınıf(Çok Yüksek)	0-1000

3.2.10. Litolojik Yapı

Litoloji, bir bölgedeki kayaçların türü, mineral içeriği ve yapısal özelliklerini ifade etmekte olup, zemin dayanımı ve erozyon direnci açısından heyelan oluşumunda belirleyici bir faktördür [46]. Farklı litolojik birimler, farklı mühendislik jeolojisi özelliklerine sahip olduklarından, kayaların ayrışma derecesi, porozite ve çatlak yoğunluğu gibi özellikleri heyelan duyarlılığını doğrudan etkilemektedir [73]. Özellikle killi şistler, marnlar ve tuf gibi düşük dayanımlı litolojiler, suya doygunluk durumunda zemin kaymalarına daha yatkın hale gelmektedir [47]. Literatürde yapılan çalışmalar, heyelan olaylarının büyük çoğunluğunun zayıf litolojik birimlerde meydana geldiğini ve sağlam, kompakt kayaçlara sahip alanlarda heyelan olasılığının görece düşük olduğunu göstermektedir [74]. Bu nedenle, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde litoloji faktörünün dikkate alınması, mekânsal analizlerin doğruluğu ve afet risk yönetimi açısından kritik öneme sahiptir [66]. Ayrıca litolojik birimlerin hidrolojik geçirgenlik özellikleri, suyun yeraltında hareketini ve dolayısıyla zemin doygunluğunu etkileyerek heyelan tetikleyici mekanizmalarda dolaylı bir rol oynamaktadır [59].

Çalışma alanına ait Jeoloji haritasının oluşturulmasında, MTA tarafından yayımlanan 1/25.000 ölçekli jeoloji paftaları kullanılmıştır. İlgili paftalar sayısal ortama aktarılmış, ardından ArcGIS yazılımı aracılığıyla sayısallaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süreç sonucunda, çalışma alanına ait litolojik birimler detaylı biçimde haritalanmış ve analizlerde kullanılmak üzere tematik harita haline getirilmiştir.



Şekil 3.12. Çalışma Alanına Ait Litoloji Haritası

Çalışma alanının jeolojik yapısını ortaya koymak amacıyla hazırlanan litoloji haritası, İnegöl ilçesinde farklı kayaç türlerinin alansal dağılımını göstermektedir (Şekil 3.12). Litolojik birimlerin fiziksel özellikleri, heyelan oluşumunda belirleyici bir rol oynamaktadır. Harita incelendiğinde, şehir merkezi yani düzlük alanda daha çok alüvyon, kuzey ve doğu kesimlerde şist-mermer ve orta kesimlerde karasal kırıntılı birimlerin yer aldığı görülmektedir. Bu tür zayıf yapı ve su geçirgenliği yüksek birimler, özellikle yağışlı dönemlerde doygunluğa ulaşarak zeminde stabilite kaybına neden olabilmektedir.

Buna karşılık, güney ve güneybatı bölgelerde yayılım gösteren karbonat kayaçları, gnays, granidiorit, mermer gibi birimler daha sert ve dayanıklı litolojiler olarak tanımlanmaktadır. Bu birimlerin yer aldığı alanlarda heyelan riski nispeten daha düşüktür. Ancak, bu sert kayaçlar da süreksizlik düzlemleri boyunca ayrıştığında veya tektonik kırık zonlarına yakın konumlandığında zayıf davranış gösterebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, litolojik özellikler zemin dayanımı, su geçirgenliği ve ayrışma eğilimi gibi çeşitli fiziksel faktörler üzerinden heyelan oluşumunu etkilediği için, bu parametre duyarlılık analizinde temel bileşenlerden biri olarak dikkate alınmıştır.

Uygun haritasını elde edebilmek litolojik yapı faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.11.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre mermer, şist, nemrik kireçtaşı en düşük riskli litolojik yapılar iken, alüvyon, karasal kırıntılar ve karbonatlar heyelan riski en yüksek litolojik yapılardır.

Çizelge 3.11. Fay Hattına Mesafe Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

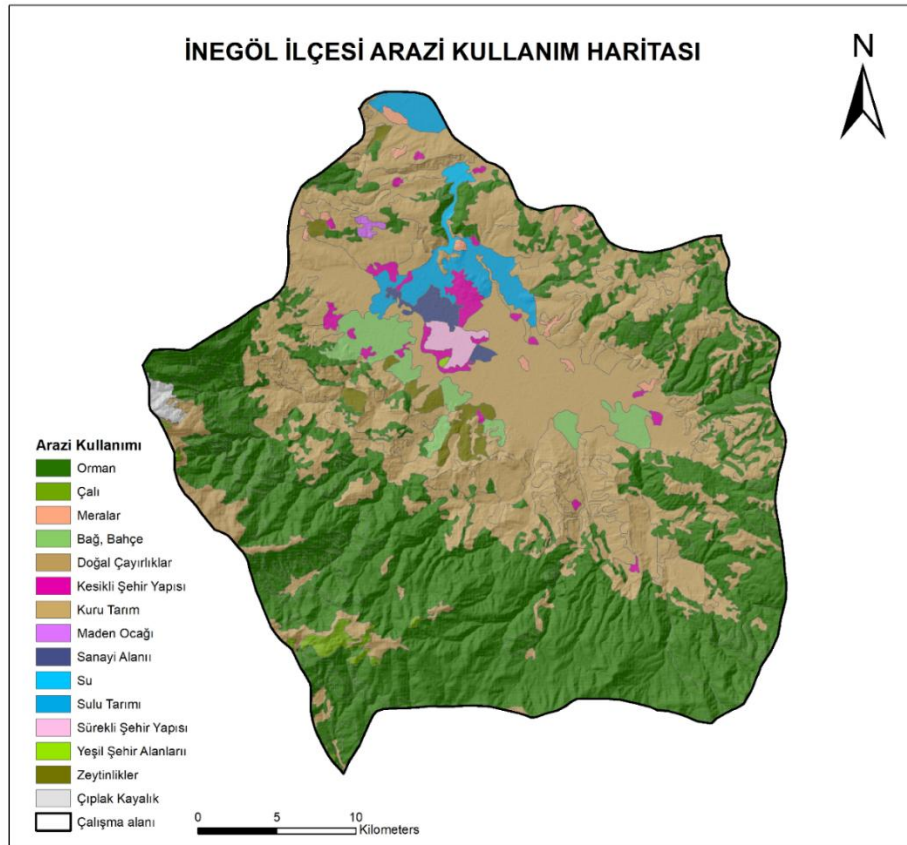
Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	Mermer,Şist mermer,Neritik Kireçtaşı
2.Sınıf(Düşük)	Şist,Karbonatlar,Granodiyon
3.Sınıf(Orta)	Meta Kırıntılar,Gnays
4.Sınıf(Yüksek)	Bazalt,Metabazik, Gölsel Karbonatlar
5.Sınıf(Çok Yüksek)	Alüvyon,Karasal Kırıntı,Kırıntı ve Karboatl

3.2.11 Arazi Kullanım Durumu

Arazi kullanım durumu, insan faaliyetlerinin ve doğal süreçlerin yeryüzü şekilleri ve zemin özellikleri üzerindeki etkilerini yansıtan önemli bir parametre olup, heyelan duyarlılık analizlerinde kritik bir role sahiptir [73]. Özellikle ormansızlaştırılmış, tarım alanlarına dönüştürülmüş veya yerleşim yerleriyle kaplanmış bölgelerde toprak stabilitesinin zayıfladığı ve heyelan riskinin arttığı gözlemlenmektedir [46]. Arazi örtüsünün türü, bitki köklerinin zemin bağlayıcı etkisi ve yüzey suyu akışını düzenleyici işlevi nedeniyle heyelan mekanizmasında doğrudan etkilidir [47]. Yapılan çalışmalar, orman alanlarının heyelan riskini azaltıcı bir faktör olduğunu; buna karşılık çıplak toprak, tarım arazileri ve yerleşim alanlarının ise heyelan olasılığını artırdığını ortaya koymuştur [74]. Bu nedenle, arazi kullanım durumunun mekânsal dağılımı, heyelan duyarlılık haritalarının doğruluğunu ve öngörü gücünü artırmak açısından temel bir girdidir [66]. Ayrıca, arazi kullanım

değişikliklerinin zamansal takibi, arazi yönetimi ve afet risklerinin azaltılması stratejileri için önemli bir veri kaynağı sağlamaktadır [67].

Arazi kullanım haritasının hazırlanmasında Avrupa Çevre Ajansı tarafından geliştirilen CORINE Land Cover (CLC) 2018 veri seti temel alınmıştır. İlk aşamada, <https://land.copernicus.eu> adresinden temin edilen CORINE verisi, çalışma alanını kapsayacak şekilde indirilmiş ve ArcMap ortamına aktarılmıştır. Verinin izdüşümü sistemi, çalışma alanı ile uyumlu hâle getirildikten sonra “Clip” aracı kullanılarak yalnızca İnegöl ilçesi sınırları içerisindeki arazi kullanımı sınıfları elde edilmiştir. Ardından, çok detaylı sınıflar basitleştirilerek 13 temel arazi kullanım türü altında yeniden sınıflandırılmış ve görsel okunabilirliği artırmak amacıyla sembolojisi standart renk kodlarına göre düzenlenmiştir. Bu işlem sonucunda, arazi kullanımının mekânsal dağılımını yansıtan tematik harita oluşturulmuş ve heyelan duyarlılığı analizlerinde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.13. Çalışma Alanına Ait Arazi Kullanım Haritası

Çalışma alanının arazi kullanım durumunu ortaya koymak amacıyla hazırlanan harita, İnegöl ilçesinde farklı kullanım türlerinin mekânsal dağılımını ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. (Şekil 3.13) Analiz sonuçlarına göre, ormanlık alanlar özellikle güney, güneydoğu ve batı kesimlerde geniş yüzeyler kaplamakta olup, bu bölgeler yoğun bitki örtüsünün zemin stabilitesi üzerindeki olumlu etkisi sayesinde görece düşük heyelan duyarlılığı göstermektedir. Orman örtüsü, yüzey akışını azaltarak infiltrasyonu desteklemekte ve toprak erozyonunu sınırlamaktadır.

Buna karşılık, kuzey ve merkez kesimlerde yoğunlaşan sürekli ve kesikli şehir yapısı, sanayi alanları ve maden ocakları, yüzeyin doğal özelliklerini dönüştürerek zemin stabilitesini olumsuz yönde etkileyen insan kaynaklı müdahalelere işaret etmektedir. Bu alanlar, geçirimsiz yüzeylerin artmasıyla birlikte yağış sularının drenajını zorlaştırmakta ve ani doygunluk durumlarına neden olarak heyelan riskini artırmaktadır.

Tarım alanları (kuru ve sulu tarım), meralar ve doğal çayırılar ise orta eğimli yamaçlarda yer almakta olup, toprak işleme faaliyetlerinin sürekliliği nedeniyle zemin yapısında gevşemeye yol açabilmekte ve bu durum, heyelan oluşumu açısından potansiyel risk oluşturmaktadır. Özellikle bağ-bahçe ve zeytinlik alanlarında teraslama uygulamalarının yapılmadığı bölgelerde bu risk daha da artmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, arazi kullanım biçimi, hem doğal süreçleri hem de insan faaliyetlerini yansıttığı için heyelan duyarlılığı analizlerinde temel parametrelerden biri olarak ele alınmış; özellikle yerleşim, sanayi ve tarım alanları, yüksek duyarlılık bölgeleri olarak ön plana çıkmıştır.

Uygun haritasını elde edebilmek arazi kullanım durumu faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.12’de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre en düşük heyelan riski olan alanlar orman, zeytinlik, yeşil şehir alanları iken en yüksek heyelan riski olan alanlar doğal çayırılar, maden ocağı, çıplak kayalıklardır.

Çizelge 3.12. Arazi Kullanım Durumu Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

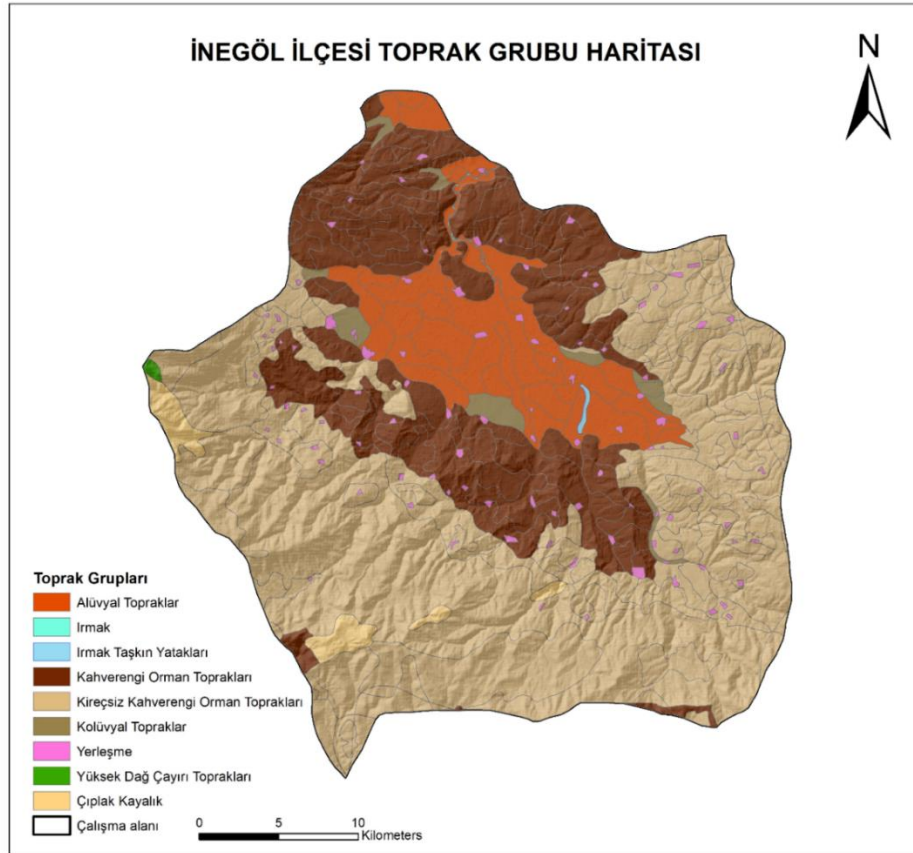
Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	Orman,zeytinlik,yeşil şehir alanı
2.Sınıf(Düşük)	Bağ-bahçe,meralar,çalı

3.Sınıf(Orta)	Kuru tarım,Sulu tarım
4.Sınıf(Yüksek)	Kesikli şehir,sürekli şehir,sanayi alanı
5.Sınıf(Çok Yüksek)	Doğal çayırlar,maden ocağı,çıplak kayalık

3.2.12. Toprak Grubu

Toprak grubu, bir bölgedeki zemin malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini tanımlayan temel bir jeoteknik parametre olup, heyelan duyarlılık analizlerinde kritik bir değişken olarak değerlendirilmektedir [46].

İnegöl ilçesine ait toprak grubu haritası, Tarım ve Orman Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan güncel toprak verileri kullanılarak hazırlanmıştır. İlgili veri seti CBS ortamına aktarıldıktan sonra, çalışma alanı sınırlarına göre clip işlemi uygulanmış, ardından harita üzerinde tanımlı sınıflar (örneğin alüvyal topraklar, kahverengi orman toprakları vb.) temelinde tematik sınıflandırma yapılmıştır.



Şekil 3.14. Çalışma Alanına Ait Toprak Grubu Haritası

Harita incelendiğinde, İnegöl ilçesinde kahverengi orman toprakları ile alüvyal toprakların geniş bir yayılım alanına sahip olduğu görülmektedir. (Şekil 3.14) Kahverengi orman toprakları, genellikle orta ve yüksek eğimli, ormanlık alanlarla ilişkilidir ve yüzeysel akışın yoğun olduğu bölgelerde yer almaktadır. Bu nedenle erozyona açık, suyla doymun hale geldiğinde ise heyelan oluşumuna daha yatkın zeminler olarak değerlendirilmektedir.

Alüvyal topraklar ise daha çok akarsu vadileri boyunca yer almakta ve geçirgenlik özelliklerine bağlı olarak suyu tutma kapasiteleri yüksektir. Bu durum, özellikle yüksek yağış alan dönemlerde zemin doymunluğunun artmasına neden olabilir ve heyelan riskini artırabilir. Haritada ayrıca kolüvyal topraklar, kireçsiz kahverengi orman toprakları ve yüksek dağ çayırı toprakları gibi farklı sınıflar da yer almakta, bu çeşitlilik zemin karakteristiklerinin heyelan oluşumuna olan etkisinin bölgeden bölgeye değiştiğini göstermektedir.

Toprak türlerinin fiziksel özellikleri (dokusallık, geçirgenlik, kohezyon) heyelanların oluşum mekanizmalarını doğrudan etkilediğinden, bu parametre duyarlılık analizinde temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmiştir.

Uygun haritasını elde edebilmek toprak grubu faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.13.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre kahverengi orman toprağı ve kireçsiz kahverengi orman toprağı düşük heyelan riskli topraklar iken Irmak, ırmak taşkın yatakları, çıplak kayalıklar yüksek heyelan riski oluşturmaktadır.

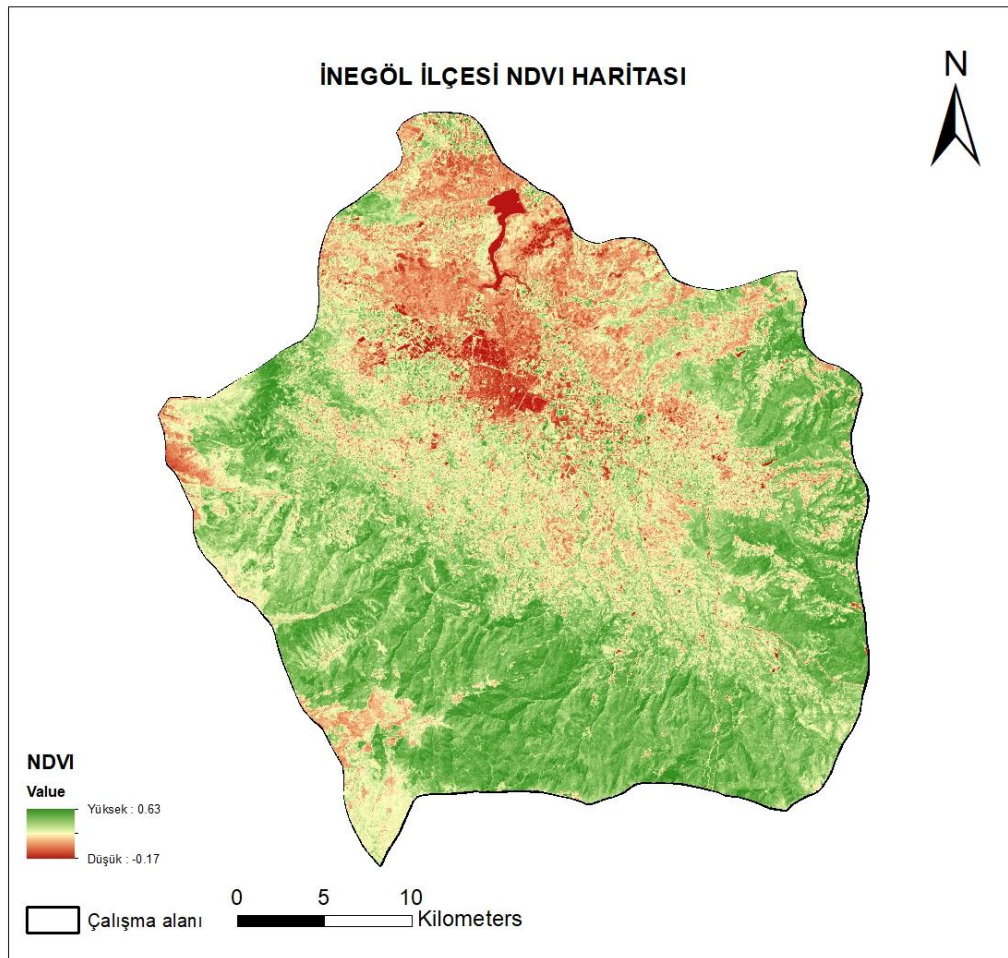
Çizelge 3.13. Toprak Grubu Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	Kahverengi orman toprağı ,kireçsiz kahverengi orman toprağı
2.Sınıf(Düşük)	Yüksek dağ çayırı toprakları
3.Sınıf(Orta)	Kolüvyal toprak
4.Sınıf(Yüksek)	Alüvyal toprak,yerleşme
5.Sınıf(Çok Yüksek)	Irmak,ırmak taşkın yatakları,çıplak kayalık

3.2.13. NDVI

NDVI, bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığını yansıtan, uydu görüntüleri veya hava fotoğraflarından türetilen bir spektral indeks olarak, heyelan duyarlılık analizlerinde önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir [75]. Literatürde yapılan çalışmalar, düşük NDVI değerlerinin genellikle çıplak zemin, tarım alanları veya yerleşim bölgelerine karşılık geldiğini ve bu alanlarda zemin erozyonu ve yüzey akışı nedeniyle heyelan riskinin arttığını göstermektedir [66]. Yüksek NDVI değerlerinin bulunduğu ormanlık veya yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda ise suyun infiltrasyon kapasitesi artmakta ve yüzeysel akış azalmakta; böylece heyelan olasılığı belirli ölçüde düşmektedir[67].

NDVI haritası oluşturulurken, EarthExplorer platformu üzerinden İnegöl ilçesine ait Landsat 8 uydu görüntüleri indirilmiştir. Bitki örtüsünün sağlığını ve yoğunluğunu yansıtan bu analiz için özellikle Bant 4 (Red) ve Bant 5 (Near Infrared - NIR) kullanılmıştır.



Şekil 3.15. Çalışma Alanına Ait NDVI Haritası

İnegöl ilçesine ait NDVI haritası, bölgedeki bitki örtüsünün mekânsal dağılımını ve yoğunluğunu açıkça ortaya koymaktadır. (Şekil 3.15) Haritada yeşil tonlarla ifade edilen yüksek NDVI değerleri, özellikle güney ve güneydoğu kesimlerde yoğunlaşmakta olup, bu alanların ormanlık ve yoğun bitki örtüsüyle kaplı olduğunu göstermektedir. Bu bölgeler, bitki örtüsünün zemini koruyucu etkisi sayesinde heyelan riski açısından daha az duyarlılık göstermektedir.

Öte yandan, kırmızı tonlarla temsil edilen düşük NDVI değerleri, ilçenin kuzeyinde ve merkez çevresinde yaygın olup, bu alanların büyük oranda yerleşim, sanayi ya da tarımsal faaliyetlerle dönüştürülmüş olduğu anlaşılmaktadır. Bitki örtüsünün seyrek ya da yok denecek kadar az olduğu bu alanlarda yüzeysel akış daha hızlı gerçekleşmekte ve zemin erozyona açık hale gelmektedir. Bu nedenle, düşük NDVI değerine sahip alanlar heyelan açısından daha kırılgan bölgeler olarak değerlendirilmiştir.

Uygun haritasını elde edebilmek toprak grubu faktörüne ait harita tekrardan sınıflandırarak 5 sınıflı hale getirilmiştir. Bu sınıflanmaya ait değerler Çizelge 3.14.'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmaya göre NDVI değeri düştükçe heyelan riski artmaktadır, yükseldikçe risk azalmaktadır.

Çizelge 3.14. NDVI Faktörü Yeniden Sınıflandırma Değer Aralıkları

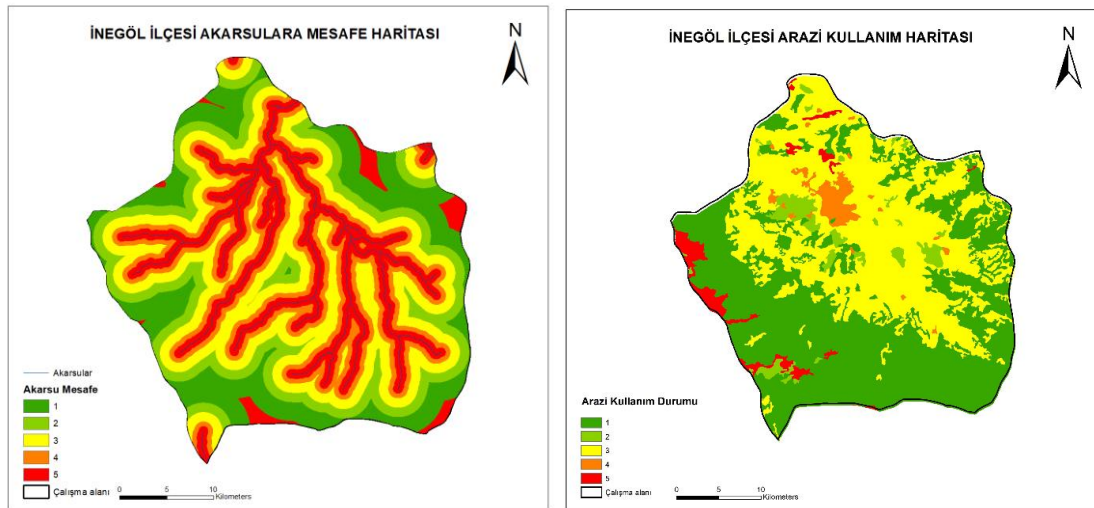
Sınıfı	Değer Aralığı
1.Sınıf(Çok Düşük)	$0,6 \leq NDVI \leq 0,63$
2.Sınıf(Düşük)	$0,5 < NDVI \leq 0,6$
3.Sınıf(Orta)	$0,3 < NDVI \leq 0,5$
4.Sınıf(Yüksek)	$0,1 < NDVI \leq 0,3$
5.Sınıf(Çok Yüksek)	$-0,17 < NDVI \leq 0,1$

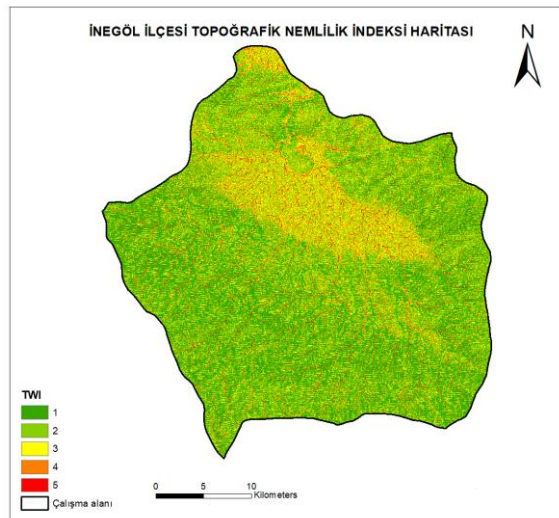
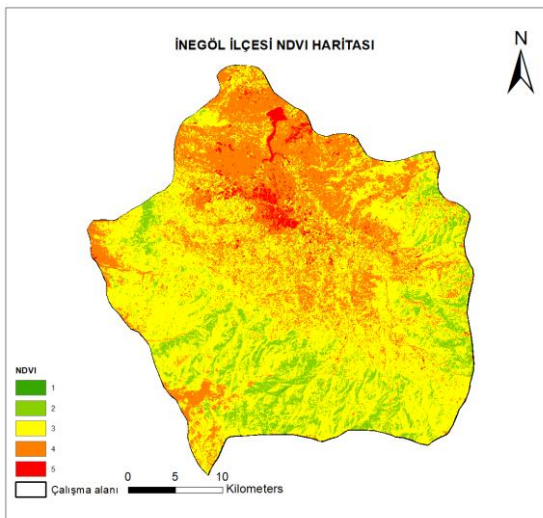
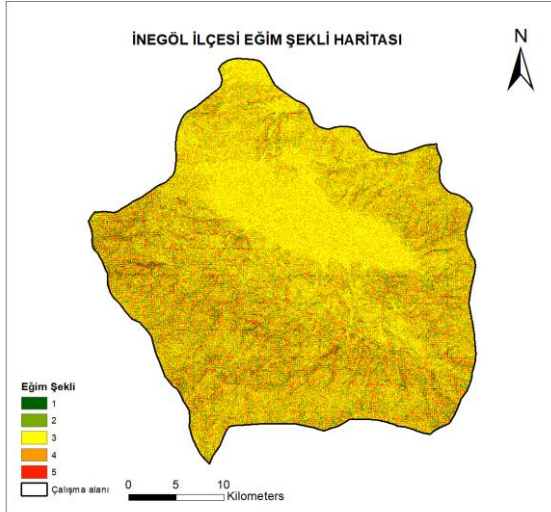
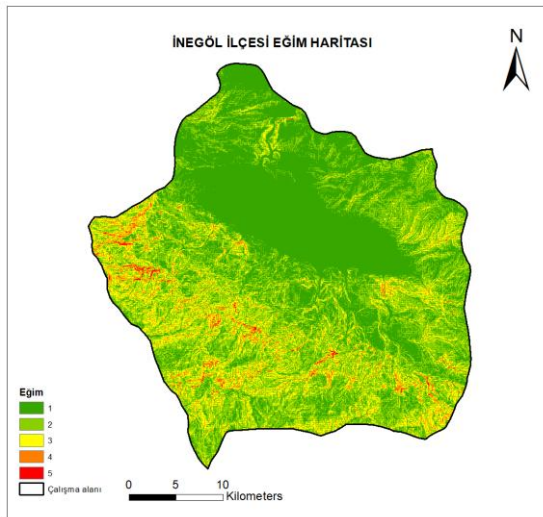
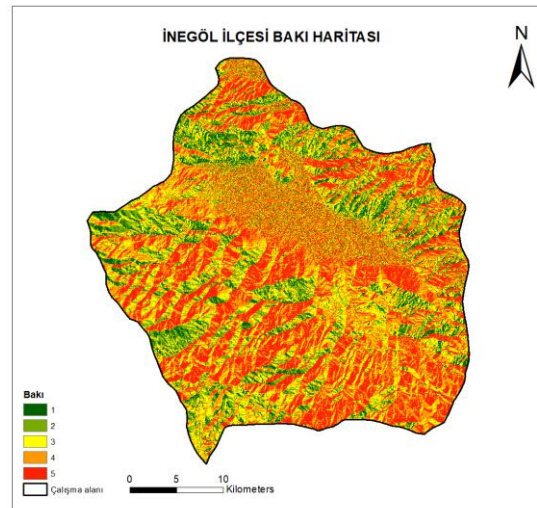
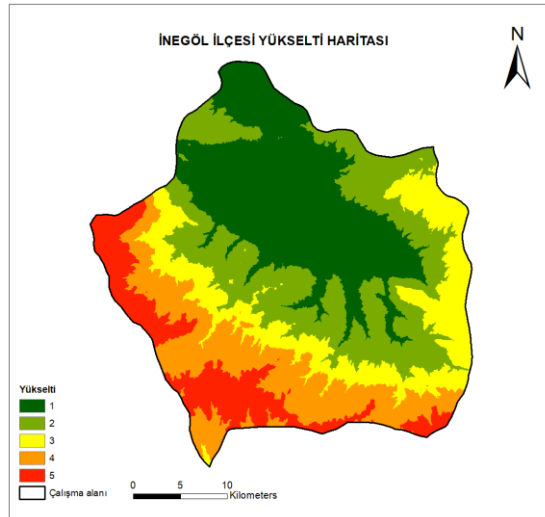
4.UYGULAMA

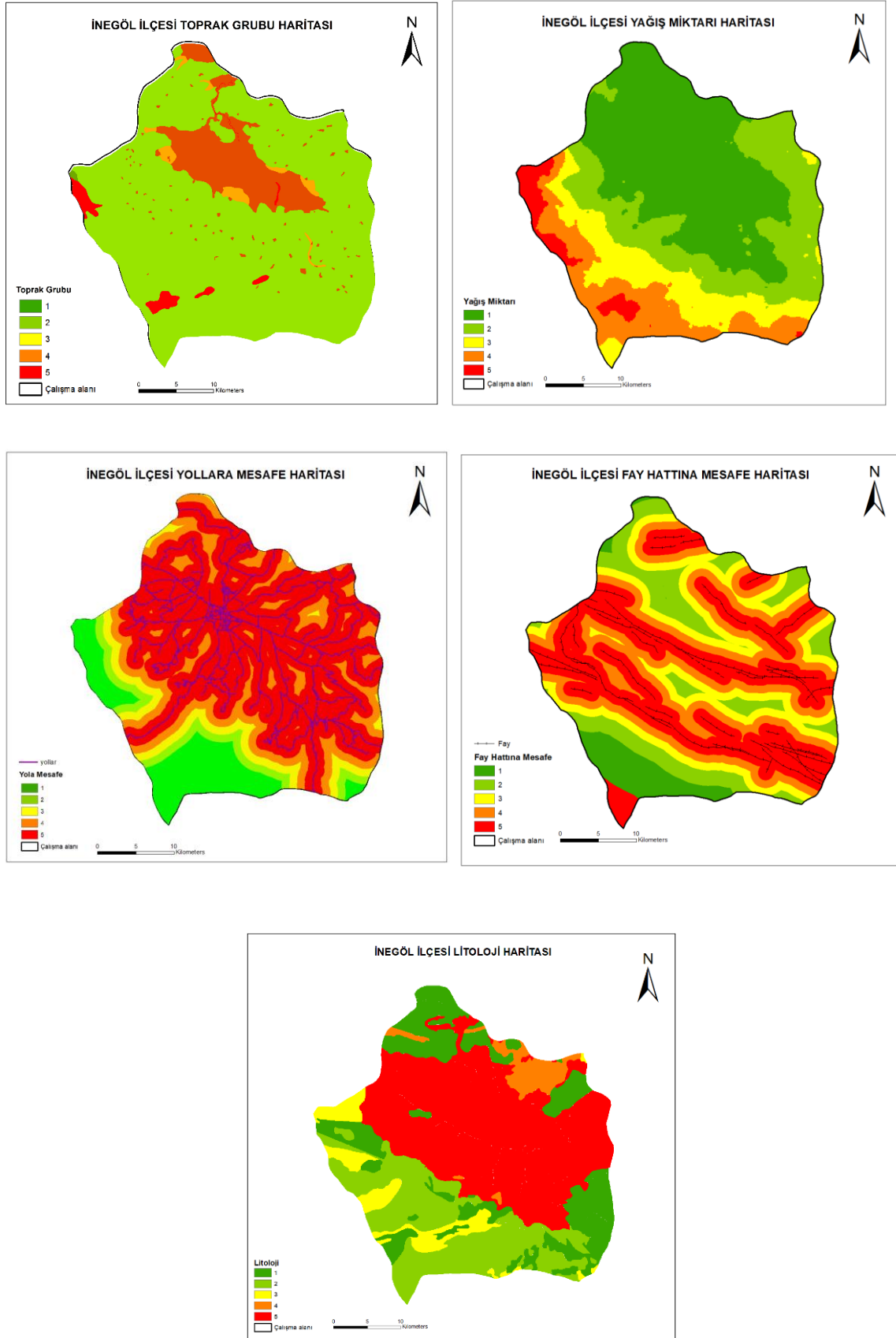
4.1.Uygunluk Haritalarının Oluşturulması

Çalışma alanına ilişkin heyelan duyarlılık haritasının oluşturulabilmesi amacıyla gerekli tüm veriler, ilgili kamu kurumları ve çevrimiçi veri portalları aracılığıyla temin edilmiştir. Elde edilen bu veriler, CBS ortamında işlenmiş; mekânsal analiz süreçleri kapsamında Arcmap 10.8 yazılımında yeniden sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma işlemi yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda yapılmış olup tezin 3.2.Çalışmada Kullanılan Faktörler ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi kısmında detaylı bir şekilde ifade edilmiştir. Yapılan yeniden sınıflandırma işlemi ile çok fazla sınıfa ait faktörler heyelana sebebiyet verme durumuna göre 5 sınıfa düşürülmüştür. Bu işlem sonucunda toplam 13 parametreye ait 5 sınıflı uygunluk haritaları üretilmiştir. Vektör verilerde 27*27 m hücre çözünürlüğünde raster veriler elde edilmiştir. Bu haritalar, heyelan duyarlılığının mekânsal dağılımını belirlemede temel teşkil etmektedir.

Çalışma alanına ait tüm uygunluk haritaları Şekil.4.1.'de gösterilmiştir.





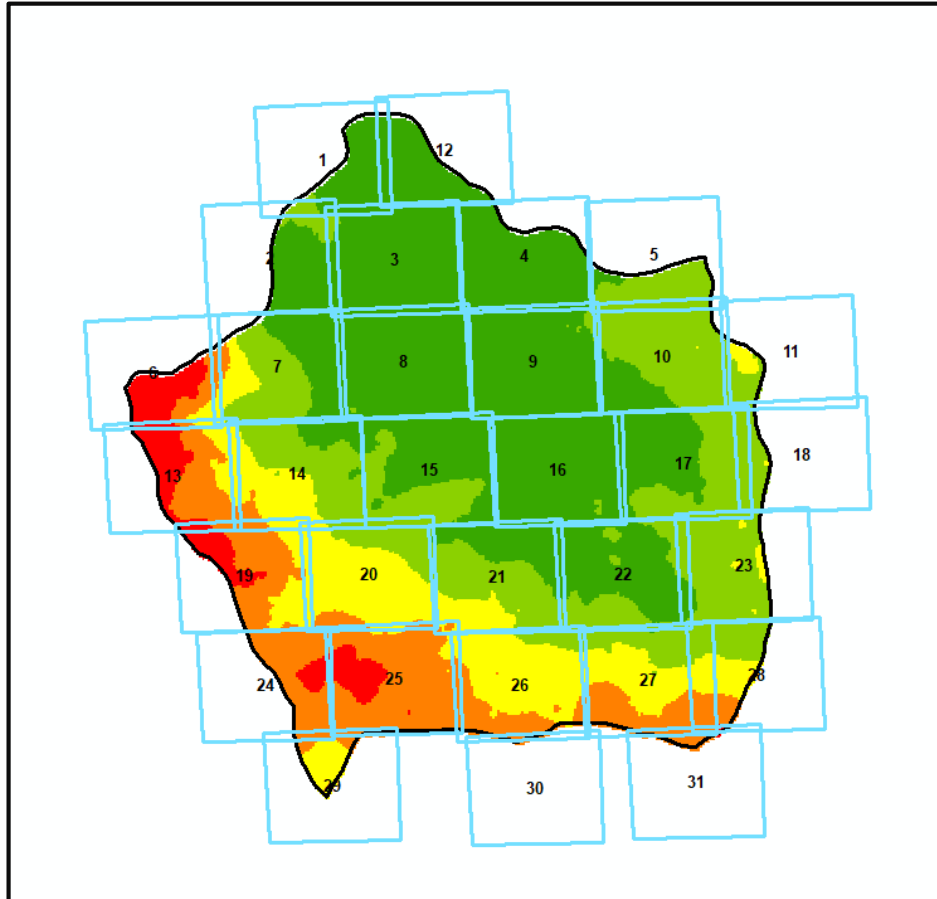


Şekil 4.1. Çalışma Alanına Ait Uygun Haritaları

4.2.Makine Öğrenme Teknikleriyle Faktör Ağırlıklarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, makine öğrenmesi modellerine girdi oluşturacak çevresel parametrelerin mekânsal karakteristiklerini daha temsil edici biçimde analiz edebilmek amacıyla, çalışma alanı bölgelere ayrılarak sistematik bir değerlendirme süreci izlenmiştir. Bu yaklaşım, modelleme sürecine geçmeden önce veri setinin coğrafi yapıya uygun olarak bölgesel bazda yapılandırılmasına olanak tanımaktadır.

Analiz kapsamında, Bursa ili İnegöl ilçesini kapsayan çalışma alanı, CBS ortamında Şekil 4.2’de gösterildiği üzere 31 adet eş geometrili bölge ayrılmıştır. Bu bölgeler, raster temelli tematik haritalar üzerinde gözlemsel analiz yapılabilecek optimum ölçek ve çözünürlükte oluşturulmuş olup, her biri belirli bir alanı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Bölge oluşturma sürecinde hem çalışma alanının sınırları hem de topografik bütünlük dikkate alınmıştır. Böylece, parametrik dağılımların bölgesel olarak yorumlanması sağlanmıştır.



Şekil 4.2. Çalışma Alanına Ait 31 Adet Bölge

Makine öğrenmesi sürecinde kullanılacak olan 13 çevresel faktör raster formatta hazırlanmış ve her biri 1’den 5’e kadar yeniden sınıflandırılmıştır. Bu sınıflar, her bir faktörün heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisini temsil etmektedir.

Bölge tabanlı analiz sürecinde, her faktör raster katmanı sırasıyla ArcMap ortamına çağırılmış, sadece analiz edilecek katman görünür kılınarak diğer tüm katmanlar devre dışı bırakılmıştır. Her bir bölgenin içerdiği hücreler, tematik harita üzerinden görsel olarak analiz edilmiş ve o bölge için baskın sınıf değeri belirlenmiştir. Bu değerlendirme sürecinde bölge sınırları ile raster sınıfların çakışma biçimleri, alan yoğunluğu ve sınıf yayılımı dikkate alınarak yaklaşık bölgesel temsil değeri atanmıştır.

Elde edilen sınıf değerleri, bölge katmanının öznitelik tablosunda her bir faktöre ait ayrı sütunlara işlenmiş, böylece 13 faktörü temsil eden ve 31 örnek içeren çok değişkenli bir veri yapısı oluşturulmuştur. Bu veri yapısı, dışa aktararak Excel formatına dönüştürülmüş ve ardından makine öğrenmesi algoritmaları için girdi matrisi olarak kullanılmıştır.

Hazırlanan excel dosyası makine öğrenmeleri kısmında girdi olarak kullanılmıştır ve sonucunda faktörlere ait ağırlık değerleri ve metrik sonuçları elde edilmiştir.

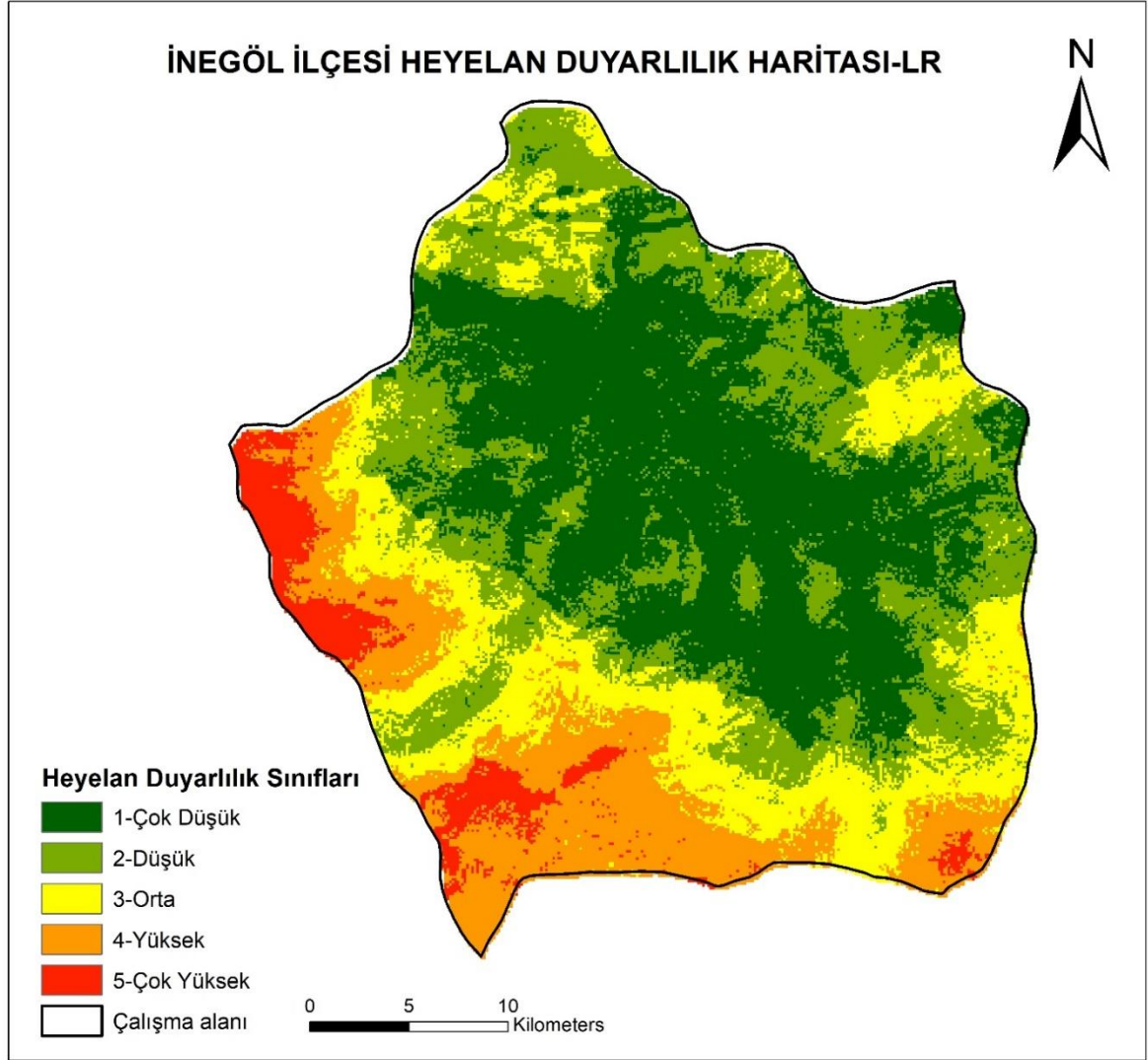
4.3.Karar Haritalarının Oluşturulması

Çalışma kapsamında belirlenen çevresel faktörlerin her biri, uygulanan makine öğrenme algoritmaları ile analiz edilerek faktörlerin modele katkı düzeyini temsil eden ağırlık katsayıları elde edilmiştir. Bu katsayılar, ilgili faktörlerin heyelan oluşumu üzerindeki etkisini sayısal olarak ifade etmekte ve karar haritası üretim sürecinde temel belirleyici olarak kullanılmaktadır.

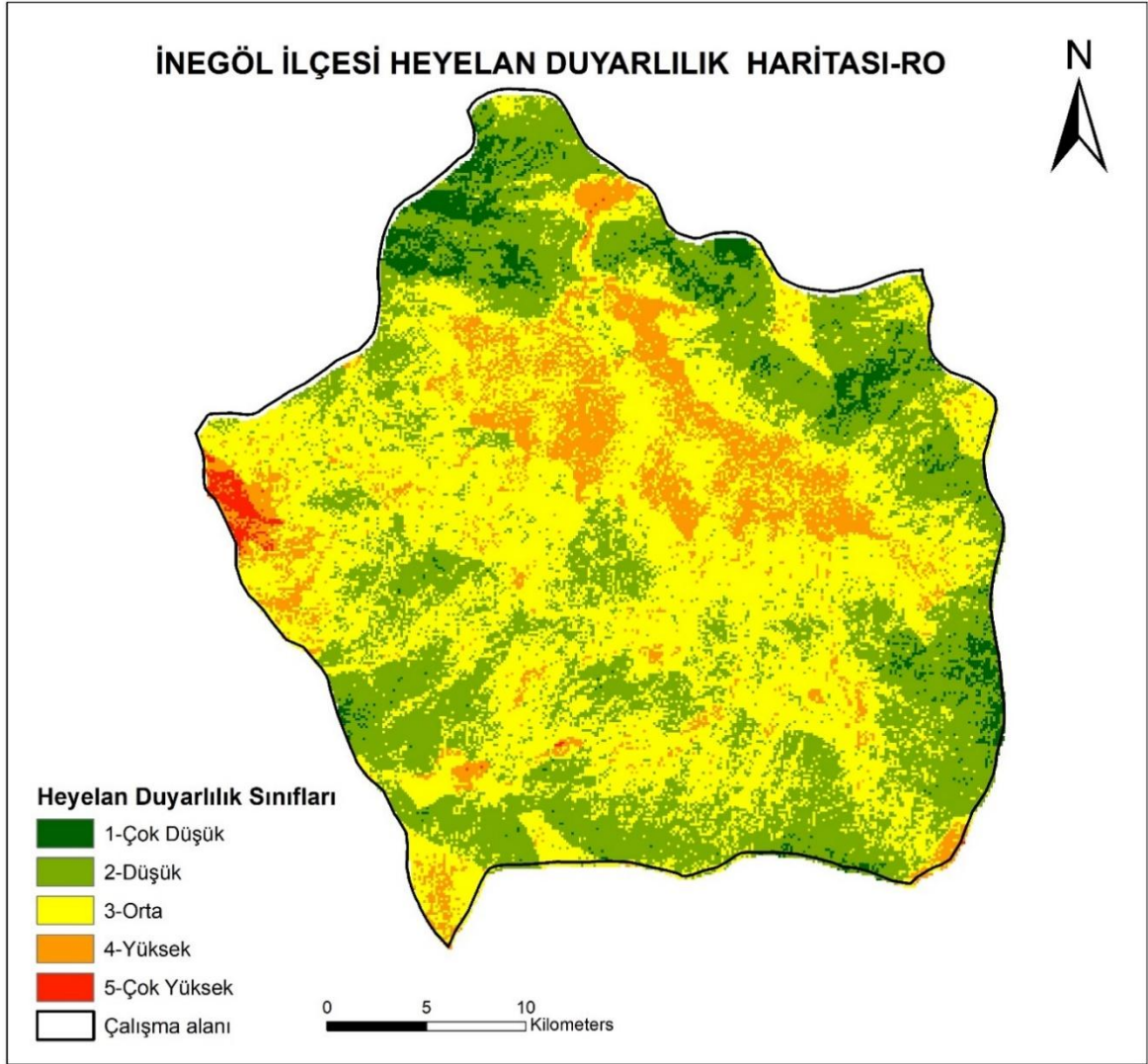
ArcMap yazılımı ortamında yürütülen analizlerde, raster formatında oluşturulan ve her biri 1’den 5’e kadar yeniden sınıflandırılan tematik faktör haritaları, ilgili makine öğrenme yönteminden elde edilen özgül ağırlık değeri ile hücre bazında çarpılmıştır. Bu işlemin ardından, tüm ağırlıklı raster katmanlar "Raster Calculator" aracı kullanılarak toplu biçimde birleştirilmiş ve her bir piksel için toplam risk puanı hesaplanmıştır.

Bu sayede, çalışma alanının her hücresinde heyelan duyarlılığına karşılık gelen bileşik bir değer elde edilmiş; elde edilen bu değerler esas alınarak nihai karar haritası oluşturulmuştur. Aynı yöntem, her bir makine öğrenme tekniği (LR, DVM, RO ve LightGBM) için ayrı ayrı

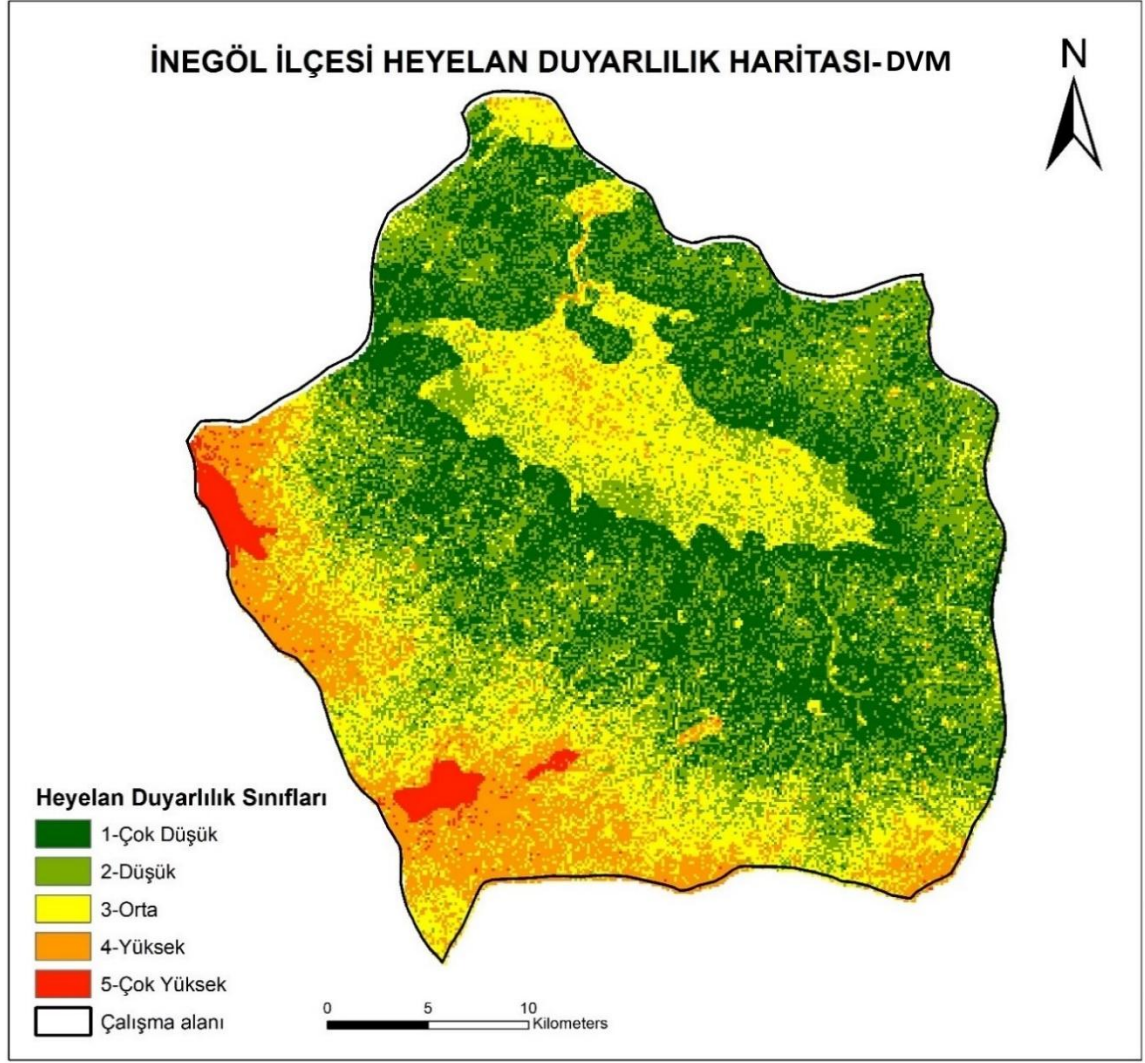
uygulanarak, her yönteme özgü karar haritaları ( ekil 4.3,  ekil 4.4,  ekil 4.5,  ekil 4.6) elde edilmiş ve bunlar karşılaştırmalı analizlerde değerlendirilmiştir.



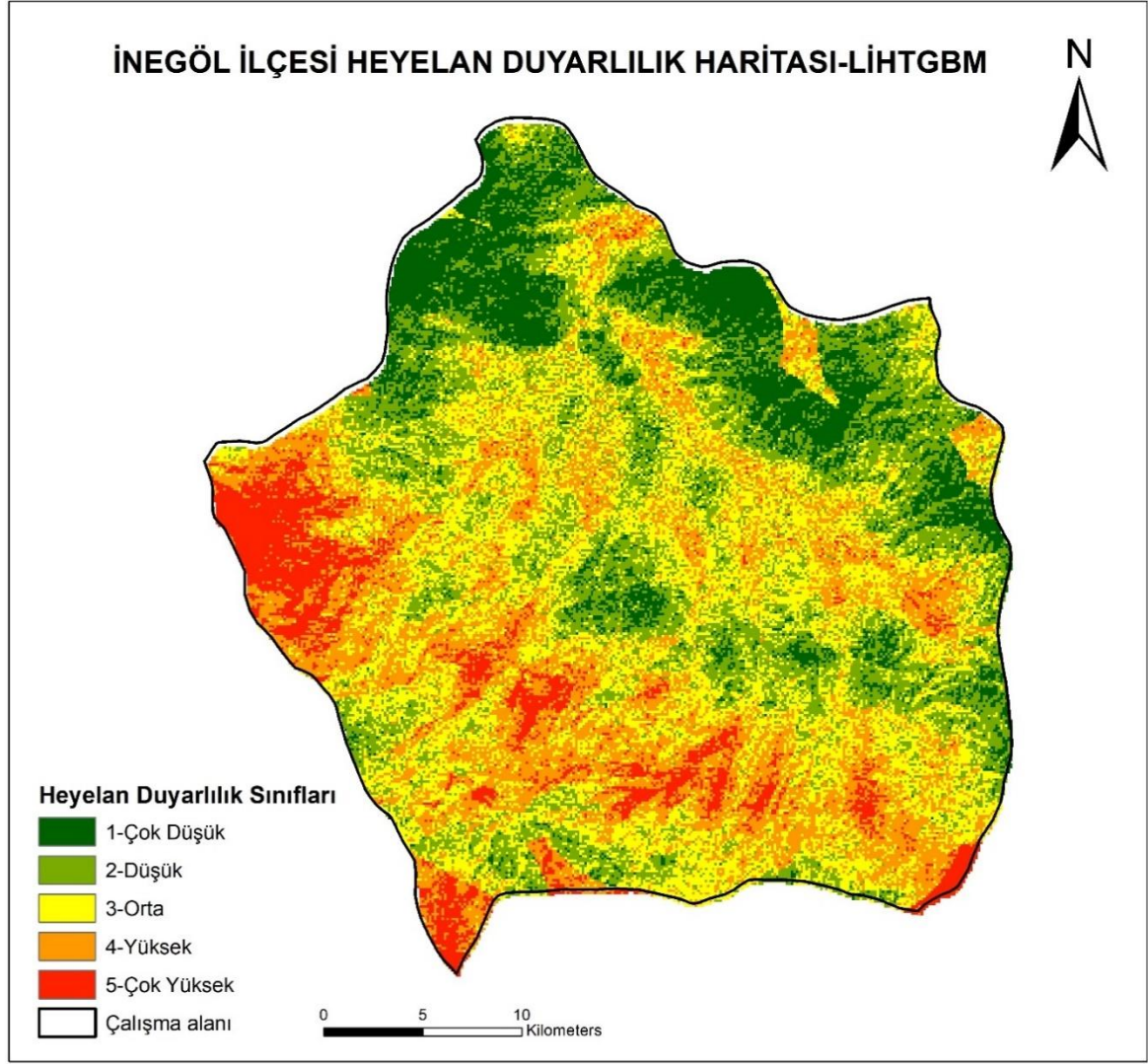
Şekil 4.3.  neg l  l esi HeyelanDuyarlılık Haritası-LR Yöntemi



Şekil 4.4. İnegöl İlçesi HeyelanDuyarlılık Haritası-RO Yöntemi

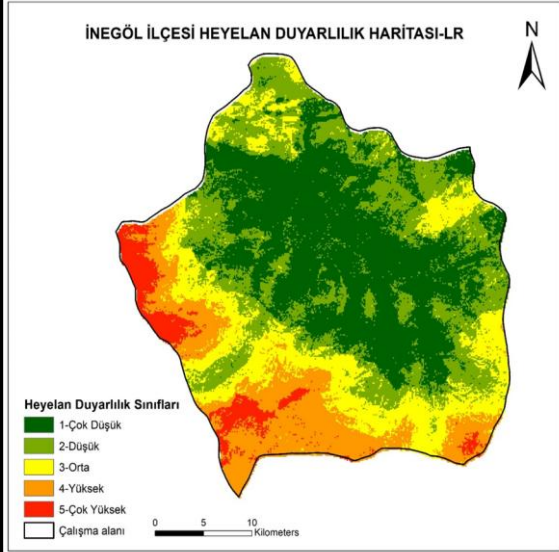


Şekil 4.5. İnegöl İlçesi HeyelanDuyarlılık Haritası-DVM Yöntemi

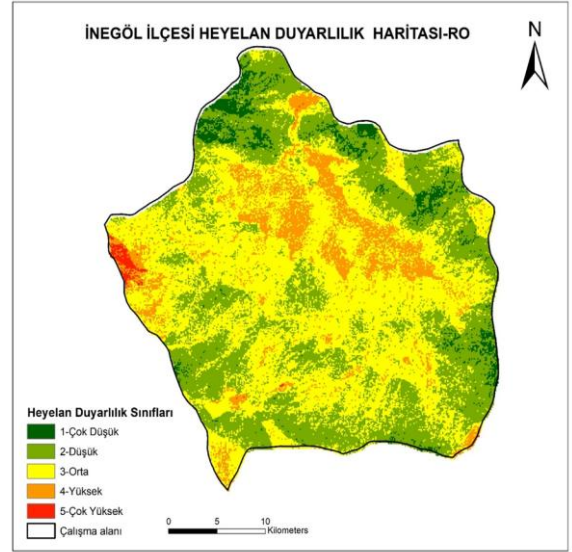


Şekil 4.6. İnegöl İlçesi Heyelan Duyarlılık Haritası-LightGBM Yöntemi

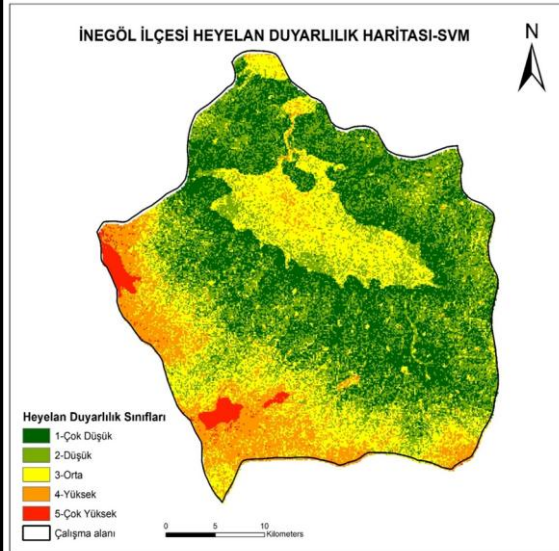
LR



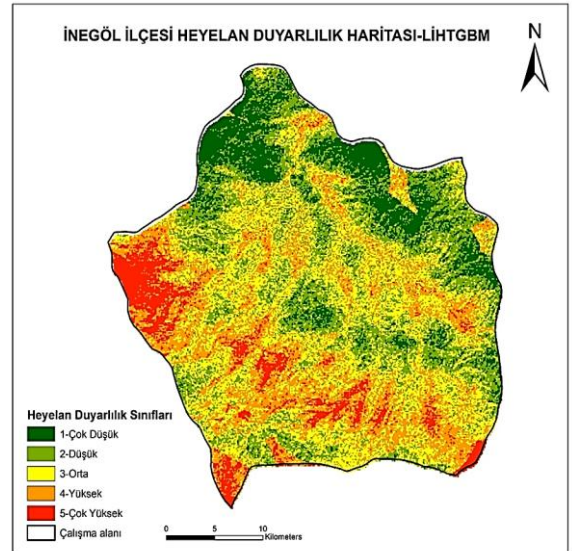
RO



DVM



LightGBM



Şekil 4.7. Farklı Teknikler ile Üretilen Heyelan Duyarlılık Haritalarının Karşılaştırılması

5.BULGULAR

5.1.Makine Öğrenme Tekniklerinin Çalışmaya Katkısı

Son yıllarda gelişen veri madenciliği ve yapay zekâ teknikleri, doğal afetlerin öngörülmesi ve duyarlılık analizlerinde önemli bir paradigma değişimi yaratmıştır. Özellikle karmaşık, çok değişkenli çevresel sistemlerde geleneksel istatistiksel yaklaşımların sınırlılıkları; makine öğrenmesi algoritmalarının esnek, veri temelli ve otomatik öğrenme yetenekleriyle aşılabilmektedir. Bu bağlamda, heyelan gibi çok faktörlü ve dinamik süreçlerin modellenmesinde, makine öğrenmesi yöntemleri öne çıkmakta ve mekânsal analizlerin doğruluğunu belirgin şekilde artırmaktadır.

Bu çalışmada, Bursa ili İnegöl ilçesi için yürütülen heyelan duyarlılık modellemesi kapsamında, CBS ile entegre çalışan makine öğrenmesi algoritmaları, mekânsal verilerin çok boyutlu ilişkilerini keşfetmede güçlü bir araç olarak kullanılmıştır. 13 çevresel parametreye ilişkin raster tabanlı tematik katmanlar, makine öğrenme yöntemlerine uygun biçimde 5'li sınıflara yeniden sınıflandırılarak sayısal hale getirilmiş ve mekânsal örüntülerin tanımlanması için kullanılmıştır.

Makine öğrenme algoritmaları, veri seti içindeki örüntüleri otomatik olarak öğrenme ve bu örüntüler doğrultusunda sınıflandırma yapabilme yetenekleri sayesinde, özellikle bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal olmayan ilişkileri yakalama konusunda üstünlük göstermektedir. Ayrıca, bu yöntemlerin parametrik olmayan yapısı, veri setinde dağılım varsayımlarına bağlı kalmadan çalışabilmelerini mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle, geleneksel istatistiksel tekniklere göre daha esnek bir yapıya sahiptirler.

Modelleme sürecinde kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları yalnızca heyelan riski taşıyan bölgelerin doğru biçimde sınıflandırılmasını değil, aynı zamanda parametrelerin göreceli katkılarının da sayısal olarak belirlenmesini sağlamıştır. Bu durum, çalışmanın hem karar destek sistemi mantığına hizmet etmesini hem de sonuçların nesnel şekilde yorumlanabilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle karar ağaçları temelli algoritmaların bulunduğu değişken önem sıralamaları, hangi çevresel faktörlerin heyelan gelişiminde daha belirleyici olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, makine öğrenme teknikleri, bu araştırmada yalnızca bir analiz aracı olarak değil, aynı zamanda heyelan duyarlılığına ilişkin çok faktörlü mekânsal örüntülerin bilimsel temelde modellenmesini sağlayan yenilikçi bir metodoloji olarak değerlendirilmiştir.

5.2.Kullanılan Makine Öğrenme Tekniklerinin Çalışmaya Etkisi

Bu çalışmada kullanılan dört makine öğrenme algoritması LR, RO, DVM ve LightGBM heyelan duyarlılık modellemesinde farklı avantajlar sunmaktadır. LR bağımsız değişkenlerin doğru ifade edilebilmesinde sağladığı avantajdan dolayı istatistiksel analizlerde oldukça sık tercih edilmektedir[76].

RO algoritması, mevcut veri kümesinden rastlantısal seçimlerle alt gruplar türetir. Bu gruplar üzerinden sınırlı derinlikte karar ağaçları geliştirerek genel modele uyumu iyileştirir. Bu yöntemle, modelin veri üzerindeki öğrenme kapasitesi dengelenir ve aşırı uyum riski azaltılır. LightGBM, gradyan artırma yaklaşımına dayanan bir algoritmadır ve özellikle geniş veri kümeleri ile çok sayıda değişken içeren durumlarda verimli çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. SVM algoritması, özellikle çok değişkenli ve doğrusal olmayan veri yapılarında başarılı sonuçlar veren bir sınıflandırma yöntemidir. Temel amacı, farklı sınıfları en geniş şekilde ayıran karar sınırını, yani maksimum marja sahip ayırıcı düzlemi belirlemektir. Bu özellikleri sebebiyle seçilen makine öğrenme tekniklerinin çalışmaya faydası oldukça fazladır [17].

Heyelan duyarlılık modellemesinde kullanılan dört farklı makine öğrenme algoritması hem sınıflandırma doğruluğu hem de mekânsal temsiliyet açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Modellerin eğitim ve test süreçleri, oluşturulan 13 çevresel faktörün 31 bölgeye ait ağırlıklı değerlerinin yer aldığı veri seti üzerinden yürütülmüş ve her bir algoritma için doğruluk, hassasiyet, geri çağırma ve F1 skoru gibi temel performans ölçütleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bulgular, en yüksek performansın %98 doğruluk oranı ve 0.98 F1 skoru ile RO algoritmasına ait olduğunu göstermektedir. Bu algoritma, özellikle yüksek boyutlu ve sınıflandırma problemi içeren veri kümelerinde öne çıkan modeller arasında yer almakta olup, bu çalışmada da benzer bir üstünlük göstermiştir.

DVM doğruluk oranı RO'ya çok yakın bir yüksek doğruluk oranı sağlamıştır. LR modeli, %96.89 doğruluk oranı ile güçlü bir performans sunarken; LightGBM algoritması %93.78 doğruluk ile diğer modellere göre daha düşük, ancak yine de tatmin edici sonuçlar vermiştir. LightGBM'nin doğruluk oranının daha düşük olmasının olası nedenleri arasında model parametrelerinin hassasiyeti ve veri setindeki örnek sayısının gradient boosting algoritmaları için sınırlı olması gösterilebilir.

Model performanslarının sayısal karşılaştırmaları aşağıdaki Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Makine Öğrenme Teknikleri Ağırlık Sonuçları

Faktör	RO	DVM	LightGBM	LR
Akarsu Mesafe	0.116	0.000	0.160	- 0.144
Toprak Cinsi	0.096	0.174	0.056	0.081
Arazi Kullanım	0.093	0.174	0.015	0.054
Eğim Şekli	0.088	0.003	0.000	- 0.178
Fay Mesafe	0.087	- 0.026	0.108	0.136
Litoloji	0.078	0.087	0.054	0.352
NDVI	0.076	0.000	0.027	0.161
Eğim	0.076	0.174	0.018	0.000
Yükselti	0.075	0.116	0.154	0.163

Toprak Nemlilik	0.065	0.087	0.076	0.217
Baki	0.058	0.091	0.109	0.081
Yagiş	0.057	0.003	0.110	- 0.086
Yola Mesafe	0.036	0.116	0.113	0.163

Çizelge 5.2. Makine Öğrenme Teknikleri Metrik Sonuçlar

Teknik	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Score
RO	0.98	0.98	0.98	0.98
DVM	0.97	0.98	0.97	0.97
LightGBM	0.93	0.94	0.93	0.92
LR	0.96	0.97	0.96	0.96

Yukarıdaki sonuçlara dayanarak, çalışmanın nihai duyarlılık haritası oluşturulurken en başarılı model olan RO algoritması temel alınmıştır. RO tabanlı karar haritası, çalışma alanındaki heyelan risk dağılımını beş sınıfa ayırarak (1 = çok düşük, 5 = çok yüksek) mekânsal açıdan görsel ve analitik anlamda güçlü bir çıktı sunmuştur. Bu harita, karar vericilere ve arazi planlamacılarına yönelik olarak riskli alanların önceden belirlenmesi açısından işlevsel bir araç olarak değerlendirilmektedir.

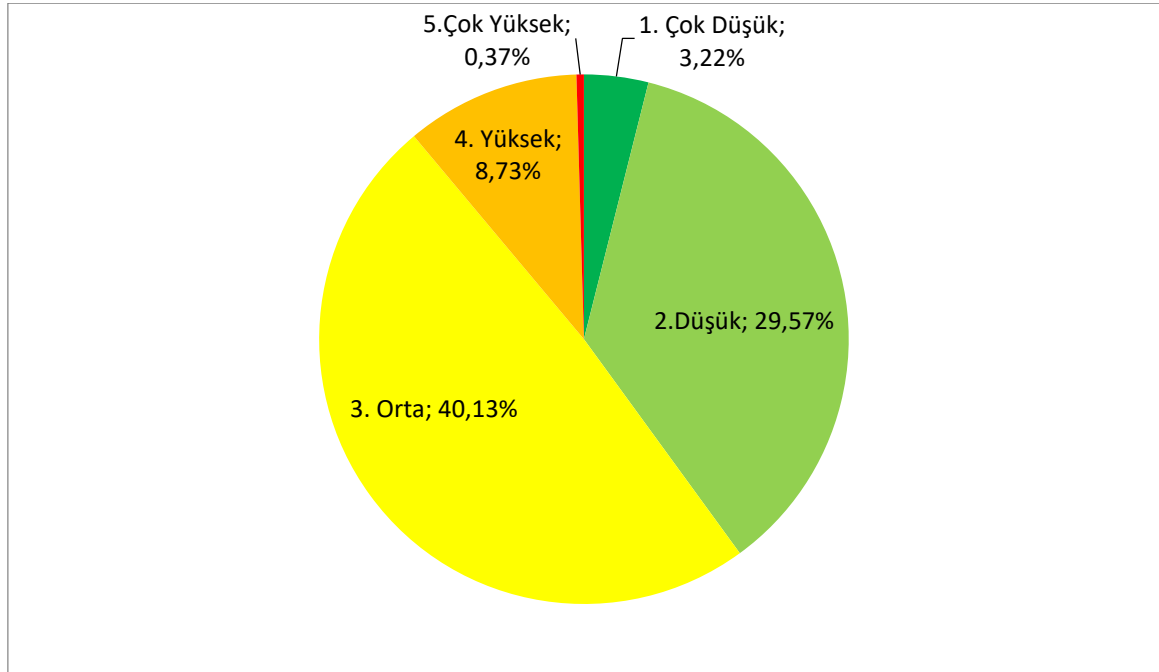
5.3. RO Karar Haritasının İncelenmesi

RO algoritması ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası, çalışma alanının beş farklı duyarlılık sınıfına göre mekânsal olarak dağılımını ortaya koymaktadır. Modelin sınıflandırma çıktısı doğrultusunda her pikselin 729 m²(bir piksek boyutu 27*27m) alanı temsil ettiği kabul edilerek, piksek alanının o sınıfa ait piksel sayısı ile çarpılması sonucu duyarlılık sınıfının çalışma alanında kapladığı alan ve yüzdesi hesaplanmıştır. Sınıflara ait

yüzölçümleri ve oranlar tablo şeklinde çizelge 5.3’de, grafik halinde ise Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. RO Karar Haritasına Ait Sınıflara Ait Yüzölçümleri ve Oranlar

1	Çok Düşük Duyarlılık	2.866	2,09	3,22
2	Düşük Duyarlılık	26.346	19,20	29,57
3	Orta Duyarlılık	35.785	26,07	40,13
4	Yüksek Duyarlılık	7.780	5,67	8,73
5	Çok Yüksek Duyarlılık	346	0,25	0,37



Şekil 5.1. RO Tekniğine Göre Üretilen Karar Haritasındaki Sınıf Oranları

Harita verilerine göre çalışma alanının en büyük bölümünü (Şekil 5.2) orta duyarlılık sınıfı oluşturmaktadır. Bu sınıf, ilçenin orta kesimlerinde yoğunlaşmış olup, yükseltinin çok yüksek olmadığı, akarsuya yola ve fay hattına yakın mesafedeki alanlara yayılmış durumdadır. Çalışma alanındaki Yenice, Gülbahçe, Gündüzlü, Çayyaka, Kayapınar mahalleleri bu sınıfta yer almaktadır.

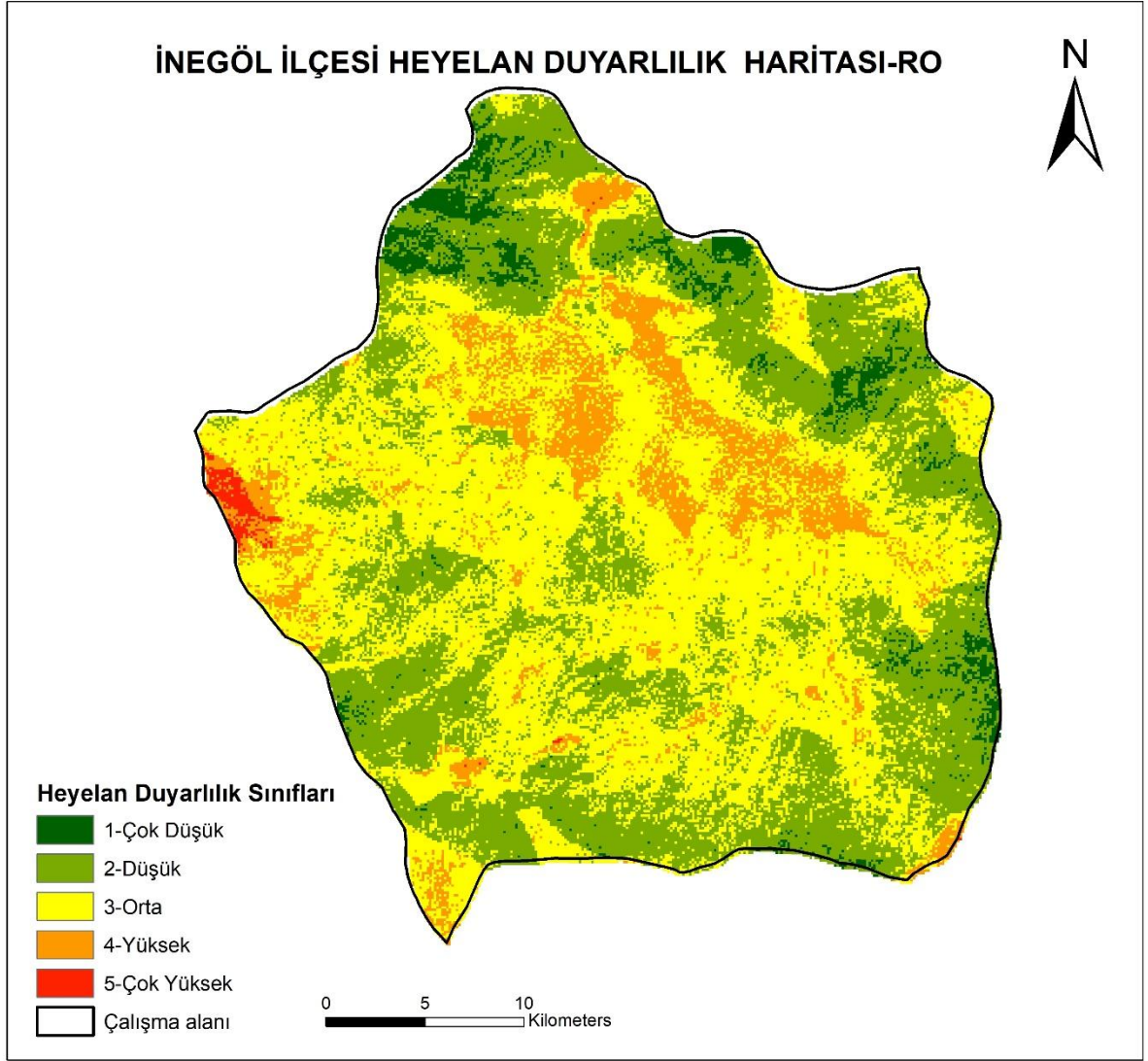
Düşük duyarlılıklı alanlar ise ikinci sırada gelmekte, daha çok kuzey ve doğu kesimlerinde, eğimi düşük ve zemin stabilitesi yüksek alanlarda yoğunlaşmaktadır.

Yüksek duyarlılık sınıfına, çalışma alanındaki Kuzey’de Boğazköy barajı, şehir merkezindeki Sülemeniye ve Mahmudiye mahalleleri, Şipali, Hayriye, Tahtaköprü, Karacakaya, Eskikaracakaya, Tüfekçikonak, Ortaköy, Hasanpaşa, Rüştiye, Hamamlı, Kulaca mahalleri dahil olmuştur. Müdahale planlamasında öncelik verilmesi gereken alanlar olarak değerlendirilmelidir.

Çok yüksek duyarlılık sınıflarının alansal dağılımı ise sınırlı olup, inegölün batısındaki dağlık bölgeleri kapsamaktadır.

Çok düşük duyarlılığa sahip sınıf ise haritada koyu yeşil tonlarla temsil edilmekte olup, bu alanlar kahverengi orman toprağı ve kireçsiz kahverengi orman toprağı grubunun olduğu bölgelerde, arazi kullanım durumu orman olan ve litolojik yapısı yüksek oranda şist-mermer olan, eğimi düşük, yükseltisi düşük alanlarda yayılım göstermektedir. Çalışma alanında yeniörük ve şehitler mahallesi bu sınıfta yer almaktadır.

Elde edilen bu mekânsal bulgular, RO algoritmasının sınıflandırma başarısını sayısal ve coğrafi düzlemde doğrulamaktadır. Haritanın genel yapısı, çalışmanın parametre seçimlerinin ve modelleme yaklaşımının coğrafi gerçeklikle yüksek oranda örtüştüğünü ortaya koymaktadır.



Şekil 5.2. RO Tekniği Kullanılarak Hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

6.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Bursa ili İnegöl ilçesine ait heyelan duyarlılık alanlarını belirlemek amacıyla LR, DVM, LightGBM ve RO olmak üzere dört farklı makine öğrenme algoritması kullanılarak duyarlılık haritaları üretilmiştir. Her bir yöntemin doğruluk performansı, sınıflandırma başarı metrikleri ve parametre ağırlıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

CBS yardımıyla makine öğrenme teknikleri kullanılarak çok parametrelili bir analiz süreci gerçekleştirilen bu çalışmada heyelan oluşumunu etkileyen 13 çevresel faktör, yeniden sınıflandırılmış ve faktör ağırlıkları makine öğrenme teknikleriyle belirlenmiştir. Ayrıca, modellerin sınıflandırma performansı; doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru gibi temel ölçütler üzerinden değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, en yüksek sınıflandırma başarıları %98 doğruluk, %98 kesinlik, %98 duyarlılık ve %98 F1 skoru ile RO algoritmasında kaydedilmiştir. Bu modeli sırasıyla %97 doğruluk ve F1 skoru ile DVM, %96 doğruluk ve F1 skoru ile LR takip etmiş; LightGBM algoritması ise %93 doğruluk ve %92 F1 skoru ile diğer modellere kıyasla daha düşük bir başarı göstermiştir. Tüm modellerde F1 skorlarının yüksek olması, sınıflandırma sonuçlarının genel olarak dengeli ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Parametrelerin önem düzeylerine ilişkin yapılan analizde, RO algoritmasında en etkili değişkenlerin sırayla akarsuya mesafe, toprak cinsi, arazi kullanımı, eğim şekli, fay hattına mesafe ve litoloji olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, hem jeolojik hem de morfometrik özelliklerin heyelan oluşumunu belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. LightGBM modelinde ise akarsuya mesafe en yüksek ağırlıkla öne çıkarken, bu değişkeni yükseltti, yola mesafe ve yağış izlemiştir. Bu durum, modelin özellikle hidrolojik ve topoğrafik parametrelere duyarlılık gösterdiğini düşündürmektedir. DVM algoritması parametrelerin çoğuna benzer derecede önem atamış olmakla birlikte, özellikle toprak cinsi, arazi kullanımı ve eğim gibi faktörlerde yoğunlaşmıştır. Bu modelde farklı tematik sınıflar arasında net ayrımlar yapılabilmesi adına morfolojik ve kullanım türlerine ait değişkenlerin baskın olduğu gözlenmiştir. LR modeline bakıldığında, en yüksek ağırlığın litoloji değişkenine ait olduğu görülmektedir. Litolojiyi TNİ, yükselti, NDVI, faya mesafe faktörleri takip etmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme, RO algoritmasının yalnızca sınıflandırma

başarısı açısından değil, aynı zamanda coğrafi faktörleri doğru şekilde tartma kapasitesi yönünden de üstün olduğunu ortaya koymaktadır.

R0 algoritmasına dayalı olarak üretilen heyelan duyarlılık haritası, çalışma alanını beş risk kategorisine ayırmakta ve mekânsal olarak oldukça dengeli bir sınıflandırma sunmaktadır. Raster veriler üzerinde yapılan hesaplamalarla her bir duyarlılık sınıfının kapladığı yüzey alanları hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, çalışma alanında en geniş yüzölçümüne sahip sınıf orta düzey duyarlılığa sahip alanlar (sınıf 3) olup, toplamda yaklaşık 26,07 km² (%40,13) ile en yaygın sınıf olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgeler genellikle orta eğim değerlerine ve litolojik zayıflık içeren formasyonlara sahip geçiş kuşaklarında yer almakta, dolayısıyla izleme ve planlamada öncelikli dikkate alınması gereken potansiyel risk alanlarını temsil etmektedir. Bu sınıf çalışma alanının kuzeyi haricinde geneline yayılmış durumdadır.

Düşük duyarlılık sınıfı (sınıf 2), 19,20 km² (%29,57) yüzölçümü ile çalışma alanının önemli bir kısmını kaplamakta ve İnegöl ilçesinin geneline yayılmış durumdadır. Bu alanlar, topoğrafik olarak daha sabit, eğimin düşük ve geçirgen zeminlerin hakim olduğu tarımsal faaliyet alanlarında konumlanmaktadır. Bu sınıf çalışma alanının geneline yayılmış durumdadır.

Yüksek duyarlılık sınıfı (sınıf 4) ise yaklaşık 5,67 km² (%8,73) ile risk açısından dikkate değer alanlar arasında yer almaktadır. Bu sınıfa ait bölgeler genellikle zayıf litolojik yapıya sahip, akarsulara yakın konumlanan ve yamaç morfolojisinin belirgin olduğu zonlardır. Çalışma alanının merkez bölgeleri ve biraz daha kuzeye yakın bölgelerinde yer almaktadır.

Çok düşük duyarlılık sınıfı (sınıf 1), 2,09 km² (%3,22) alan kaplayarak en az duyarlılığa sahip bölgeleri temsil etmektedir. Bu alanlar genellikle ova tabanları gibi nispeten yatay yüzeylerde yer almakta ve heyelan gelişimi açısından düşük risk barındırmaktadır. Bu nedenle, altyapı ve yerleşim projeleri için uygunluk arz etmektedir. Çalışma alanının genelde kuzey bölgelerinde yer almaktadır.

Çok yüksek duyarlılık sınıfı (sınıf 5) ise yalnızca 0,25 km² (%0,37) gibi sınırlı bir alanda yoğunlaşmıştır. Bu alanlar yüksek eğim, doygun toprak yapısı ve düşük litolojik dayanım gibi kritik risk faktörlerinin kesişiminde yer almakta olup, ciddi mühendislik müdahaleleri

ve arazi kullanımında kısıtlamalar gerektiren yüksek tehlike alanlarıdır. İnegöl'ün batı kesimlerindeki dağlık bölge bu sunufta yer almaktadır.

Çalışma ile ilgili yapılan değerlendirme sonucunda, İnegöl ilçesinde heyelan duyarlılığı büyük ölçüde orta ve düşük düzeyde yoğunlaşmakta; ancak yerel ölçekte yüksek ve çok yüksek risk gruplarının da bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, yapılaşma kararları, arazi kullanım planlamaları ve afet risk azaltma stratejileri belirlenirken, özellikle bu kritik zonlar dikkate alınmalı ve mühendislik tedbirleri ile desteklenmelidir.

Elde edilen sınıflandırma metriklerine göre RO algoritmasının çok sayıda karar ağacı ile çalışarak sınıflandırmada yüksek genelleme kapasitesi sağladığını göstermektedir. Özellikle dengeli sınıflarla eğitilmiş olması, modelin hem pozitif hem de negatif örnekleri başarılı şekilde ayırt etmesini sağlamıştır.

LightGBM yöntemi ise yüksek hızda çalışan, histogram temelli ayrıştırma yöntemiyle öne çıkmasına rağmen, RO'ya kıyasla daha düşük doğruluk ve F1 skoru ile değerlendirilmiştir. Bu durum, LightGBM'in düşük sayıda segment içeren küçük veri kümelerinde aşırı uyum eğiliminde olduğunu düşündürmektedir. LR ve DVM yöntemleri ise daha düşük doğruluk ve F1 skorları ile nispeten zayıf kalmış; bu durum özellikle karmaşık coğrafi desenlere sahip alanlarda doğrusal olmayan sınırlardaki başarısızlıklarıyla ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir. Parametre ağırlıkları incelendiğinde, tüm modellerde genel olarak eğim, litoloji, toprak grubu, faya uzaklık ve topografik nemlilik indeksi gibi faktörlerin yüksek önem düzeyinde olduğu görülmektedir. Ancak RO modelinde yola uzaklık ve arazi kullanım durumu faktörlerinin ağırlıkları belirgin şekilde daha fazladır. Bu durum, şehir merkezine yakın, düşük eğimli fakat insan faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerin RO tarafından yüksek duyarlılık sınıfına atanmasına neden olmuştur. Özellikle yolların sıklıkla geçtiği alanlar ve yapılaşma yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler, RO modeline göre heyelan açısından daha riskli görünmektedir.

Örneğin, İnegöl şehir merkezine yakın alanlarda RO ile elde edilen haritada yüksek riskli bölgeler sınıflandırılırken, bu durum LR ve DVM gibi lineer modellerde daha düşük risk seviyelerinde ifade edilmiştir. Bu fark, RO modelinin parametreler arası etkileşimleri daha iyi yakalayarak, doğal olmayan etkileri de modeline dahil edebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu yüzden çalışmada düşük eğimli ancak yüksek insan etkisine sahip alanların RO modeli tarafından yüksek riskli olarak değerlendirildiği gözlemlenmiştir.

DVM modeli ise eğim, yükselti ve litoloji gibi fiziksel özelliklere daha çok odaklanarak, şehir merkezinden uzak, daha yüksek eğimli alanları riskli olarak sınıflandırmıştır. Bu, modelin doğrusal sınır belirleme kapasitesiyle açıklanabilir. Ancak bu sınırlı yaklaşım, karmaşık yer şekilleri ile karakterize edilen bölgelerde genelleme gücünü azaltmıştır. LR yöntemi de benzer biçimde bir yaklaşım sunmuş ve yalnızca belirli parametrelerle sınırlı bir duyarlılık tahmini yapabilmektedir.

Sonuç olarak, RO algoritmasının üstün performansı, hem metrik başarıları hem de gerçek hayattaki coğrafi risk dağılımları ile uyumlu kararlar üretmesiyle desteklenmiştir. Ancak bu modelin şehir merkezlerinde yüksek risk belirlemesi, modelin kullandığı parametrelerin içsel ağırlıklarıyla ilişkili olup, insan etkisini barındıran alanlarda modelin eğilimi olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, RO modeline dayalı duyarlılık haritalarının uygulanması sürecinde, risk haritalarının kent planlaması ve arazi kullanım kararlarıyla birlikte değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, makine öğrenmesi tekniklerinin doğal afet modellemesine anlamlı katkılar sağlamaktadır. Faktörlerin sınıflandırılarak sayısal hale getirilmesi, bölge temelli veri yapısının oluşturulması ve kullanılan algoritmaların performanslarının karşılaştırılması, hem mekânsal analiz derinliğini artırmış hem de istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Modellerin ulaştığı yüksek doğruluk oranları, veri yapısının sağlam bir temele dayandığını ve çalışma alanının özgün dinamiklerini başarıyla yansıttığını göstermektedir.

Elde edilen duyarlılık haritaları, özellikle yerel yönetimler, afet müdahale birimleri ve mühendislik projelerinde karar destek aracı olarak kullanılabilir potansiyele sahiptir. Risk yönetimi, yeni yerleşim planlaması ve altyapı yatırımlarında bu tür mekânsal modellemelerin kullanılması, afet öncesi önlem alma süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Gelecekteki çalışmalarda, model doğruluğunu artırmak amacıyla daha yüksek çözünürlüklü verilerin kullanılması, zamana bağlı analizlerle heyelan riskinin mevsimsel değişimlerinin izlenmesi ve uydu görüntülerinden türetilen gerçek zamanlı parametrelerin entegrasyonu gibi yöntemler değerlendirilebilir. Ayrıca, modellerin farklı coğrafi bölgelerde test edilmesi, karşılaştırmalı analizlerin yapılmasını ve algoritmaların genellenebilirliğinin sınanmasını sağlayacaktır.

7. KAYNAKLAR

- [1] T. Kaynak, Uzaktan algılama ve CBS entegrasyonu ile taşkın duyarlılık haritalarının üretiminde etkili faktörlerin özellik seçimiyle belirlenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 2023.
- [2] B. Ildır, Türkiye'de heyelanların dağılımı ve afetler yasası ile ilgili uygulamalar, Proceedings of 2nd National Landslide Symposium Turkey, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 1995.
- [3] O. Gökçe, G. Özden, A. Demir, Türkiye'de Afetlerin Mekânsal ve İstatistiksel Dağılımı: Afet Bilgileri Envanteri, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2008.
- [4] D.J. Varnes, Slope movements: types and processes, (Special Report. 176), National Academy of Sciences, Washington, ABD, 1978.
- [5] S. Lee, Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data, International Journal of Remote Sensing, 26(2005), 1477–1491.
- [6] M.J. Froude, D.N. Petley, Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016, Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(2018), 2161–2181.
- [7] G. Usta, Dünya'da meydana gelen afetlerin istatistiksel olarak analizi (1900–2022), Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 14(2023), 172–186.
- [8] Anonim, AFAD Türkiye'nin Afet Risk Haritasını Çıkarttı, <https://ankara.afad.gov.tr/afad-turkiyenin-afet-risk-haritasini-cikardi-merkezicerik> (Erişim tarihi: 15 Nisan 2025).
- [9] S. Fidan, T. Görüm, Türkiye'de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi, Türk Coğrafya Dergisi, 74(2020), 123–134.
- [10] T. Taşkanat, Evrimsel algoritmalar kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye, 2020.
- [11] E.K. Şahin, Özellik seçimi algoritmaları kullanılarak heyelanda etkili faktörlerin belirlenmesi ve heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2017.

- [12] İ. Çölkesen & E.K. Şahin, Heyelan duyarlılık analizinde eğitim seti boyutunun harita doğruluğuna etkilerinin araştırılması. *Harita Dergisi*, 164,(2020) 43–60.
- [13] Anonim, 12. Kalkınma Planı Kapsamında Afet ve Deprem İçerikleri, <https://www.elektriktesisatportali.com/12-kalkinma-plani-kapsaminda-afet-deprem-icerikleri.html> (Erişim tarihi: 8 Haziran 2025)
- [14] T. Görüm, Coğrafi bilgi sistemi ve istatistiksel yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılık analizi: Melen Boğazı ve yakın çevresi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [15] L.M. Highland, P. Bobrowsky, *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*, U.S. Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia, USA, 2008.
- [16] I.Yılmaz, Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural network and support vector machine. *Environmental Earth Science*, 61(2009), 821-836.
- [17] Doğan, A. (2024). İzmir’i etkileyebilecek büyük depremlerin makine öğrenimi yöntemleriyle tahmin edilmesi [Prediction of major earthquakes that may affect İzmir using machine learning methods]. *Yerbilimleri*, 45(2024), 93–106.
- [18] G. Ke, Q. Meng, T. Finley, T. Wang, W. Chen, W. Ma, T.Y. Liu, LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30 (2017) 3146–3154.
- [19] H.D. Parker, The unique qualities of geographic information system: A commentary, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (1988) 1547–1549.
- [20] Anonim, CBS Günü 2020 Sempozyumu, <https://cbsgunu.csb.gov.tr/> (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2025).
- [21] T. Yomralıoğlu, *Coğrafi Bilgi Sistemleri*, Seçil Ofset, İstanbul, 2002
- [22] G. Altürk, Coğrafi bilgi sistemleri ortamında makine öğrenmesi ve istatistiksel yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılığının haritalanması: Rize Taşlıdere havzası örneği, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, 2019.
- [23] M.H. Vahidnia, A.A. Alesheikh, A. Alimohammadi, F. Hosseinali, A GIS-based neurofuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping, *Computers & Geosciences*, 36 (2010) 1101–1114.
- [24] E. Castellanos, C.J. Van Westen, *Landslide hazard assessment using the heuristic models*, ITC, Enschede, The Netherlands, 2003.

- [25] N. Yüksel, Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında istatistiksel yöntemlerin ve yapay sinir ağlarının kullanılması: Kumluca-Ulus (Bartın) Bölgesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [26] P. Aleotti, R. Chowdhury, Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (1999) 21–44.
- [27] M. Budimir, P. Atkinson, H. Lewis, Seismically induced landslide hazard and exposure modelling in Southern California based on the 1994 Northridge, California earthquake event, *Landslides*, 12 (2014) 1–16.
- [28] A. Carrara, M. Cardinali, R. Detti, F. Guzzetti, V. Pasqui, P. Reichenbach, GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, *Earth Surface Processes and Landforms*, 16 (1991) 427–445.
- [29] A. Brenning, Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (2005) 853–862.
- [30] M. Schonlau, R.Y. Zou, The random forest algorithm for statistical learning, *The Stata Journal*, 20 (2020) 3–29.
- [31] L. Breiman, Random forests, *Machine Learning*, 45 (2001) 5–32.
- [32] K. A. Eşidir, Makine öğrenimi modelleri ile yetişkin eğitimi analizi: Modellerin karşılaştırmalı performansı. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 24(2025), 946–964.
- [33] Anonim, Makine Öğrenmesinde Doğruluk, Kesinlik ve Geri çağırma: Fark Nedir? <https://encord.com/blog/classification-metrics-accuracy-precision-recall/> (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2025)
- [34] E. Sevgen, S. Kocaman, H.A. Nefeslioğlu, C. Gökçeoğlu, A novel performance assessment approach using photogrammetric techniques for landslide susceptibility mapping with logistic regression, ANN and random forest, *Remote Sensing*, 11 (2019) 2135.
- [35] M.A. Hussain, Z. Chen, R. Wang, S.U. Shah, M. Shoaib, N. Ali, D. Xu, C. Ma, Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithm, *Civil Engineering Journal*, 8 (2022) 209–224.
- [36] T. Yanar, S. Kocaman, C. Gökçeoğlu, On the use of Sentinel-2 images and high resolution DTM for landslide susceptibility mapping in a developing urban

- settlement (Mamak, Ankara, Turkey), International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W15 (2019) 125–131.
- [37] G. Karakaş, R. Can, S. Kocaman, H.A. Nefeslioğlu, C. Gökçeoğlu, Landslide susceptibility mapping with random forest model for Ordu, Turkey, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B3-2020 (2020) 565–570.
- [38] G. Karakaş, S. Kocaman ve C. Gökçeoğlu, Comprehensive performance assessment of landslide susceptibility mapping with MLP and random forest: A case study after Elazığ earthquake (24 Jan 2020, Mw 6.8), Turkey, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81 (2022) 180.
- [39] Bursa Büyükşehir Belediyesi, Bursa ili çevre düzeni planı raporu (1/100.000), Ulaşım ve İmar Dairesi Başkanlığı, Bursa, 2022.
- [40] U. Doğan, M. Yılmaz, Bursa-İnegöl yöresi heyelanlarının dağılımı ve nedenleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 53 (2010) 45–60.
- [41] C. Gökçeoğlu, M. Ercanoğlu, A fuzzy logic approach to landslide susceptibility assessment in the Inegöl (Bursa, Turkey) region, Engineering Geology, 59 (2001) 93–112.
- [42] Türkiye Cumhuriyeti Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Bursa İli Uzun Yıllar İklim Verileri, Türkiye Cumhuriyeti Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024. <https://mgm.gov.tr> (Erişim tarihi: 8 Ocak 2025).
- [43] Ö. Eminağaoğlu, Uludağ'ın bitki örtüsü özellikleri ve doğa koruma açısından önemi, Doğa ve İnsan, 6 (2001) 15–28.
- [44] C. Başara, İstatistiksel yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi ve konumsal hassasiyetlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 2021.
- [45] M.S. Chowdhury, A review on landslide susceptibility mapping research in Bangladesh, Heliyon, 9 (2023) e17972.
- [46] F.C. Dai, C.F. Lee, Y.Y. Ngai, Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, 64 (2002) 65–87.
- [47] S. Lee, K. Min, Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea, Environmental Geology, 40 (2001) 1095–1113.
- [48] R. Anbalagan, Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain, Engineering Geology, 32 (1992) 269–277.

- [49] J. Malczewski, GIS and Multicriteria Decision Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [50] H. Zhang, J. Zhang, R. Hu, Landslide susceptibility assessment using the certainty fact or and aspect analysis, *Frontiers in Earth Science*, 10 (2022) 1091560.
- [51] H. Özdemir, Havran Çayı Havzasının (Balıkesir) CBS ve uzaktan algılama yöntemleriyle taşkın ve heyelan risk analizi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, İstanbul, 2007.
- [52] S. Cellek, The effect of aspect on landslide and its relationship with other parameters, In: IntechOpen, London, 2022.
- [53] H. Zhao, J. Kowalski, Topographic uncertainty quantification for flow-like landslide models via stochastic simulations, *arXiv preprint arXiv:1910.04274*, 2019.
- [54] C. Chen, L. Fan, Selection of contributing factors for predicting landslide susceptibility using machine learning and deep learning models, *arXiv preprint arXiv:2309.06062*, 2023.
- [55] B. Pradhan, S. Lee, Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling, *Environmental Modelling & Software*, 25 (2010) 747–759.
- [56] R.J. Pike, The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models, *Mathematical Geology*, 20 (1988) 491–511.
- [57] I.D. Moore, R.B. Grayson, A.R. Ladson, Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, 5 (1991) 3–30.
- [58] L.W. Zevenbergen, C.R. Thorne, Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12 (1987) 47–56.
- [59] L. Ayalew, H. Yamagishi, The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, 65 (2005) 15–31.
- [60] K.J. Beven, M.J. Kirkby, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24 (1979) 43–69.
- [61] R. Sørensen, U. Zinko, J. Seibert, On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 10 (2006) 101–112.

- [62] S. Lee, B. Pradhan, Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models, *Landslides*, 4 (2007) 33–41.
- [63] F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi, C.P. Stark, The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides*, 5 (2008) 3–17.
- [64] R.M. Iverson, Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, 36 (2000) 1897–1910.
- [65] Y. Hong, R.F. Adler, G.J. Huffman, Use of satellite remote sensing data for landslide hazard analysis, *Natural Hazards*, 43 (2007) 245–256.
- [66] A. Yalçın, GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardeşen (Turkey): Comparisons of results and confirmations, *Catena*, 72 (2008) 1–12.
- [67] B. Pradhan, S. Lee, Delineation of landslide hazard areas using frequency ratio, logistic regression and artificial neural network models at Penang Island, Malaysia, *Environmental Earth Sciences*, 60 (2010) 1037–1054.
- [68] B. Doğru, C. Güngöroğlu, “Farklı Meteorolojik İstasyonlara Ait Yağış Değerlerinin Haritalanmasında Etkenliğin Arttırılmasına Dair Bir Uygulama”.*Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, e-ISSN 2687-5179 (2023).
- [69] B. Pradhan, Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches, *Environmental Earth Sciences*, 61 (2010) 1045–1056.
- [70] M. Aghlmand, M.İ. Onur, R. Talaei, Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde Analitik Hiyerarşi Yönteminin ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanımı, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı (2020) 224–230.
- [71] E. Özşahin, Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla heyelan duyarlılık analizi: Ganos Dağı örneği, *Teknolojik Araştırmalar: HTED*, 1 (2015) 47–63.
- [72] G. Demir, Kuzey Anadolu Fayı üzerinde Niksar–Suşehri arasındaki alanın CBS tabanlı heyelan duyarlılık analizi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2011.
- [73] F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, P. Reichenbach, Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, *Central Italy, Geomorphology*, 31 (1999) 181–216.
- [74] B. Pradhan, Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3 (2010) 370–381.

- [75] C.J. Tucker, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8 (1979) 127–150.
- [76] A.Ç. Aydınoğlu, G. Altürk, Heyelan duyarlılık haritalarının istatistik ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak üretilmesi: Taşlıdere Havzası örneği (Rize), *Coğrafya Dergisi – Journal of Geography*, 43 (2021) 159–176.